
**Essais non destructifs — Essai de
neutronographie thermique — Principes
généraux et règles de base**

*Non-destructive testing — Thermal neutron radiographic testing — General
principles and basic rules*

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 11537:1998](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b99c692b-af93-424f-8293-0f4ae18ed22a/iso-11537-1998)

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b99c692b-af93-424f-8293-
0f4ae18ed22a/iso-11537-1998](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b99c692b-af93-424f-8293-0f4ae18ed22a/iso-11537-1998)



Sommaire

	Page
1	Domaine d'application..... 1
2	Documentation..... 1
3	Méthode de radiographie aux neutrons (neutronographie)..... 1
4	Installation..... 3
5	Sources de neutrons 3
6	Collimateurs de neutrons..... 4
7	Méthodes d'imagerie et écrans de conversion 7
8	Film 8
9	Cassettes..... 8
10	Applications de la neutronographie..... 9
11	Amélioration du contraste..... 10
12	Indicateurs de qualité d'image..... 10
13	Activation des neutrons 10
Annexe A (informative)	Glossaire des termes relatifs à la neutronographie..... 12
Annexe B (informative)	Coefficients d'atténuation linéaire des neutrons thermiques et sections moyennes de dispersion et d'absorption thermique pour les divers éléments naturels 14
Annexe C (informative)	Bibliographie..... 17

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comité membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 11537 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 135, *Essais non destructifs*, sous-comité SC 5, *Moyens utilisant les rayonnements*.

Les annexes A, B et C de la présente Norme internationale sont données uniquement à titre d'information.

ISO 11537:1998

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b99c692b-af93-424f-8293-0f4ae18ed22a/iso-11537-1998>

Introduction

La présente Norme internationale est destinée à servir de guide pour la production de neutronogrammes de caractéristiques de qualité cohérentes et à aider l'utilisateur pour déterminer l'aptitude à l'emploi du contrôle radiographique aux neutrons thermiques pour une application particulière.

Les pratiques recommandées sont indiquées sans discussion détaillée de leurs avantages et inconvénients techniques.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 11537:1998](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b99c692b-af93-424f-8293-0f4ae18ed22a/iso-11537-1998)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b99c692b-af93-424f-8293-0f4ae18ed22a/iso-11537-1998>

Essais non destructifs — Essai de neutronographie thermique — Principes généraux et règles de base

Protection contre les rayonnements — Avertissement sanitaire

L'exposition d'une partie quelconque du corps humain aux neutrons, aux rayons X ou aux rayons gamma peut être dangereuse pour la santé. Il est donc essentiel, en cas d'utilisation de matériels de neutronographie ou de sources radioactives, de prendre les précautions nécessaires pour protéger l'opérateur et les autres personnes se situant au voisinage.

Les limites de seuil de sécurité d'exposition aux neutrons ou aux rayons X ou gamma, ainsi que les pratiques recommandées de protection contre les rayonnements sont celles qui sont en vigueur dans les différents pays. S'il n'existe dans un pays aucune réglementation ou recommandation officielle, il conviendra de respecter les plus récentes Recommandations de la Commission internationale sur la Protection contre les Rayonnements.

ISO 11537:1998

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b99c692b-af93-424f-8293-0f4ae18ed22a/iso-11537-1998>

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie les pratiques et conditions de base à respecter pour détecter les défauts des matériaux ou des composants par la radiographie aux neutrons thermiques. Elle traite des techniques ayant recours à des films photosensibles comme moyens d'enregistrements. Il est toutefois un fait reconnu que d'autres méthodes d'imagerie existent qui pourront se répandre largement à l'avenir. Le domaine d'application couvre la production des neutrons et les méthodes de collimation, le choix de l'écran convertisseur, le film radiographique, les techniques de contrôle radiographique aux neutrons et le type de matériaux à contrôler. Cette technique est généralement applicable à des combinaisons de matériaux, des modes opératoires et des méthodes spécifiques.

2 Documentation

Un glossaire des termes relatifs à la radiographie aux neutrons est présenté dans l'annexe A. L'atténuation des neutrons dans la matière est présentée dans l'annexe B.

3 Méthode de radiographie aux neutrons (neutronographie)

La radiographie aux neutrons (neutronographie) et la radiographie aux rayons X présentent des caractéristiques communes mais, appliquées au même objet, donnent des résultats différents. Les neutrons remplacent les rayons X comme faisceau de rayons pénétrants dont un objet module l'intensité, ce qui donne une image radiographique des caractéristiques de cet objet. Les

caractéristiques d'absorption des matériaux différent très fortement selon qu'il s'agit de neutrons ou de rayons X, les deux techniques tendent généralement à se compléter. La mesure de leur différence est le coefficient d'atténuation présenté à la figure 1 en fonction du numéro atomique.

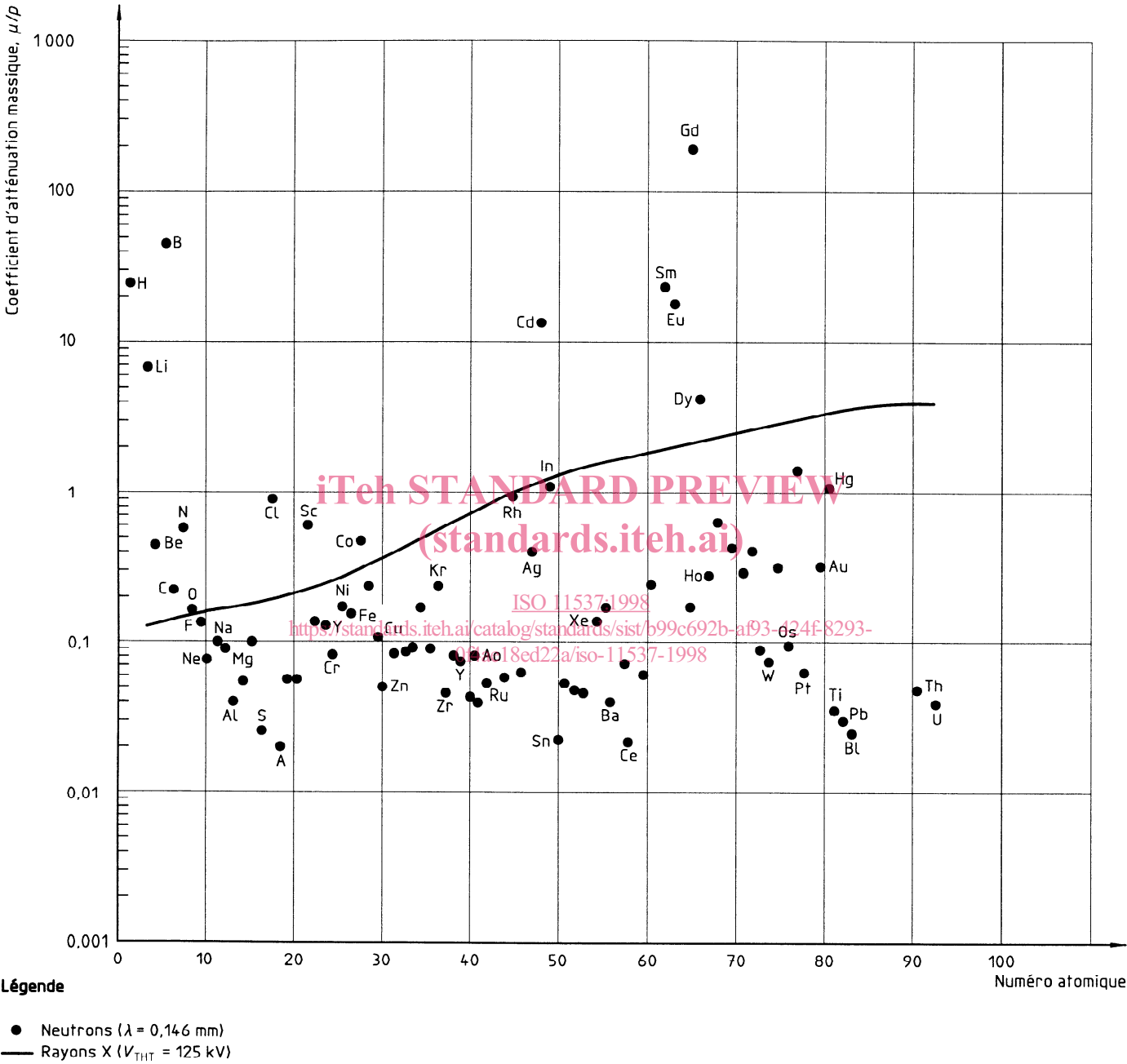
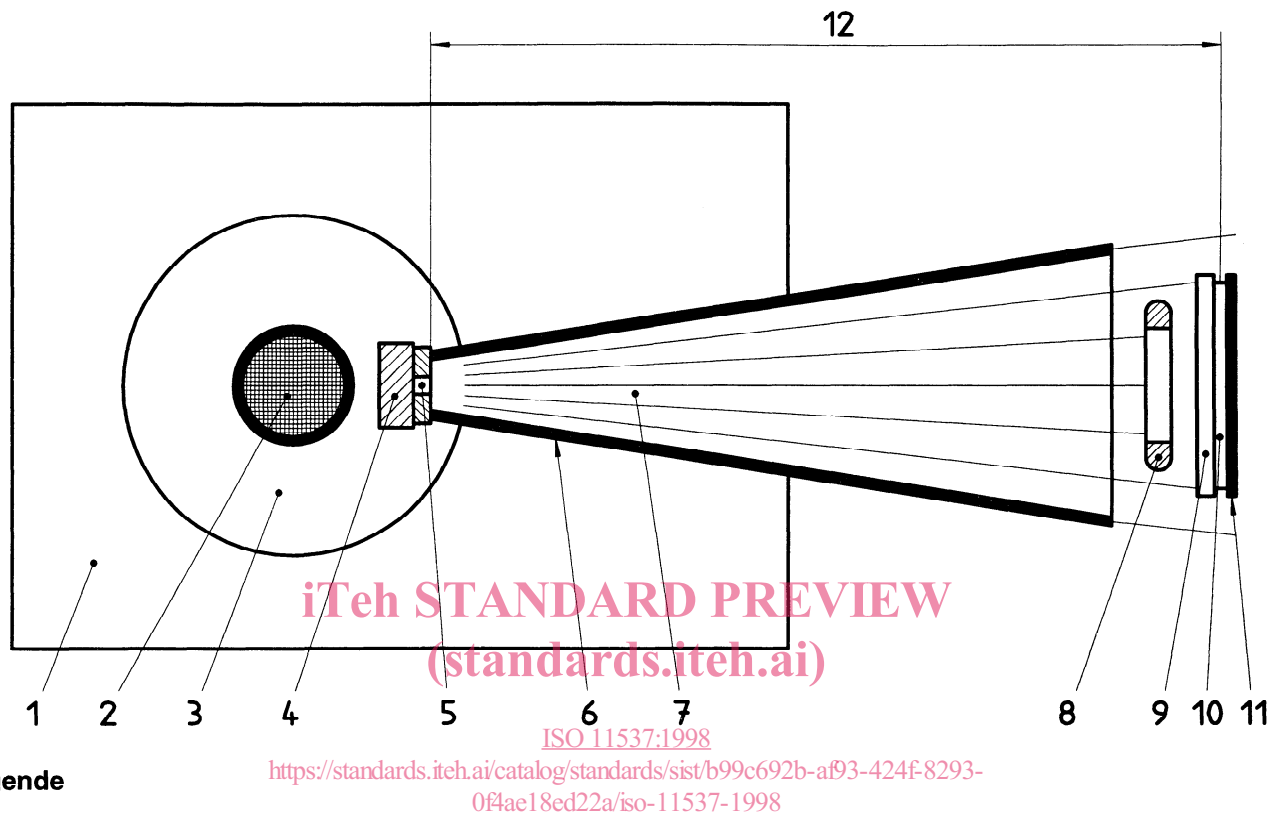


Figure 1 — Comparaison des coefficients d'atténuation massique pour les neutrons thermiques et les rayons X

4 Installation

Une installation type de neutronographie comprend une source de neutrons thermiques, un collimateur du faisceau de neutrons, un écran convertisseur, un film et une cassette d'exposition. Un schéma d'installation neutronographique représentative est donné à la figure 2.



Légende

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1 Blindage | 7 Faisceau de neutrons divergents |
| 2 Source de neutrons | 8 Objet |
| 3 Modérateur | 9 Film |
| 4 Filtre gamma | 10 Émulsion |
| 5 Ouverture, diamètre (D) | 11 Écran de conversion |
| 6 Collimateur | 12 Longueur (L) |

Figure 2 — Installation type de neutronographie avec collimateur divergent

5 Sources de neutrons

Les sources de neutrons utilisables en neutronographie peuvent se classer en trois catégories générales:

- les isotopes radioactifs;
- les tubes scellés et les accélérateurs de particules;
- les réacteurs nucléaires.

Chacune de ces sources produit des neutrons à forte énergie qui exigent une modération (un ralentissement) jusqu'aux énergies thermiques. À cette fin, on entoure la source de neutrons d'un matériau modérateur: béryllium, graphite, eau, huile, plastique ou autre.

5.1 Sources isotopiques

Les sources isotopiques ont l'avantage d'être de petite taille et portables mais leur production relativement faible de neutrons exige une exposition de longue durée pour obtenir une qualité radiographique donnée. De nombreuses sources isotopiques sont utilisées pour la neutronographie; les plus courantes sont indiquées au tableau 1. Le californium (^{252}Cf) est l'une des sources isotopiques les plus communément utilisées pour la neutronographie en raison de sa faible énergie neutronique et de sa petite taille, lesquelles permettent une modération efficace et une forte production en neutrons.

Tableau 1 — Sources radioactives pour la neutrographie

Sources	Réaction	Période	Remarques
^{241}Am - ^{242}Cm -Be	(α, n)	163 jours	Fort rendement en neutrons mais courte période
^{241}Am -Be	(α, n)	458 ans	Facile blindage γ , très longue période
^{210}Po -Be	(α, n)	138 jours	Faible bruit de fond γ , courte période
^{124}Sb -Be	(γ, n)	60 jours	Fort bruit de fond γ , courte période, fort rendement en neutrons — Modération facile
^{252}Cf	fission spontanée	2,65 ans	Petite taille — Fort rendement en neutrons, longue période, et modération facile des énergies neutroniques en font une source portable intéressante

5.2 Sources utilisant un accélérateur

ISO 11537:1998

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b99c692b-af93-424f-8293-614ac19c123a/iso-11537-1998>

Comme sources de neutrons pour la neutronographie on emploie des accélérateurs à basse tension utilisant la réaction $^3\text{H}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$, des machines à rayons X à forte énergie utilisant la réaction (x, n) , des accélérateurs de Van de Graaf et des cyclotrons utilisant les réactions entre neutrons et particules chargées. Les cibles de ces accélérateurs sont entourées de matériaux modérant l'énergie des neutrons jusqu'aux niveaux thermiques. Le flux de neutrons thermiques des sources d'accélérateurs avant collimation peut atteindre 10^9 neutrons/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$).

5.3 Réacteurs nucléaires

Les réacteurs nucléaires sont les sources préférées en neutronographie en raison de leur forte production neutronique. Cette forte intensité permet d'avoir un faisceau soigneusement collimaté qui donne des radiogrammes à résolution élevée sur des temps de pose relativement courts. Parmi les inconvénients de l'usage de réacteurs nucléaires pour la neutronographie, on peut citer le coût élevé d'installation et de fonctionnement, l'absence de portabilité et la rigueur d'une réglementation stricte et complexe.

6 Collimateurs de neutrons

La source émet les neutrons dans toutes les directions et ceux-ci sont de plus dispersés au hasard par le modérateur. Il faut collimater les neutrons thermiques en faisceau pour obtenir des clichés neutronographiques de bonne qualité. Une résolution radiographique optimale sera obtenue par la combinaison d'un faisceau de neutrons thermiques convenablement collimaté et la possibilité de placer l'objet à contrôler près du système détecteur.

6.1 Considérations générales sur la conception du collimateur

Les collimateurs de neutrons sont constitués de matériaux présentant une forte absorption neutronique comme le bore ou le cadmium. Les matériaux doivent être mis en œuvre pour privilégier la propagation directe des neutrons depuis la source jusqu'au système détecteur et éviter le retour de neutrons diffusés dans le faisceau. C'est souvent une combinaison de matériaux que l'on utilise pour obtenir la meilleure collimation des neutrons et pour éviter les rayonnements secondaires indésirables du faisceau. Il est quelquefois nécessaire d'utiliser des matériaux, du type carbonate de lithium, qui n'entraînent pas de production de rayonnement secondaire parasite voilant le film au cours de la capture des neutrons. Les matériaux émettant pendant la capture des neutrons des rayonnements qui peuvent voiler le film, ne sont pas à utiliser sans discernement à proximité du système d'imagerie. Comme exemples de cette dernière classe de matériaux, on peut citer l'indium, le dysprosium et le cadmium. Le voile du film peut également résulter du rayonnement gamma de 470 keV que produit la capture des neutrons dans le bore.

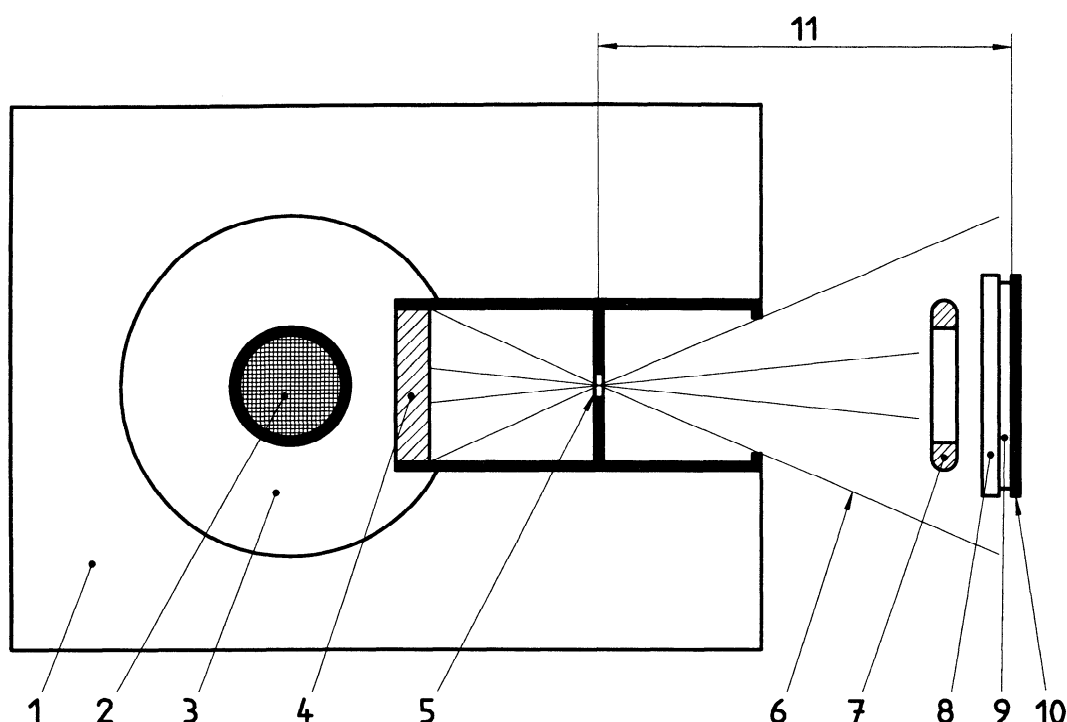
La résolution spatiale d'un système de radiographie aux neutrons dépend de la longueur (L) du collimateur et du diamètre ou de la plus grande dimension de l'ouverture d'entrée (D) et de la forme d'ouverture. On utilise généralement le rapport L/D pour décrire la collimation effective d'un système. Ainsi, si le rapport L/D atteint plusieurs centaines, on peut attendre du système qu'il produise des radiogrammes de définition supérieure à celle que donne un système ayant un rapport L/D de 10. Bien que ce rapport L/D soit une mesure importante des capacités du système, il est évident que la qualité radiographie ultime dépendra aussi d'autres facteurs tels que la taille de l'objet ou ses caractéristiques de diffusion. En plus de la valeur L/D , la valeur L est importante. Du fait que la valeur L est finie, un intervalle (l) entre l'objet et l'équipement d'énergie donne un flou de l'image décrit par un facteur d'amplification $L/(L - l)$.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

6.2 Types de collimateurs

Alors que de nombreux modèles différents de collimateur ont pu être utilisés sur le plan expérimental, peu ont survécu dans les applications commerciales de la neutronographie. Le besoin de radiographier des objets relativement grands a conduit à utiliser très largement le modèle de collimateur divergent représenté à la figure 2. Ce collimateur se compose d'un tube conique en matériau absorbant les neutrons, dont la petite extrémité (ouverture d'entrée) est placée à l'endroit où le flux thermique atteint son maximum dans le modérateur.

Un autre type de collimateur à noter est la collimateur à sténopé représenté à la figure 3. Les systèmes utilisant ce type de collimateur peuvent produire des radiographies à haute définition. Le sténopé est fabriqué dans un matériel tel que cadmium, gadolinium ou bore qui ont un très fort pouvoir d'atténuation des neutrons thermiques.



Légende

- | | | | |
|---|--|----|---------------------|
| 1 | Blindage | 7 | Objet |
| 2 | Source de neutrons | 8 | Film |
| 3 | Modérateur | 9 | Émulsion |
| 4 | Filtre gamma | 10 | Écran convertisseur |
| 5 | Ouverture du sténopé, diamètre (D) | 11 | Longueur (L) |
| 6 | Faisceau de neutrons divergents | | |

Figure 3 — Installation type de neutronographie avec collimateur à sténopé

6.3 Filtres de faisceau

Il est souvent souhaitable de minimiser le rayonnement gamma qui pollue le faisceau de neutrons. Ce rayonnement provient de la source de neutrons et peut voiler le film et réduire le contraste de l'image. Des filtres en plomb ou en bismuth peuvent être installés près de l'entrée du collimateur pour réduire ce rayonnement gamma indésirable dans le faisceau. Si l'on utilise un filtre en bismuth, il est conseillé de l'envelopper dans une gaine en aluminium étanche pour empêcher la pollution alpha, due au ^{210}Po produit par la réaction de capture des neutrons dans ^{209}Bi , de se répandre.

6.4 Diffusion des neutrons

Le rayonnement rétrodiffusé par les murs ou l'appareillage peut être réduit en ajustant la forme du faisceau de neutrons à la surface utile de la zone d'exposition, en utilisant des matériaux absorbant les neutrons et des protections gamma judicieusement choisies. Le rayonnement rétrodiffusé peut se détecter en plaçant un marqueur en matériau absorbant les neutrons du type gadolinium et un marqueur en matériau de protection contre les rayons gamma du type plomb, sur le dos de la cassette pendant l'exposition aux neutrons. Si le rayonnement rétrodiffusé pose un problème, l'un des marqueurs ou les deux apparaîtront sur le film. S'il y a rétrodiffusion, il faudra réduire le plus possible les matériaux émettant ou diffusant les rayonnements dans la zone d'exposition (voir 7.1). Du gadolinium ou tout autre absorbeur convenable de neutrons peut être placé derrière le détecteur pour réduire efficacement l'influence des neutrons rétrodiffusés sur l'image.

7 Méthodes d'imagerie et écrans de conversion

Les neutrons, comme leur nom l'indique, ne transportent aucune charge électrique et sont donc non ionisants et sans beaucoup d'effet sur le film. Pour obtenir une image radiographique des neutrons sur le film, il est nécessaire d'employer un écran convertisseur qui, en capturant les neutrons, émettra un rayonnement ionisant ou de la lumière susceptible d'exposer le film comme l'indique la figure 2. Il est important que l'écran convertisseur soit en contact intime avec le film pour produire la meilleure qualité de radiogramme. Les écrans convertisseurs étant coûteux et représentant un investissement de taille, on veillera à les stocker dans un environnement les protégeant des détériorations physiques et de la corrosion. L'entreposage d'écrans au dysprosium sous vide réduira la corrosion atmosphérique et allongera notablement leur durée de vie utile.

7.1 Méthode d'exposition directe

Dans la méthode d'exposition directe, le film et l'écran convertisseur sont placés dans une cassette étanche à la lumière et exposés au faisceau de neutrons. Le film est exposé par les électrons émis par l'écran convertisseur quand il capture les neutrons. Les écrans en gadolinium sont préférables pour la majorité des applications et sont disponibles sous la forme soit d'une couche de gadolinium, soit revêtue de saphir, déposée par évaporation sous vide sur un substrat d'aluminium. Sous l'effet de l'interaction avec les neutrons, le gadolinium émet un électron de 70 keV.

Le second type d'écran convertisseur est l'écran fluorescent à émission de lumière du type oxysulfure de gadolinium ($Gd_2O_2S:Gd_6$) ou fluorure de lithium/sulfure de zinc (${}^6LiF/ZnS$). Il est recommandé d'adapter les réponses spectrales d'émission de l'écran et du film pour obtenir des résultats optimaux.

La méthode d'exposition directe avec écrans au gadolinium métallique donne une résolution élevée et un contact excellent, et elle est devenue la référence à laquelle on compare les autres techniques neutronographiques. Cette méthode ne peut toutefois pas être utilisée si le faisceau de neutrons renferme un fort rayonnement gamma ou si l'objet est fortement radioactif.

D'autres méthodes d'exposition directe sont utilisées mais elles sortent du domaine d'application de la présente Norme internationale.

7.2 Méthode d'exposition indirecte

La méthode d'exposition indirecte est presque exclusivement utilisée pour le contrôle radiographique des objets radioactifs. Cette méthode est insensible au rayonnement gamma et utilise des écrans convertisseurs sans film qui deviennent temporairement radioactifs lorsqu'ils sont exposés au faisceau de neutrons. L'image est obtenue en plaçant la feuille activée avec le film dans une cassette ou autre dispositif étanche à la lumière une fois l'exposition aux neutrons terminée. Les particules bêta émises par le processus de décroissance dans les feuilles activées sensibilisent le film qui peut ensuite être développé. Le dysprosium, l'indium, le rhodium et l'or sont tous adaptés à la fabrication d'écrans convertisseurs indirects, le dysprosium et l'indium convenant mieux pour la plupart des applications et le dysprosium étant celui qui a la plus grande sensibilité. Les matériaux tels l'or sont moins souhaitables pour la neutronographie en production industrielle en raison de leur période relativement longue (2,7 jours) qui entraîne des temps d'exposition et de décroissance inacceptables.

Les écrans convertisseurs indirects sont à exposer pendant une durée n'excédant par trois fois la période radioactive du matériau utilisé. Une irradiation plus longue n'apporte aucun bénéfice dans la mesure où la vitesse d'activation et la vitesse de décroissance sont quasi les mêmes à ce point. Trois ou quatre fois la période représente également une durée suffisante pour transférer l'image de la feuille activée au film bien qu'il faille parfois assurer le contact pendant toute une nuit pour plus de commodité. Il est possible, si on le désire, d'utiliser des écrans renforceurs de l'image radiographique pour accélérer le transfert. Les écrans convertisseurs indirects peuvent être réutilisés en toute sécurité sans