

Les détecteurs de rayonnements ionisants

métriques (ou dosifilms) doivent leur être adressés, mensuellement ou trimestriellement : les résultats sont retournés au médecin du travail de l'établissement.

L'émulsion photographique est enfermée dans une pochette et placée entre des écrans de cuivre ou de plomb. Ces filtres permettent d'obtenir des informations sur la nature et l'énergie des rayonnements (les plus énergétiques traversant le plomb, les moins énergétiques n'impressionnant que la partie découverte du film). L'inconvénient majeur du film est sa faible sensibilité : le seuil de mesure est de l'ordre de 100 μSv . Au-dessous de cette valeur, la dose est souvent annoncée nulle, elle est en fait comprise entre 0 et ce seuil. Aussi peut-il être plus informatif de cumuler l'exposition sur un trimestre pour avoir une lecture plus précise.

Les films dosimétriques permettent *a priori* d'apprécier le domaine de dose dans lequel va œuvrer un travailleur, mais leur faible sensibilité ne leur permettent pas d'optimiser l'exposition reçue à un poste.

Par ailleurs, ces films sont sensibles à la chaleur et au vieillissement.

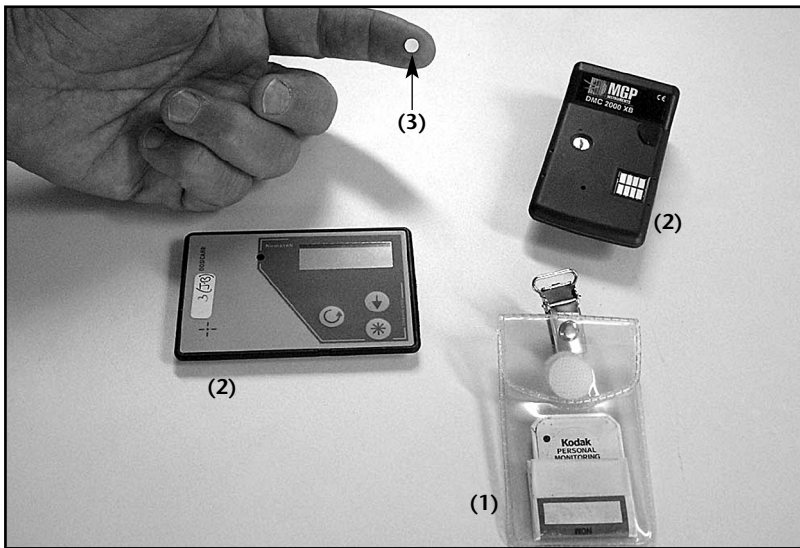


Figure 16.17
Ensemble de détecteurs pour des mesures de doses individuelles de travailleurs. (1) Film photographique (dosimètre passif); (2) dosimètres actifs à semi-conducteur; (3) dosimètre passif thermoluminescent. La pastille détectrice peut être placée à l'extrémité d'un doigt pour mesurer la dose reçue lors d'une radiologie interventionnelle.

Le plus connu des *dosimètres thermoluminescents* est le fluorure de lithium (FLi). Ces dosimètres sont d'un grand intérêt car le matériau peut prendre des formes diverses : poudre, pastille, bâtonnets. Il est ainsi possible de positionner un dosimètre en tout point de l'organisme : il peut être intégré dans une bague pour mesurer la dose reçue à la main par un opérateur en radiologie interventionnelle, ou être placé dans un fantôme pour mesurer la dose délivrée par une procédure radiologique ou radiothérapeutique.

En effet, la sensibilité d'un dosimètre s'étend de 10 μSv à 100 Sv, et son domaine d'énergie de 20 keV à 10 MeV.

► Paragraphe 16.1.4

Il est de plus relativement bon marché (abstraction faite du dispositif de lecture), réutilisable, mais à la différence du film, il permet difficilement de conserver la preuve d'une exposition.

Actuellement, de nouveaux dosimètres, apparentés aux dosimètres thermoluminescents mais utilisant la technologie OSL (luminescence stimulée optiquement), sont proposés dans le cadre d'une dosimétrie individuelle des travailleurs. Les rayonnements affectent une poudre d'oxyde d'aluminium dopée au carbone. Lors de la lecture, l'oxyde d'aluminium stimulé par des diodes électroluminescentes engendre une luminescence proportionnelle à la dose reçue. Le seuil de détection est de 10 μSv . Ce type de dosimètre très diffusé dans le monde n'est pas reconnu officiellement en France.

b) Les dosimètres actifs

Plusieurs types de dosimètres permettent une lecture directe de la dose reçue. Certains d'entre eux représentent une révolution dans le domaine de la radioprotection des travailleurs.

La *chambre d'ionisation* est en général un détecteur à gaz (à air) de forme variée (cylindre, stylo). L'amplitude du signal ne dépendant que de l'énergie de la particule, la chambre est bien adaptée à l'appréciation

des doses. La précision des mesures est de l'ordre de 20 %, ce qui est suffisant pour évaluer un risque. Le seuil de sensibilité est de l'ordre de 0,2 mSv. Elle peut mesurer la dose sortant d'un tube de rayons X.

Avec le *compteur Geiger-Müller*, l'amplitude du signal collecté est élevée mais elle n'est plus proportionnelle à l'énergie. Un tel détecteur doit donc être étalonné. Sa sensibilité est cependant de l'ordre du microsievert.

Ce type de détecteur est utilisé par exemple dans le réseau Teleray qui a pour mission de mesurer toute variation anormale de la radioactivité dans l'environnement. Ce réseau comporte 180 stations couvrant le territoire national. Il permet d'alerter automatiquement un poste centralisateur de l'IRSN dès qu'une anomalie de la radioactivité ambiante est détectée.

Les *dosimètres solides* constituent une véritable avancée dans le domaine de l'optimisation et du contrôle de la radioprotection. L'élément détecteur est un semi-conducteur (Si ou Ge) beaucoup plus efficace qu'un gaz pour détecter un rayonnement X ou γ . De plus, chaque ionisation ne nécessite que 3 eV dans le semi-

La dosimétrie opérationnelle

La procédure menant de la mesure de la dose à son transfert vers un organisme de surveillance porte le nom de *dosimétrie opérationnelle*. Les dispositifs développés à l'origine pour les travailleurs de l'industrie nucléaire ont ensuite été étendus à l'ensemble du domaine médical.

En effet, il est possible de transférer les données dosimétriques vers une borne de lecture par connexion infrarouge, dite main libre : les bornes de lecture placées à la sortie des blocs radiochirurgicaux par exemple enregistrent et transfèrent vers un micro-ordinateur, puis à intervalle régulier vers l'organisme responsable de la gestion nationale de la dosimétrie des travailleurs. Le système national français d'enregistrement et d'analyse des données transmises est le système *Siseri*.

Seuls les travailleurs pénétrant dans des *zones contrôlées* ont l'obligation d'utiliser la dosimétrie opérationnelle. En médecine, ceci concerne particulièrement les radiothérapeutes et les médecins nucléaires, chirurgiens, cardiologues, radiologues utilisant les rayonnements ionisants dans un acte thérapeutiques (radiologie interventionnelle).

Les détecteurs de rayonnements ionisants

conducteur (alors qu'il en faut 34 dans l'air). Le nombre élevé d'ions produits permet de réduire la taille du détecteur tout en gardant une grande sensibilité. Le détecteur est ainsi intégré dans un boîtier du format d'une carte de crédit épaisse d'un centimètre.

Ce détecteur est robuste et surtout particulièrement sensible puisqu'il permet d'apprécier des variations de dose de l'ordre du microsievert.

L'électronique qui lui est associée est élaborée, elle permet l'affichage sur un écran de la dose et de son débit, elle peut déclencher des alarmes sonore ou visuelle. Mais la quasi-totalité de ces détecteurs intègre un microprocesseur offrant de grandes possibilités d'analyse et de stockage des données. Il devient possible de connaître l'historique de la dose reçue par un travailleur au cours d'une journée, ce qui offre la possibilité d'études efficaces des postes à risque.

c) La dosimétrie biologique

On sait depuis longtemps que les rayonnements ionisants ont une action biologique. Cette action au niveau de la molécule d'ADN fait l'objet de très nombreux travaux. Mais, depuis les années 1960, la mise en évidence d'aberrations chromosomiques dans les cellules a permis la quantification d'un flux de rayonnement reçu par un individu.

Actuellement, la dosimétrie biologique repose sur la recherche d'anomalies chromosomiques dans les lymphocytes du sang circulant. Ces aberrations sont surtout visibles sur des lymphocytes en métaphase : *chromosomes dicentriques*, anneaux centriques, fragments, etc.

La sensibilité et la spécificité de cette technique reposent sur le fait que normalement il n'existe que moins d'un chromosome dicentrique sur 1 000 lymphocytes normaux. La limite de dose ainsi mesurable pour une irradiation corps entier est de 10 mGy et il existe une excellente correspondance entre les méthodes physiques de mesure de dose et les méthodes biologiques.

D'autres méthodes caractérisent l'action biologique des rayonnements : la méthode dite des *micronoyaux*, rapidement applicable à un tri de population lors d'un accident d'irradiation de grande envergure, la méthode d'hybridation *in situ* fluorescente (*fish*) qui pourrait servir de dosimètre rétrospectif pour des irradiations anciennes.

► Chapitre 25

► Paragraphe 25.2

16.5 L'imagerie en recherche médicale

La radioactivité est très certainement l'agent physique le plus utilisé en recherche médicale. Le fait de pouvoir marquer par la radioactivité de nombreuses molécules intervenant dans le métabolisme d'un organe, ou possédant un intérêt pharmacologique, constitue un outil irremplaçable. Cet outil peut être utilisé *in vitro* pour visualiser la localisation de la molécule sur des coupes de tissus ou *in vivo* pour étudier le métabolisme de la molécule injectée à un petit animal.

Des dispositifs permettant de réaliser de telles images sont présentés dans ce qui suit.

16-5-1 Les films et émulsions

Le matériel photographique a joué un rôle très important dans la détection des rayonnements ionisants. L'imagerie radiographique utilisant des films est encore très utilisée, mais son déclin semble inéluctable.

L'*autoradiographie* sur film est la production d'une image de la source radioactive placée directement en contact avec l'émulsion. Avec les émetteurs β^- dont le parcours dans la matière est limité, la formation de l'image est directe, car les particules agissent directement sur les cristaux d'halogénure d'argent.

La résolution spatiale d'une autoradiographie est de l'ordre de 20 μm . Elle dépend de plusieurs paramètres : énergie des rayonnements, type et épaisseur de l'émulsion, épaisseur de l'échantillon.

L'inconvénient est le manque de sensibilité : le temps de pose nécessaire pour obtenir l'image de la répartition d'une molécule marquée dans une coupe de quelques microns d'épaisseur peut atteindre plusieurs semaines.

Par ailleurs, la préparation de telles coupes ou de dépôts de substance radioactive requiert une expérience certaine.

16-5-2 Les radio-imageurs β

Il s'agit pour la plupart de dispositifs d'imagerie reposant sur l'utilisation de détecteurs dont les principes de fonctionnement ont été décrits précédemment. Mais ces détecteurs et l'électronique associée sont beaucoup plus complexes qu'un simple détecteur car leur finalité est d'aboutir à une image traduisant la répartition d'une molécule radioactive.

Ces dispositifs cherchent à supplanter la technique autoradiographique sur film, en améliorant en particulier son défaut majeur de sensibilité. Mais la résolution spatiale du film reste le paramètre de référence.

► Paragraphe 21.2.3c

a) Les imageurs à écran photostimulable (ELRM)

Ils sont également appelés *imageurs à plaque phosphore*, leur principe de fonctionnement est identique à celui des détecteurs thermoluminescents.

La plaque phosphore est composée d'une fine couche de cristaux de phosphore photostimulables déposée sur un support en polyester. L'ensemble est recouvert d'une fine protection en plastique. L'échantillon est déposé sur ce film, à l'extérieur, et les rayonnements émis vont créer une image latente d'électrons excités. L'énergie ainsi stockée va être libérée par stimulation du phosphore par un faisceau laser hélium-néon qui provoque une émission de luminescence bleue. Cette luminescence est captée par un photomultiplicateur. L'image est constituée point par point par balayage de la plaque pendant 1 à 2 minutes.

Les détecteurs de rayonnements ionisants

La résolution des images est de l'ordre de 100 microns. La surface des plaques est de $20 \times 25 \text{ cm}^2$ et elles sont réutilisables. Plusieurs peuvent être disponibles pour un seul système de lecture commun.

L'inconvénient majeur du dispositif est l'impossibilité de détecter des émetteurs β^- de faible énergie, comme le ^3H , radionucléide fondamental en recherche (cf. fig. 16.1).

b) Les β -imageurs (détecteurs gazeux à scintillation)

Les développements technologiques menés au Cern par George Charpak sur les chambres à avalanche à faces parallèles à lecture optique ont montré qu'il était possible de réaliser des mesures fiables de l'activité β^- dispersée sur des échantillons biologiques. Plusieurs systèmes d'imagerie ont été conçus à partir d'une chambre à gaz, seul le β -imageur est commercialisé dans le domaine biologique. Il possède des avantages indéniables sur les films autoradiographiques.

Dans ce type de détecteur, la chambre à gaz comporte deux grilles parallèles entre lesquelles règne un champ électrique intense : la distance entre ces grilles est de l'ordre de $2 \text{ }\mu\text{m}$ et la tension appliquée est de l'ordre de $1,6 \text{ kV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$. Le gaz utilisé est un mélange d'argon-méthane à la pression atmosphérique. La surface d'analyse est de $250 \times 200 \text{ mm}^2$.

L'échantillon biologique est introduit dans la chambre au contact de la grille supérieure. Lorsqu'une particule β^- pénètre dans la chambre, elle laisse une traînée d'ionisation. Comme le champ électrique est intense entre les grilles, les électrons dérivent et créent à leur tour

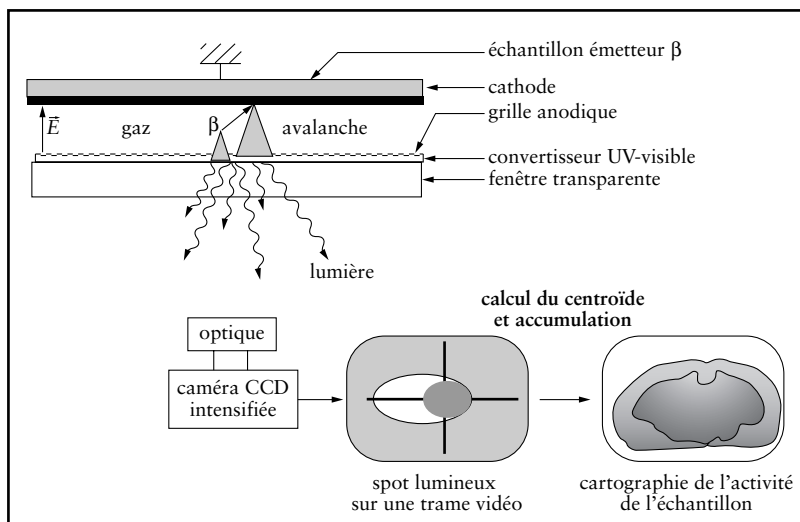


Figure 16.18 Schéma de fonctionnement d'un β -imageur. La coupe autoradiographique est placée à l'intérieur de la chambre à avalanche. Un rayonnement β va créer des ionisations et des photons. La détection de la tache lumineuse est effectuée par une caméra CCD intensifiée. L'analyse morphomathématique de la tache permet de déterminer l'origine et l'énergie du rayonnement qui lui a donné naissance.



Figure 16.19 β -imageur : la majeure partie du dispositif est occupée par la caméra CCD. Un porte-échantillon comportant 15 coupes est introduit dans la chambre à avalanche. Il faut attendre 30 minutes pour rétablir le gaz dans le détecteur et atteindre un bon équilibre. Les temps de réalisation d'une image varie entre 1 et 12 heures. Il est possible de réaliser une image sur une seule coupe, on augmente ainsi la résolution spatiale. © CNEBMN.

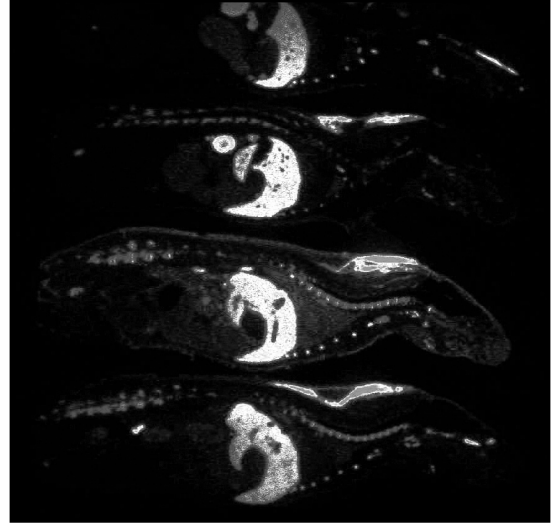


Figure 16.20 Autoradiographie réalisée avec un β -imageur. Une molécule marquée au ^{14}C a été préalablement administrée à un rat. Il s'agit ici de coupes corps entier. Cette image est plus lisible dans les pages en couleur regroupées au centre de l'ouvrage. © CNEBMN.

► Paragraphe 16.1.2c

d'autres ionisations. L'amplification est une fonction exponentielle de la distance à l'anode inférieure. La détermination du maximum de la distribution des charges à l'anode donne la coordonnée de l'électron libéré le plus proche du point d'entrée de la particule β^- : il est donc possible de localiser spatialement cette source.

Mais ce qui fait l'originalité de ce dispositif réside dans le mode de lecture utilisé pour localiser la source. En effet, la lecture électronique est remplacée par une lecture optique de la lumière produite par les atomes excités. Cette lumière est convertie en lumière visible par introduction de molécules de TEA (triéthylamine) dans le mélange gazeux. La lumière est ensuite analysée par une caméra CCD intensifiée. La taille des pixels dans ces caméras varie entre 5 et 25 μm de côté.

À partir de la trace d'ionisation de la particule β^- , la caméra enregistre une tache lumineuse (spot). L'analyse mathématique de la répartition de la lumière dans ce spot et la détermination de sa forme fournissent des données sur la localisation de la source radioactive mais aussi sur l'énergie du rayonnement (cf. fig. 16.18 et 16.19).

Ce type d'imageur possède de très nombreux avantages :

- une grande surface de détection ;
- la possibilité de détecter tous les rayonnements β^- , surtout ceux de très faible énergie (^3H à 18 keV) ;
- une sensibilité proche de 100 % (pour certains isotopes, cette sensibilité est 500 fois supérieure à celle d'un film, le temps d'acquisition des données est donc réduit et les chercheurs peuvent obtenir des résultats dans des délais raisonnables) ;

— la possibilité de réaliser des images séparées avec plusieurs isotopes (^3H et ^{14}C). Cette séparation des images de chacun des isotopes se fait en tenant compte de leurs énergies ou de leurs périodes radioactives respectives.

En revanche, la résolution spatiale des images est moyenne. Elle dépend de l'énergie du rayonnement et varie de 30 à 100 μm (cf. fig. 16.20).

Notons encore que ce dispositif peut permettre de localiser :

- des émetteurs β^+ (avant leur annihilation) ;
- des émetteurs $\beta\text{-}\gamma$ bien le dispositif soit totalement insensible aux rayonnements γ . Mais cette chambre permet d'obtenir de bonnes images avec le $^{99\text{m}}\text{Tc}$ en détectant les électrons libérés par ce radionucléide émetteur γ .

c) Les imageurs à film scintillant mince

Il s'agit d'un radio-imageur haute résolution, ou micro-imageur, développé à Orsay (cf. fig. 16.21). L'élément détecteur est un scintillateur plastique très mince, directement placé sur l'échantillon biologique. Ce scintillateur est couplé à une caméra CCD intensifiée. Le système d'analyse de la lumière produite et les logiciels de traitement des signaux sont identiques à ceux du β -imageur.

La résolution spatiale des images est de 15 μm , indépendamment de l'énergie du rayonnement β^- (cf. fig. 16.1 et 16.22).

Par contre, par rapport au β -imageur, l'efficacité de ce dispositif est moindre et son champ d'analyse plus petit. En recherche médicale, il est souvent complémentaire du β -imageur.



Figure 16.21 Micro-imageur. Un film scintillant est placé sur la coupe. Cette dernière est alors introduite dans le système de détection. © CNEBMN.

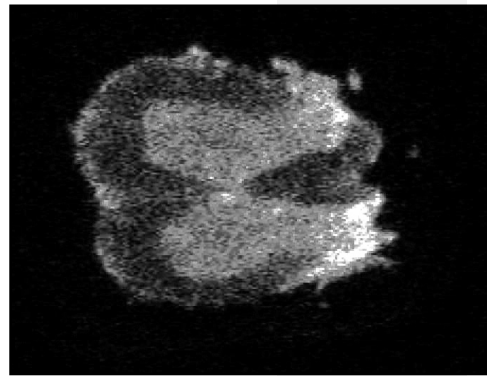


Figure 16.22 Autoradiographie de coupe de structures nerveuses d'un rat réalisée au micro-imageur. Identification des centres de la douleur à l'aide de sondes marquées spécifiques des récepteurs cellulaires. Cette image est plus lisible dans les pages en couleur regroupées au centre de l'ouvrage. © CNEBMN.

POUR CONCLURE

Il existe une très grande variété de détecteurs de rayonnements ionisants conçus pour des applications médicales dans le domaine du diagnostic, de la recherche et de l'environnement. Ces détecteurs qui doivent donc répondre à des attentes spécifiques sont obligatoirement différents : différents par leur principe de fonctionnement, par les dispositifs d'analyse et de traitement des données associés, et par leur prix de revient bien sûr. Le choix d'un détecteur doit être réfléchi et reposer sur un cahier des charges précis. Il est utile de préciser qu'un ensemble de détecteurs doit être entretenu, vérifié régulièrement, voire étalonné.

En jetant un regard sur les années passées, on s'aperçoit qu'en médecine certains détecteurs comme la caméra à scintillation ou le compteur Geiger-Müller sont loin d'être obsolètes malgré les années. D'autres, comme le film photographique, qui a rendu d'innombrables services, seront remplacés par des détecteurs plus performants.

Toutes les réponses à ces questions et des tests interactifs sont disponibles sur www.omniscience.fr.

QCM ET QROC

QCM et QROC

1 Parmi les énoncés suivants, donner la (les) proposition(s) exacte(s).

- A** Le tube de Coolidge est un détecteur de rayonnement.
- B** Le compteur Geiger-Müller est un détecteur à gaz.
- C** Le compteur Geiger-Müller ne permet pas la détection des rayonnements γ .
- D** Dans un compteur Geiger-Müller, la haute tension est plus élevée que dans une chambre d'ionisation.
- E** La chambre d'ionisation permet de mesurer l'activité d'une source radioactive.

2 Donner la (les) proposition(s) exacte(s). Dans un compteur à scintillation :

- A** le cristal permet la transformation d'un photon de haute énergie en flux de photons de basse énergie (scintillation);
- B** les scintillateurs liquides sont surtout utilisés pour la détection des rayonnements électromagnétiques;
- C** les scintillateurs inorganiques ont un numéro atomique élevé pour augmenter l'efficacité de détection.
- D** Dans un cristal NaI dopé au thallium, ce dernier élément est indispensable pour obtenir des photons dont la longueur d'onde est proche du visible.
- E** Dans un matériau semi-conducteur, les bandes de valence et les bandes de conduction sont davantage séparées que celles d'un matériau isolant.

3 Donner la (les) proposition(s) exacte(s).

- A** Les dosimètres actifs permettent une mesure directe de la dose reçue par un travailleur.
- B** Le film photographique est un dosimètre actif.
- C** Les détecteurs à semi-conducteur permettent d'apprécier des variations de dose de l'ordre du microsievert.
- D** La dosimétrie biologique est basée sur la recherche d'anomalies chromosomiques sur un individu irradié.
- E** La limite de dose mesurable en dosimétrie biologique est de 5 grays pour une irradiation « corps entier ».

4 Parmi l'ensemble des types de détecteurs proposés lequel ou lesquels va-t-on pouvoir utiliser pour la détermination d'une source inconnue par spectrométrie γ ?

- A** Le compteur Geiger-Müller.
- B** Le compteur à scintillation.
- C** Le semi-conducteur.
- D** Le β -imageur.
- E** Le film ou l'émulsion.