

LA MODÉLISATION D'UN FILM RADIOGRAPHIQUE SELON LA NORME EUROPÉENNE EN584 *RADIOGRAPHIC FILM MODELLING ACCORDING TO EN584*

A. Schumm - EDF R&D – 1 avenue du Général de Gaulle – 92141 Clamart
Tél. 01 47 65 49 44 – Fax. 01 47 65 34 99
E-mail : andreas.schumm@edf.fr

U. Zscherpel - BAM – Unter den Eichen 87 – D-12044 Berlin
E-mail : uwez@bam.de

Résumé

La dernière étape lors d'une modélisation d'un contrôle radiographique fait intervenir le film et consiste à calculer la densité optique correspondant à l'énergie déposée par le rayonnement incident. Cette conversion dépend d'un grand nombre de paramètres influents, dont la prise en compte complète mène à des modèles complexes, qui requièrent des données d'entrée difficilement disponibles pour décrire le film.

La norme EN584 concernant la classification des films pour la radiographie industrielle propose une description pragmatique et souvent suffisante en terme de dose requise pour obtenir une densité optique de 2, et de gradient de densité optique/dose aux densités optiques de 2 et 4. D'autre part, la classification selon EN584 nécessite une mesure de la granularité du film à la densité optique 2, qui permet de déterminer le rapport entre gradient et granularité.

Nous présentons l'utilisation de ce modèle de film dans la simulation d'une radiographie. A partir de k_s et G2, un modèle quadratique peut être dérivé qui représente avec une précision suffisante les non-linéarités éventuelles des films argentiques. Un modèle d'ordre 3 peut également être dérivé en utilisant le gradient G4, mais apporte peu par rapport au modèle d'ordre 2.

Le modèle EN584 néglige l'énergie quantique des photons, et est donc strictement valable seulement pour le système d'inspection complet. Le transfert vers d'autres spectres ou des films utilisant des écrans différents nécessite des considérations supplémentaires, qui font partie des travaux en cours.

Introduction

Après la propagation du rayonnement au travers de la pièce, où il subit atténuation et diffusion, la modélisation radiographique nécessite la conversion du rayonnement incident en densité optique, selon la réponse caractéristique du film.

Si cette conversion a lieu au niveau des photons, tel que réalisable avec les méthodes Monte-Carlo, on peut tenir compte de l'énergie et de l'angle d'incidence de chaque photon arrivant sur le film, moyennant un temps de calcul assez important. Une approche alternative est de raisonner en terme d'un spectre incident, négligeant ainsi l'incidence du photon, ou plus simple encore, de traiter le rayonnement incident comme une dose de rayonnement.

En augmentant la complexité du modèle de film, plus d'informations sur le film sont nécessaires : Le modèle Monte-Carlo du code MODERATO d'EDF R&D [1] permet de modéliser l'influence de l'empilement d'écrans et de films du détecteur, mais requiert des

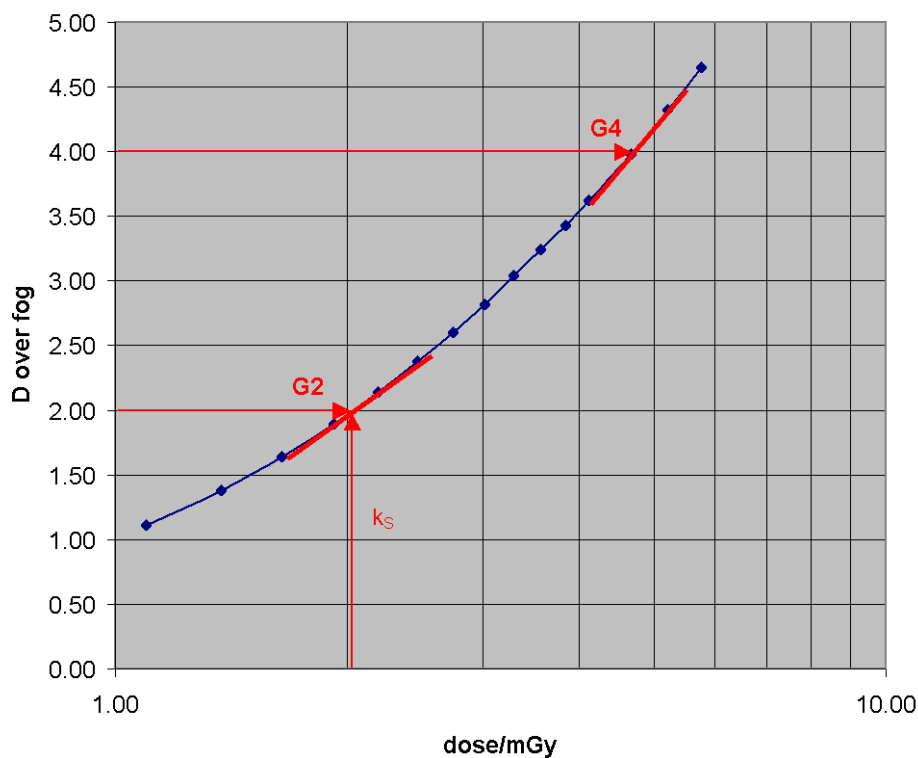
informations tel que le nombre de grains de bromide d'argent par unité volumique du film, et leur diamètre moyen. Pour des raisons évidentes, cette information est rarement publiée par les fabricants des films.

La norme européenne EN584 propose une classification assez pragmatique et bien définie des films radiographique et se prête à un modèle simple et utile pour la simulation numérique.

Le modèle EN584

La norme EN584 [2] n'a pas été conçue pour une utilisation en modélisation numérique, mais pour fournir un dispositif fiable pour la classification des système de films utilisés en radiographie industrielle. Elle décrit un film en terme de dose requise pour obtenir la densité optique de 2, ainsi que de gradient de densité optique par rapport à la dose aux densités optiques 2 et 4. D'autre part, la classification selon EN584 nécessite la mesure de la granularité et la fourniture du rapport entre gradient et granularité, toujours à la densité optique de 2. La norme décrit en détail les conditions dans lesquelles le film doit être exposé, développé et évalué pour obtenir la caractérisation selon EN584. EN584-1 utilise une source de 220kV et un filtre Cu de 8 mm.

Pendant la caractérisation, une courbe de densité en fonction de la dose (D vs. k) est obtenue pour toute la gamma de densités optiques entre 1 et 4.5, pour laquelle la norme stipule au mois 12 échantillons discrets. Les trois valeurs caractéristiques k_s (la dose nécessaire pour obtenir une densité optique de 2), G_2 (gradient à la densité optique 2) et G_4 (gradient à la densité optique 4) sont ensuite extraites de ces mesures, et seulement ces trois valeurs sont publiées dans le certificat, ensemble avec la granularité mesurée à $D=2$ et la valeur calculée du rapport entre gradient et granularité $G/\sigma D$.



characteristic film curve (log. incoming dose vs. optical density) with values k_s , G_2 and G_4

CEN-speed : Un modèle linéaire

L'implémentation la plus simple de la norme EN584 considère le film comme parfaitement linéaire, et dépend seulement de la valeur de rapidité CEN (« CEN-speed ») S . Cette rapidité S est définie en terme de réciproque de la dose k_2 (en Gray) permettant d'obtenir la densité optique de 2 (appelée k_s dans la norme), arrondie à la plus proche des 25 valeurs tabulées. Le terme D_0 correspond au voile du film.

$$D(k) = D_0 + 2Sk \quad \text{avec } S = \frac{1}{k_s}$$

Étant donné que EN584 associe une plage de valeurs k_s à chacune des 25 valeurs tabulées (par exemple, les valeurs de $1/k_s$ entre 91 et 112 correspondent à la CEN-speed 100), un modèle linéaire semble assez bien adapté, si l'on ne dispose pas d'autre information sur le film.

Un modèle d'ordre 2

Une approximation d'ordre 2 peut facilement être dérivée en prenant en compte le gradient G_2 à la densité optique 2. Les valeurs des gradients G_2 et G_4 correspondent à une courbe de D en fonction de $\log_{10}k$.

$$G = \frac{dD}{d \log_{10} k} = \frac{K}{\log_{10} e} \frac{dD}{dk}$$

L'approximation d'ordre 2 de $D(k)$ devient ainsi

$$\begin{aligned} D(k) &= D_0 + 2Sk + ck^2 & \frac{dD}{dk} &= \frac{2}{k_s} + 2ck \\ &= D_0 + \frac{2}{k_s}k + ck^2 \end{aligned}$$

avec

$$c = \frac{G_2 \log e - 2}{2k_s^2}$$

et nécessite seulement la valeur de G_2 .

Un modèle d'ordre 3

En suivant le même formalisme, une approximation d'ordre 3 pour $D(k)$ s'écrit

$$D(k) = D_0 + 2Sk + ck^2 + dk^3 \quad \frac{dD}{dk} = \frac{2}{k_s} + 2ck + 3dk^2$$

et nécessite à la fois G_2 et G_4 ainsi que k_4 pour déterminer les coefficients c et d .

$$G_2 = \frac{k_s}{\log e} \left[\frac{2}{k_s} + 2ck_s + 3dk_s^2 \right]$$

$$G_4 = \frac{k_4}{\log e} \left[\frac{2}{k_s} + 2ck_4 + 3dk_4^2 \right]$$

L'équation pour G_2 permet d'obtenir

$$c = \frac{G_2 \log e - 2 - 3dk_s^3}{2k_s^2}$$

et par substitution

$$d = \frac{G_4 \log e k_s^2 - 2k_4 k_s + 2k_4^2 - k_4^2 G_2 \log e}{3k_s^2 (k_4^3 - k_4^2 k_s)}$$

On note que seul le gradient G_4 est fourni dans la norme EN584, mais pas la dose k_4 pour obtenir la densité optique de 4. Une estimation de k_4 est donc nécessaire.

L'estimation de k_4

On pourrait estimer k_4 directement à partir du modèle d'ordre 2 :

$$\frac{2}{k_s} k_4' + \frac{G_2 \log e - 2}{2k_s^2} k_4^2 = 4 \quad \text{avec} \quad c = \frac{G_2 \log e - 2}{2k_s^2}$$

donnerait ainsi

$$k_4' = \sqrt{\frac{4}{c} + \frac{1}{c^2 k_s^2}} - \frac{1}{ck_s}$$

Cependant, cette approximation aurait tendance à surestimer k_4 pour la plupart des films.

Un meilleur moyen d'obtenir une estimation raisonnable pour k_4 est de déterminer le coefficient d à partir de l'erreur faite par le modèle d'ordre 2 à k_s . Si le modèle d'ordre 2 était exact, $D(k_s)$ donnerait la densité optique 2. Or, on obtient

$$D(k_s) = D_0 + 2Sk_s + ck_s^2$$

Supposant le voile $D_0 = 0$, et avec $S = \frac{1}{k_s}$, on peut réécrire cette expression comme

$$D(k_s) = 2 + ck_s^2$$

pour montrer l'erreur commise à la densité optique de 2.

Si on considère le terme dk_s^3 comme une correction au modèle d'ordre 2, on peut réécrire le modèle d'ordre 3 $D(k_s)$ comme

$$D(k_s) = D_0 + 2Sk_s + ck_s^2 + dk_s^3 = 2$$

Supposons toujours le voile $D_0 = 0$, il suit

$$ck_s^2 + dk_s^3 = 0 \quad \text{ou simplement} \quad d = -\frac{c}{k_s}$$

En utilisant le terme c de notre modèle d'ordre 2, nous disposons maintenant des 4 coefficients d'une équation cubique, qui peut être résolue de manière analytique (La formule de Cardan est bien adaptée, car on est certain d'avoir une seule solution réelle). On obtient l'estimation pour k_4 :

$$\frac{-c}{k_s} k_4^3 + ck_4^2 + \frac{2}{k_s} k_4 - 4 = 0$$

Le tableau ci-dessous compare les estimations de k_4 pour plusieurs films avec leur vraie valeur mesurée. L'erreur paraît grande, mais doit être considérée en vue de son emploi pour déterminer le coefficient d du modèle d'ordre 3. Comme d sera pour la plupart des films un ordre de grandeur plus petit que c, l'impact sur le résultat final sera faible.

| film type | k4' estimation | k4 measured | error |
|-----------|----------------|-------------|-------|
| C3 | 18.5 | 21.0 | 13% |
| C4 | 10.32 | 11.4 | 10% |
| C5 | 7.08 | 8.70 | 23% |
| C6 | 3.87 | 4.62 | 19% |

Estimations pour k_4' pour plusieurs films

Validation

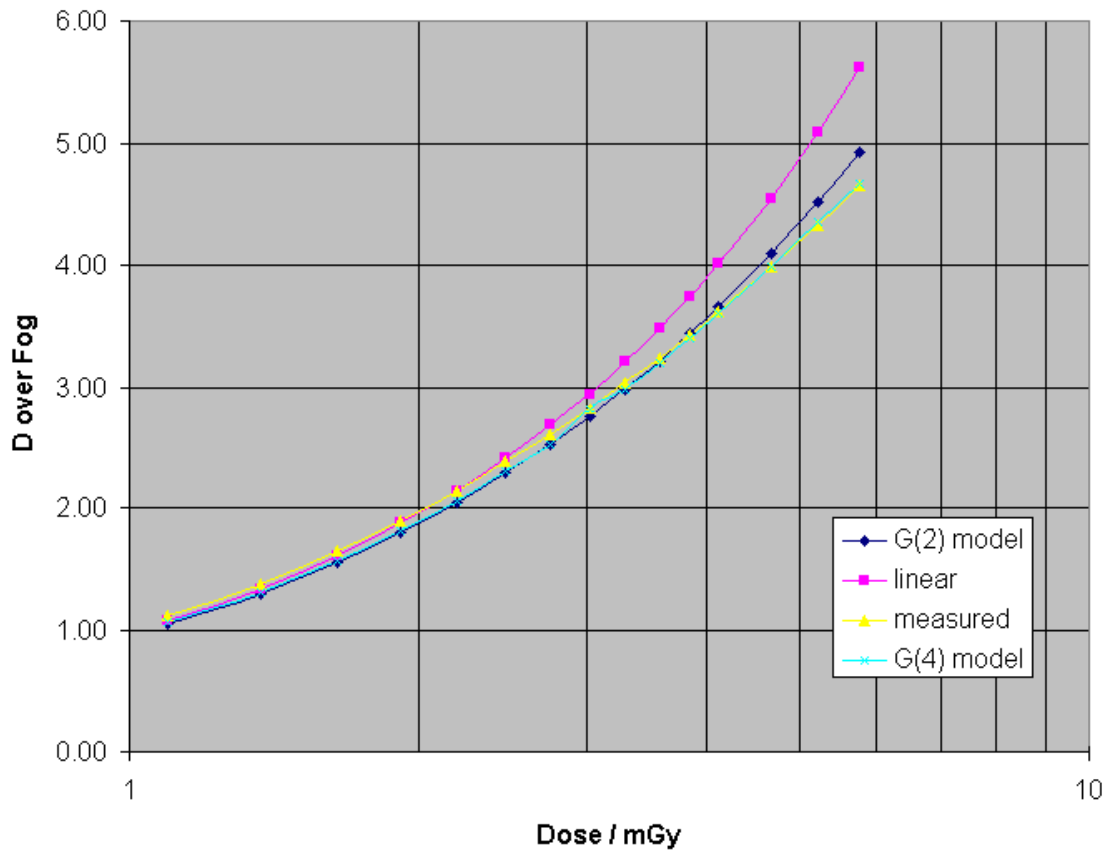
La figure suivante compare les trois modèles présentés avec les valeurs mesurées pour un film de classe C6. Ce film a été choisi parce qu'il présente le comportement le moins linéaire de tous les films comparés, et produit donc l'écart le plus important entre notre modèle et les valeurs mesurées.

Le modèle linéaire est une bonne approximation jusqu'à la densité optique de 2, à partir de laquelle il commence à diverger. C'est à partir de cette densité optique que le film commence à devenir de plus en plus non-linéaire.

L'écart observé à la densité optique 4 pour le modèle d'ordre 2, qui ignore le gradient G_4 , est inférieur à 3%, ce qui est un très bon accord si on considère que la norme EN584 accepte une incertitude de $\pm 5\%$ pour le gradient G_2 et même $\pm 7\%$ pour G_4 . Comme déjà dit dans une publication antérieure [3] ce résultat suggère qu'un modèle plus affiné d'ordre 3 promet peu de valeur ajoutée. Ceci est confirmé par la courbe obtenue pour le modèle d'ordre 3, qui montre une erreur de 0.1% à la densité optique 4, mais des écarts similaires aux densités optiques inférieures. La table résume les écarts observés pour cinq densités optiques différentes.

Il est intéressant de noter que les modèles d'ordre 2 et 3 sont moins bons dans la gamme de faibles densités optiques. Ceci est cependant peu surprenant si on considère que le modèle linéaire est par définition exact à la densité optique 2.

C6 film system class



Comparaison des modèles linéaires, quadratiques et cubiques avec la courbe D(k) mesurée (film catégorie C6)

| OD | Linear | G2 | G4 |
|------|--------|------|------|
| 1.89 | 1.1% | 4.8% | 4.2% |
| 2.38 | 1.2% | 4.2% | 3.8% |
| 2.82 | 4.3% | 2.5% | 0.1% |
| 3.04 | 5.6% | 2.0% | 2.0% |
| 3.43 | 9.3% | 0.1% | 0.1% |

Erreurs des trois modèles observées à différentes densités optiques

EN584 et la granularité

EN584 définit la granularité σ_D du film en terme de mesures de densité optique diffuse sur une zone du film avec densité optique constante de 2, en utilisant un micro-densitomètre d'une ouverture circulaire de 100 μm , et spécifie une procédure de mesure.

Afin de pouvoir utiliser cette valeur de σ_D pour la modélisation numérique, deux corrections s'imposent. D'une part, la valeur $\sigma_{D'}$ pour une ouverture carrée (à cause de la forme carrée des pixels) est obtenue comme

$$\sigma_D' = \sigma_D \sqrt{\frac{\pi * 10000}{4A}}$$

avec A étant l'ouverture carrée en μm^2 . D'autre part, comme la définition de la granularité suppose une densité optique de 2, σ_D doit être mis à l'échelle de la vraie densité optique. La norme EN584 stipule l'approximation que la granularité soit proportionnelle à la racine carrée de D/2. La valeur pour la granularité devient ainsi

$$\sigma_D'' = \sigma_D \sqrt{\frac{\pi * 10000}{4A}} * \sqrt{\frac{D}{2}}$$

Cette valeur peut ensuite être utilisée pour générer un bruit uniforme.

Discussion

La norme EN584 se prête à un modèle de film pragmatique pour la simulation numérique. Nous avons présenté un modèle linéaire ainsi que des modèles d'ordre 2 et 3 pour la conversion de la dose incidente en densité optique. Les résultats suggèrent qu'un simple modèle d'ordre 2 est une approximation suffisante pour les besoins en modélisation, étant donné l'incertitude permise pour les données d'entrée par EN584. Un modèle d'ordre 3 peut être dérivé, mais ses bénéfices ne justifient pas sa complexité. La norme EN485 définit également un modèle simple pour la granularité, qui peut facilement être implémenté dans un code numérique.

D'autres travaux sont nécessaires pour obtenir un modèle complet : La caractérisation selon EN584 néglige l'énergie quantique des photons, et est donc strictement valable seulement pour le système de film entier. La transposition vers d'autres spectres ou d'autres films utilisant des écrans différents nécessite des considérations complémentaires, qui font l'objet de travaux en cours.

Références bibliographiques

- [1] A. Bonin, B. Lavayssière, B. Chalmond, 'MODERATO: a Monte-Carlo Radiographic Simulation ', Proc. Review of Progress in Quantitative NDE, QNDE 99, Montréal, juillet 1999
- [2] EN 584-1:2006, 'Non-destructive testing – Industrial radiographic film – Part 1: Classification of film systems for industrial radiography', Secretariat CEN/TC 138, Mai 2005
- [3] A. Schumm, U. Zscherpel, „Using the EN584-1 film characterization in radiographic modeling”, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, Lyon, juin 2007