

**DEVELOPPEMENT EN DOSIMETRIE NEUTRON :  
SYSTEME AUTOMATIQUE DE LECTURE DE TRACES  
ET DOSIMETRE OSL ALBEDO**

**M Million<sup>1</sup>, C A Perks<sup>1</sup> et S Faugoin<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>LCIE LANDAUER, 33 Avenue du General Leclerc, F-92266,  
Fontenay-aux-Roses CEDEX, France.*

*Telephone: +33 (0) 1 40 95 62 95, Facsimile +33 (0) 1 40 95 62 84*

*e-mail : mmillion@landauer-fr.com*

**Résumé**

La dosimétrie neutron basée sur le détecteur solide de trace CR-39 est utilisée depuis de nombreuses années par LCIE LANDAUER. Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2008, la réglementation française requiert que la plus petite dose non nulle enregistrée ne puisse être supérieure à 0,1 mSv. Cette nouvelle exigence a conduit LCIE LANDAUER a développé un système de lecture plus performant. Ce développement a été l'occasion d'abandonner la lecture humaine, tâche fastidieuse, et d'intégrer de nouvelles capacités de détection. Les améliorations principales sont :

- l'installation d'un système de lecture automatique,
- la réévaluation de la limite de détection,
- l'analyse morphologique des traces.

Au-delà des progrès significatifs apportés à nos services, la révélation des traces par attaque chimique des détecteurs CR-39 reste un processus délicat et long (durée de bain : 15h00). C'est pourquoi le groupe LANDAUER a également développé plusieurs technologies de dosimètres neutrons dont un dosimètre albedo basé sur les dosimètres OSL InLight<sup>®</sup> à utiliser lors de situations d'exposition aux neutrons bien caractérisées.

Ce papier présente une vue générale de ces améliorations. Il décrit également les futurs développements de notre service de dosimétrie neutron pour les prochaines années.

## 1. INTRODUCTION

LANDAUER fournit des services de dosimétrie neutron à plus de 50 000 porteurs dans le monde et près de 5 000 en France pour l'industrie nucléaire, l'industrie pétrolière, la recherche...

Depuis 1985, LANDAUER utilise des détecteurs solides de trace (CR-39) pour la dosimétrie neutron. L'analyse d'un CR-39 s'effectue après trempage de celui-ci pendant 15h00 dans un bain de soude. Ce traitement est destiné à révéler les traces produites dans le matériau. En France, le principe de mesure repose sur le comptage manuel du nombre de traces laissées sur une surface déterminée du détecteur. Cette lecture est effectuée par des opérateurs grâce à des microscopes. A noter, notre dosimètre est conforme aux spécifications de la norme ISO 21909<sup>(1)</sup>.

Le 30 décembre 2004, la réglementation a requis que la plus petite dose non nulle enregistrée ne puisse être supérieure à 0,1 mSv, une valeur inférieure à celle reportée à ce jour par notre laboratoire (0,2 mSv). Le comptage manuel des traces, du fait des capacités limitées de diagnostic humain et de la variabilité des analyses entre individus, ne permet pas d'améliorer significativement la fiabilité et les performances de lecture. De ce fait, LCIE LANDAUER a développé un système de lecture automatique de trace dont les améliorations principales sont :

- un abaissement de la limite de détection,
- l'analyse morphologique des traces,
- la disparition d'une tâche fastidieuse pour les opérateurs.

Au-delà des progrès significatifs apportés à nos services, la révélation des traces par attaque chimique des détecteurs CR-39 reste un processus délicat et long (durée de bain : 15h00). C'est pourquoi le groupe LANDAUER a également développé plusieurs technologies de dosimètres neutrons dont un dosimètre albédo basé sur les dosimètres OSL InLight<sup>®</sup> à utiliser lors de situations d'exposition aux neutrons bien caractérisées.

## 2. SYSTEME DE LECTURE AUTOMATIQUE DES TRACES

Le comptage manuel des dosimètres neutrons CR-39 nécessite le maintien d'opérateurs qualifiés et formés. Ce travail de comptage réalisé manuellement sous binoculaire est également une opération fastidieuse dont la fiabilité dépend de facteurs humains. Afin de limiter ces facteurs et de diminuer la pénibilité du travail de nos équipes tout en apportant de nouvelles performances de lecture difficilement accessible humainement LCIE LANDAUER a développé un système de lecture automatique. Ce système est capable de compter les traces issues des interactions des protons ou des alphas dans le substrat de CR-39. Il comporte de nouvelles fonctionnalités de détection basées sur une analyse morphologique des traces (taille, forme...).

### Le système

Le système de comptage automatique (Cf. figure 1) comporte :

- un microscope optique motorisé,
- une caméra électronique (résolution : 2048 × 2048),
- deux PC, un pour piloter le microscope et collecter les images, l'autre pour exécuter l'analyse des images,
- le logiciel d'analyse d'image.

Les applications pour piloter le microscope et analyser les images ont été réalisées à partir de la plateforme de développement Visilog de Noesis. L'application d'analyse d'images est reliée directement au système de gestion des doses de LCIE LANDAUER. Le microscope automatique a une capacité de chargement de 80 dosimètres CR-39.

Pour chaque dosimètre CR-39, le système réalise trois niveaux d'analyse :

1. une identification des numéros de série de badges qui permet de s'assurer de la traçabilité des informations dosimétriques,
2. une vérification de la planéité des badges,

3. une acquisition sur plusieurs images d'un échantillonnage de la surface du CR-39.

Le deuxième ordinateur remplit la fonction d'analyse d'image et transfère les données de mesure à la base de données LCIE LANDAUER.

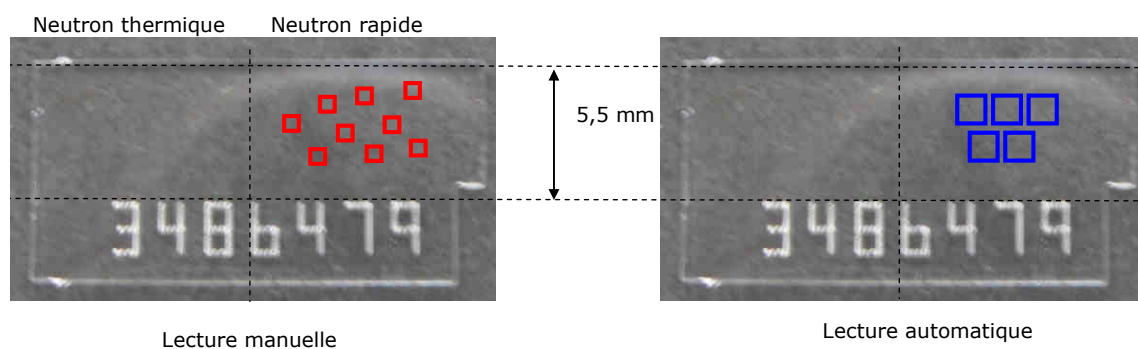
La capacité de lecture est d'au moins 400 badges par jour (8 heures) au lieu de 200 par jour pour un opérateur et ce pour une surface d'analyse au minimum deux fois supérieure.

**Figure 1: Le système de lecture automatique**



Lors de la lecture d'un dosimètre, l'estimation de la dose est réalisée sur un échantillonnage de la surface. Plus la surface d'échantillonnage est grande, plus faible sera l'incertitude de mesure. Une lecture humaine réalise une estimation de dose à partir d'une surface de 4,4 mm<sup>2</sup> (Cf. figure 2). L'étendue de la surface analysée est alors limitée par la capacité humaine à analyser une grande surface. Dans le cas d'un système automatique, il est aisé d'augmenter la surface sans perte de temps d'exploitation significative. Ainsi par défaut, le système automatique peut échantillonner une surface de 9,2 mm<sup>2</sup> en routine (Cf. figure 2) et 18,5 mm<sup>2</sup> en mode d'analyse étendue.

**Figure 2 : Surface échantillonnée lors de mesures humaines et automatiques**



## Essais initiaux et première caractérisation du système

Avant la mise en service du système de lecture, des tests préliminaires ont été réalisés afin de caractériser les performances d'exploitation en routine. Ces essais ont utilisé principalement des dosimètres irradiés en faisceau mono-énergétique par le laboratoire de physique national du Royaume-Uni (NPL) et avec une source d'américium béryllium par le laboratoire de LANDAUER aux Etats-Unis. Les résultats pour la dose et la réponse du système sont rapportés ci-dessous.

### Seuil de détection

Comme mentionné ci-dessus, une des améliorations recherchées était d'abaisser la limite de détection en dessous de 0,1 mSv. La norme ISO 21909 [1] (section C.2.3) définit la méthode pour déterminer le seuil de détection pour les détecteurs solides de traces, tels que CR-39, comme :

*Procéder à l'attaque chimique et lire  $i = 1$  à  $n$  dosimètres non irradiés. Utiliser le coefficient de conversion correspondant à une source neutronique de  $^{241}\text{Am-Be}$  ou de  $^{252}\text{Cf}$  pour transformer le nombre de traces en équivalent de dose mesuré,  $H_i$ , et calculer l'écart-type expérimental,  $s$ , pour les  $n$  dosimètres. Montrer que les conditions demandées dans l'équation [1], exprimées en millisieverts, sont satisfaites :*

$$t_{n,s} \leq 0,3 \quad [1]$$

où les valeurs de  $t_n$  figurent au Tableau B.2 de la norme.

Ceci suppose un seuil de détection de 0,3 mSv. Pour un seuil de détection de  $d_t$  mSv l'équation [1] devient :

$$t_{n,s} \leq d_t \quad [2]$$

Dix dosimètres non irradiés ont été lus avec un résultat estimé à partir des coefficients de conversion standard pour déterminer l'équivalent de dose mesurée (pour une source  $^{241}\text{Am-Be}$ ).

Pour  $t_{10} = 1,83$  et l'écart type de la dose mesurée de 0,025 mSv, la limite de détection est inférieure à 0,05 mSv. Cette limite permet de rapporter des doses sur les rapports de contrôle à partir de 0,1 mSv avec un degré de confiance bien supérieure à celui définie pour la limite de détection.

### Linéarité de la réponse

D'autres évaluations de la réponse à dose donnée ont été faites pour démontrer que la linéarité est de  $\pm 10\%$  tel qu'exigé pour des doses de 1 mSv à 100 mSv. Des détecteurs irradiés au NPL ont été utilisés pour cette évaluation, les résultats sont synthétisés dans le tableau 1.

**Table 1: écart entre valeurs d'irradiation et valeurs estimées**

Valeur d'irradiation mSv	Valeur estimée mSv	écart %
0,5	0,43	-15
0,79	0,82	4
1,5	1,60	7
6,23	5,84	-6
21,04	20,26	-4
45,35	46,24	2

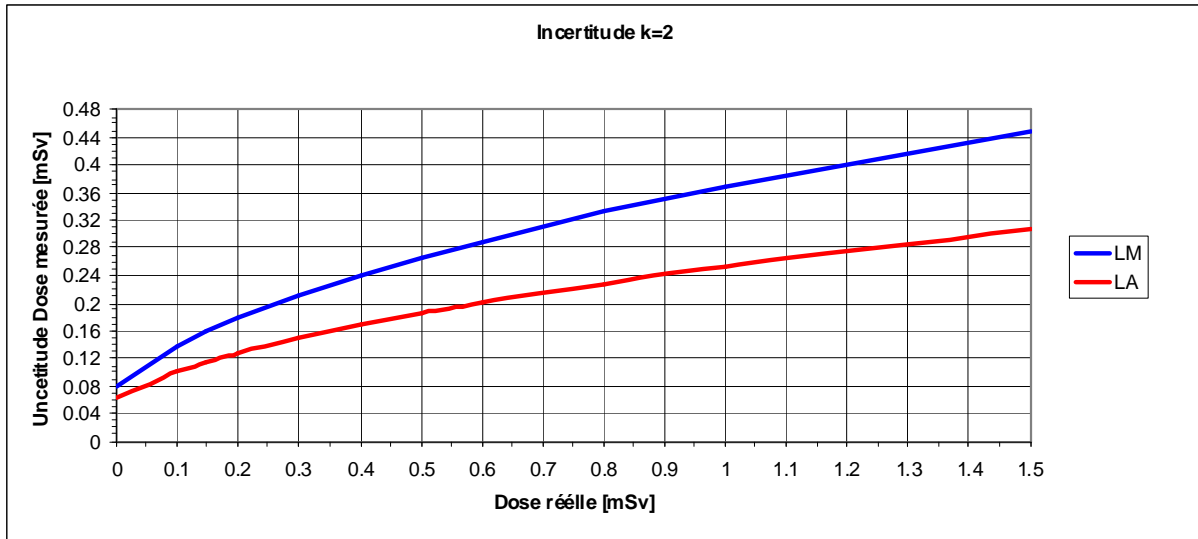
La réponse en dose est à  $\pm 10\%$  pour tous les dosimètres jusqu'à la dose maximum exposée égale à 45 mSv, sauf pour la valeur à 0,5 mSv.

### *Incertitude de la dose mesurée*

Des estimations de l'incertitude de mesure ont été réalisées à partir de dosimètres non irradiés et de dosimètres irradiés avec une source de neutron  $^{241}\text{Am-Be}$ . L'incertitude a été calculée selon les recommandations de la section B.4 de la norme de l'ISO<sup>(1)</sup> :  $\sigma = (\sigma_0^2 + \sigma_0^2)^{1/2}$

La figure 3 donne l'incertitude en fonction de la dose pour les évaluations humaines et pour le lecteur automatique. Une amélioration significative est notée en utilisant le lecteur automatique.

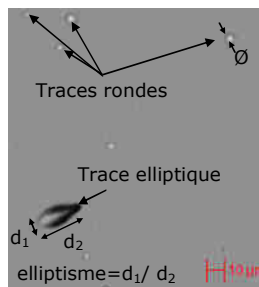
**Figure 3: Incertitude en fonction de la dose (k=2)  
Lecture manuelle (LM) versus lecture automatique (LA)**



### *Analyse morphologique des traces*

Le système automatique de lecture a la capacité de classer les traces en fonction de leurs morphologies. Elles sont classées selon leur taille et leur forme elliptique.

**Figure 4 : Type de trace reconnue et caractérisée**



L'objet de cette analyse morphologique est de permettre des corrections basées sur la taille des traces ou sur le type d'irradiation d'incidence normale ou oblique.

### **3. DEVELOPPEMENT D'UN DOSIMETRE OSL ALBEDO**

Des systèmes de dosimétrie à thermoluminescence (TLD) ont été intensivement employés pour la dosimétrie neutron de type albedo<sup>(2)</sup>. Un certain nombre sont aujourd'hui en service tels que les systèmes Panasonic UD-809 et Thermo-Électron TLD-600/TLD-700.

La luminescence optiquement stimulée (OSL) a été adoptée par LANDAUER depuis plus de dix ans comme la technologie de dosimétrie pour les photons et les particules bêta. LANDAUER utilise pour ses détecteurs de la poudre d'oxyde d'aluminium dopée au carbone ( $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$ ).

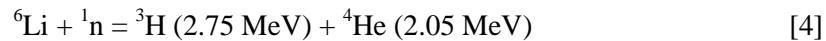
Les phénomènes physiques mis en jeu lors des mécanismes de piégeage des charges pendant l'exposition au rayonnement sont voisins de la thermoluminescence. La différence principale est le mécanisme de déplétion des charges piégées qui n'est pas réalisé par chauffage mais par stimulation optique. L'avantage de cette technique est que seule une faible partie des charges piégées est libérée. Un dosimètre peut être ainsi relu de nombreuses fois avant d'avoir une perte significative d'information. Cette technologie présente également l'avantage d'être peu sensible à la déplétion spontanée des charges au cours du temps (fading). L'application de l'OSL pour la dosimétrie a été récemment passée en revue <sup>(3)</sup>.

Récemment un nouveau matériau dénommé OSLN a été développé. Ce dernier peut être utilisé pour les détecteurs des badges InLight<sup>®</sup> permettant ainsi une lecture de la dose neutron. Ce nouveau dosimètre neutron albedo InLight a été récemment décrit par C. Passmore<sup>(4)</sup>.

### Design du dosimètre albedo

Le nouveau dosimètre albedo inclut un détecteur comportant un matériau appelé l'OSLN. L'OSLN se compose du matériau OSL standard (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : C) utilisé par LANDAUER enduit de <sup>6</sup>LiCO<sub>3</sub>.

La réponse neutron est induite dans l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : C par le <sup>6</sup>Li qui absorbe un neutron et produit du tritium (<sup>3</sup>H) et des particules alpha (<sup>4</sup>He) [4] :

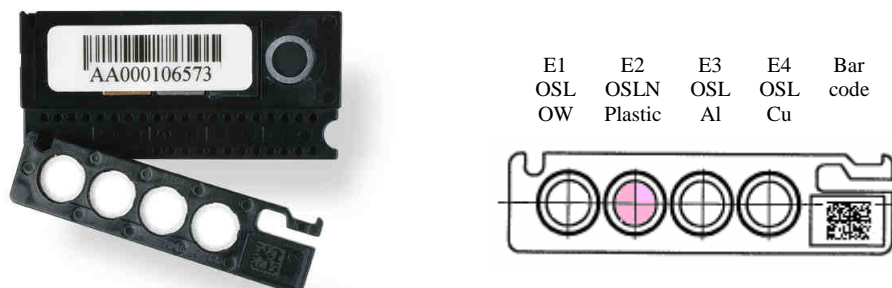


Les particules d'alpha et de tritium transfèrent leur énergie par des interactions coulombienne. Le processus de lecture est exactement le même que pour les dosimètres OSL.

La conception du dosimètre albedo proposé<sup>(4)</sup> est basée sur le dosimètre standard InLight<sup>®</sup> développé par LANDAUER – dosimètre adopté et approuvé pour l'usage en France<sup>(5)</sup> et un certain nombre d'autres pays dont les Etats-Unis, le Canada, la Corée du Sud, l'Australie, le Japon, la Chine, le Brésil...

Le badge se compose d'un support comportant quatre éléments de détection contenus dans un boîtier comportant quatre filtres (cf. figure 5). Le dosimètre neutron albedo est modifié par le remplacement d'un détecteur standard d'OSL par un d'OSLN comme deuxième élément du support (couvert par un filtre en plastique) suivant les indications de la figure 5.

**Figure 5: le dosimètre albedo OSLN**



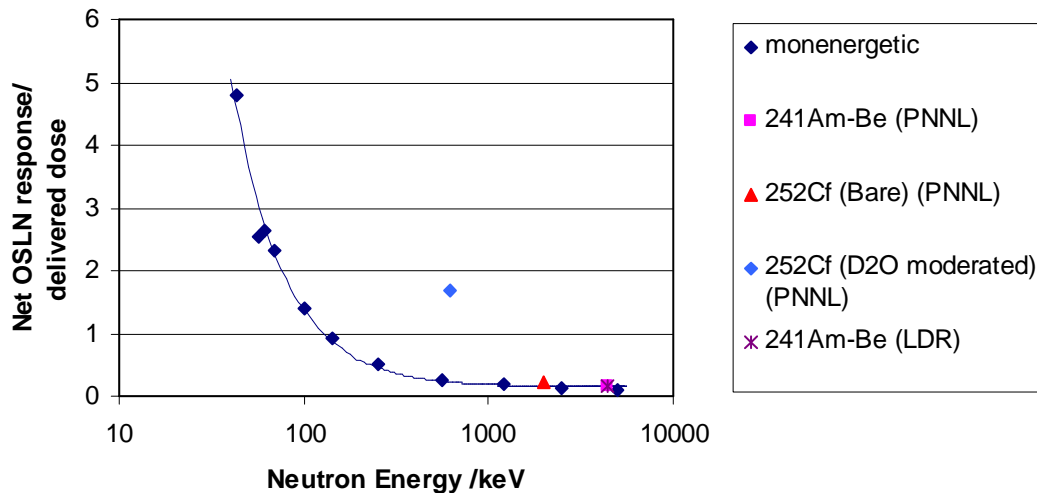
Ce nouveau type de dosimètre a commencé à être testé par LANDAUER. Ces tests incluent la réponse à l'exposition au photon et au neutron du matériel d'OSLN. D'autres essais portant la linéarité et le « fading » sont en cours.

### Réponse en énergie du dosimètre neutron albédo OSL

La réponse des dosimètres neutron albédo OSL dépend de l'énergie des neutrons. Cette variation a été caractérisée pour le nouveau dosimètre OSLN développé par LANDAUER

Les dosimètres ont été irradiés au NPL sur un fantôme ICRU à l'incidence normale et aux neutrons d'énergies de 40 keV à 5 MeV. D'autres dosimètres ont été irradiés avec une source de  $^{252}\text{Cf}$  nue et modérée et avec une source de  $^{241}\text{Am-Be}$  au Pacific Northwest National Laboratory (PNNL).

Figure 6: Réponse en énergie des dosimètres neutron albédo OSLN



Les facteurs de correction des neutrons doivent être déterminés pour chaque champ dans lequel le dosimètre d'albédo est utilisé.

La réponse à  $^{252}\text{Cf}$  modéré par du  $\text{D}_2\text{O}$  est sensiblement haute. Cependant, elle n'est pas inhabituelle comparée aux autres dosimètres albédo.

D'avantage d'essais pratiques ont été conduits à la centrale nucléaire de Callaway, un réacteur à eau pressurisé. Des dosimètres ont été placés sur un fantôme à divers endroits dans des enceintes de confinement du réacteur. La dose neutron a été déterminée en utilisant des CR-39 et des dosimètres OSLN. Des facteurs de conversion de 1,5 ont été estimés par rapport à la réponse des CR-39 calibré pour une source de  $^{241}\text{Am-Be}$ .

### 4. CONCLUSION

LCIE LANDAUER a apporté des améliorations notables à ses services de dosimétrie neutrons fournis depuis Fontenay-aux-Roses. Celles-ci sont réalisées par la mise en place d'un nouveau système de comptage automatique. Celui-ci présentera plusieurs avantages par rapport à une lecture humaine :

- la réduction de la dépendance de facteurs humains dans l'estimation des doses,
- l'amélioration des performances dosimétriques (limite de dose, incertitude de mesure,...),
- l'ajout d'une analyse morphologique des traces.

D'autres innovations sont en cours de développement dont le dosimètre neutron albédo conçu autour de notre dosimètre OSL standard, InLight. Les caractéristiques de ce nouveau dosimètre ont été évaluées et sont comparables aux autres dosimètres neutron albédo disponibles sur le marché.

Le dosimètre neutron albédo de LANDAUER inclura les avantages de la lecture optiquement stimulée notamment la lecture rapide du dosimètre et ses possibilités de relecture. Ce nouveau dosimètre devrait être entièrement testé et approuvé dans un délai de deux ans.

## REFERENCES

1. ISO 21909:2005 *Passive personal doseimeters – performance and test requirements*. First edition 2005-06-15.
2. Perks, C.A. *Mixed radiation field dosimetry with thermoluminescence materials applied to personal dosimetry*. In *Techniques and Management of Personnel Thermoluminescence Dosimetry Services* pp 161 – 201 Oberhofer, M and Scharmann (Eds).
3. Botter-Jensen, L., McKeever, S.W.S. and Wintle, A.G., *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry*. Published by Elsevier (2003).
4. Passmore, C.N., *OSL albedo neutron dosimeter*. Presented at 27<sup>th</sup> International Dosimetry and Records symposium, 2008.
5. Perks, C.A. Le Roy, G. and Prugnaud, B. *Introduction of the InLight Monitoring Service*. *Radiation Protection Dosimetry* **125** (1-4): 220 -223, (2007).