

Chapitre VIII: Films photographiques

Films photographiques

- Premiers dosimètres (intégrateurs) à avoir été développés → basés sur les techniques photographiques → dosifilms
- Dosifilms sont peu à peu remplacés par des dosimètres utilisant des technologies plus performantes → arrêt progressif de la production
- Toujours utilisés dans un certain nombre de pays (pas la Belgique) → Afrique
- Dans la suite → uniquement films pour dosimétrie (pas radiodiagnostic)

Propriétés des films photographiques

- Les films photographiques sont des dosimètres relatifs (nécessitant une calibration) → comparaison avec des films étalonnés permettant d'obtenir une dose d'exposition externe
- Les films permettent les mesures de dose dues à des rayons X, des γ , des neutrons et des e^-
- En fonction de leur composition, ils permettent des mesures allant de 50 μGy à 10 Gy

Applications des films photographiques

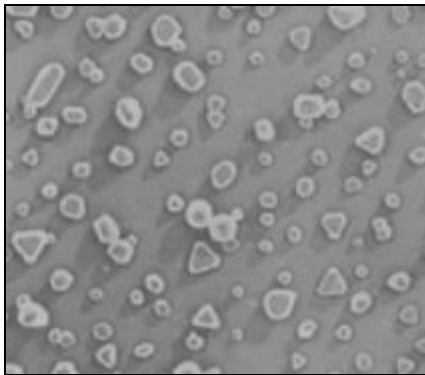
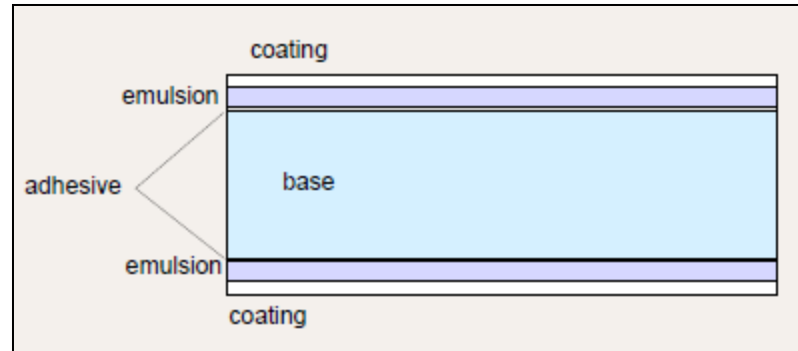
- Dosimétrie qualitative et quantitative
- Contrôle de qualité pour appareillage en radiothérapie (position d'un collimateur, profil de dose dans un fantôme,...)
- Films-badges (portés à la poitrine ou au poignet)



Émulsion Photographique

- L'émulsion consiste en micrograins de bromure d'argent – AgBr – (ou un autre halogénure d'argent) dispersés dans une couche de gélatine (10-20 μm) disposée sur une (ou les deux) face(s) du film
- Les particules chargées incidentes produisent des paires d'ions dans les micrograins \rightarrow conversion d'un certain nombre d'ions Ag^+ du grain (contenant typiquement 10^{10} Ag^+ ions) en atomes Ag \rightarrow un tel petit nombre d'atomes Ag dans un grain constitue une image latente
- Lors du développement (processus chimique), les atomes d'argent à l'état métallique servent de centre pour un processus de multiplication \rightarrow le développeur réduit les ions Ag^+ des grains possédant une image latente en atomes Ag \rightarrow **un** atome d'Ag dans un grain permet la réduction de tous les ions d'Ag du grain
- Le reste de bromure d'argent (non-développé) est nettoyé, laissant une surface avec de microscopiques grains d'argent
- La présence de ces micrograins d'argent peuvent être détectée optiquement et quantitativement relié à la dose absorbée

Schéma d'un film dosimétrique



Micrograins d'AgBr ($0.1-3 \mu\text{m}$)
dans la gélatine

Sensitométrie - Densité optique

- Sensitométrie: étude des surfaces sensibles → discipline technique qui permet de quantifier le noircissement en photographie
- L'effet de l'irradiation est mesuré en terme d'opacité à la lumière du film, déterminée par un densitomètre (instrument sensitométrique permettant de mesurer la densité - le noircissement - de matériaux photographiques)
- L'opacité est définie comme le rapport entre I_0 , l'intensité lumineuse en l'absence de film, et I , l'intensité lumineuse transmise \perp à travers le film
- La densité optique (OD – optical density) est définie comme le logarithme en base 10 de l'opacité

$$OD = \log_{10} (I_0/I)$$

Densité optique \leftrightarrow Fluence \leftrightarrow Dose (1)

- Soit a (cm²/grain), l'aire moyenne opacifiée par un grain d'Ag développé
- Soit n , le nombre de grains développé par cm²
- On pose (en supposant $n \ll N$, le nombre de grains d'AgBr par cm²) \rightarrow

$$\frac{I_0}{I} \cong \exp(an)$$



$$OD = \log_{10} (I_0/I) = an \log_{10} e = 0.4343 \times an$$

Densité optique \leftrightarrow Fluence \leftrightarrow Dose (2)

- 3 hypothèses:
 1. Le rayonnement incident (X, γ, e^-) donne lieu à une fluence électronique \perp au film
 2. Un e^- unique rend un grain développable
 3. Tous les grains ont la même aire projetée, a

- Dans ces conditions \rightarrow

$$\frac{n}{N} \cong a\Phi$$

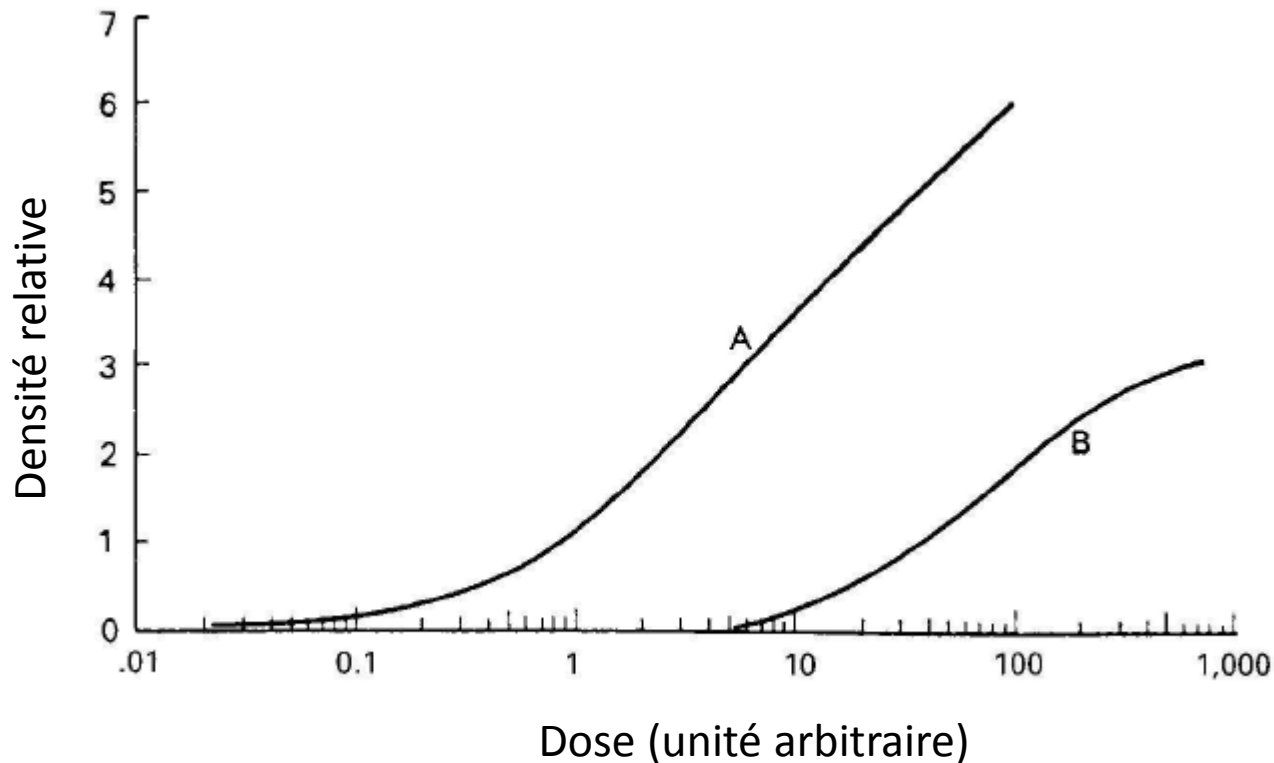


$$OD = 0.4343a^2N\Phi$$

- OD est donc \propto à Φ et donc à D

Exemples de relations entre l'exposition et la densité optique

Par comparaison entre un film soumis à une quantité de rayonnement inconnu et un film soumis à une quantité connue de rayonnements → détermination de la dose



Caractéristiques d'une courbe OD-Dose

- Idéalement → la relation entre OD et dose doit être linéaire
- En pratique → elle peut être linéaire, linéaire pour une gamme de dose ou non-linéaire (dépend du film)
- Pour chaque type de film la courbe OD-Dose doit être établie avant l'utilisation du film
- La courbe OD-Dose est appelée la courbe sensitométrique, la courbe caractéristique ou la courbe H&D (Hurter et Driffield, pionniers de la sensitométrie)

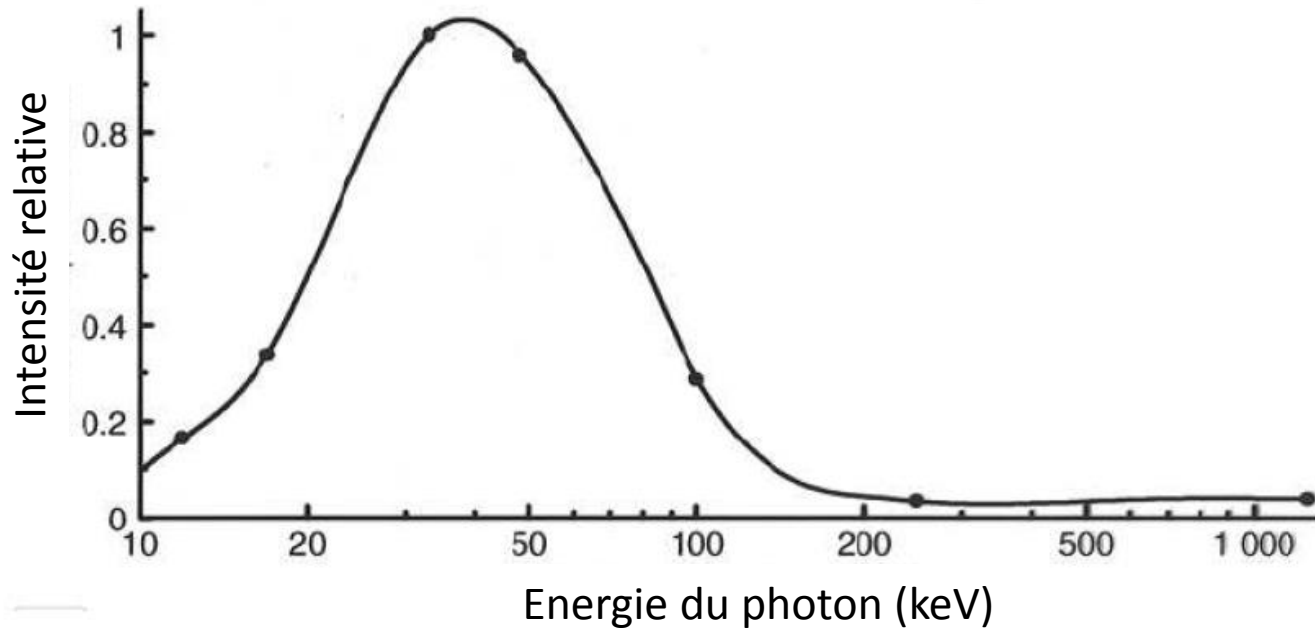
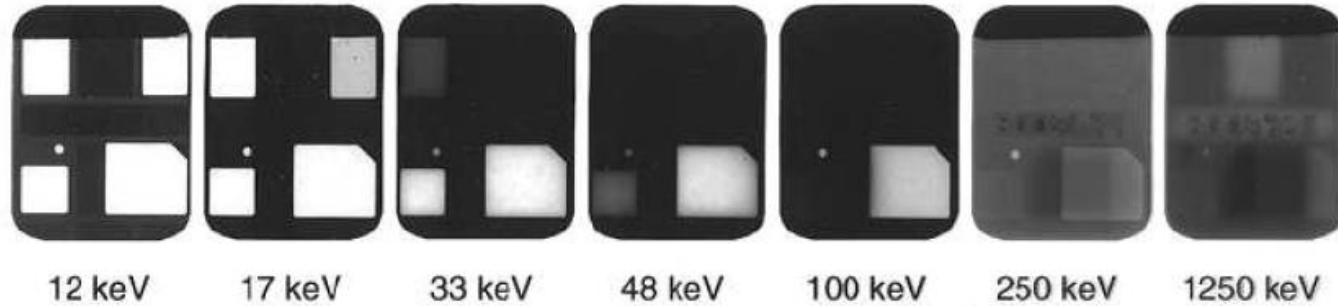
Paramètres d'une courbe H&D

- Gamma: pente de la partie linéaire
- Latitude: échelle de dose pour laquelle la courbe H&D est linéaire
- Brouillard: OD d'un film non-exposé
- Vitesse: exposition nécessaire pour produire $OD = \text{Brouillard} + 1$

Dépendance énergétique pour des rayons X incidents

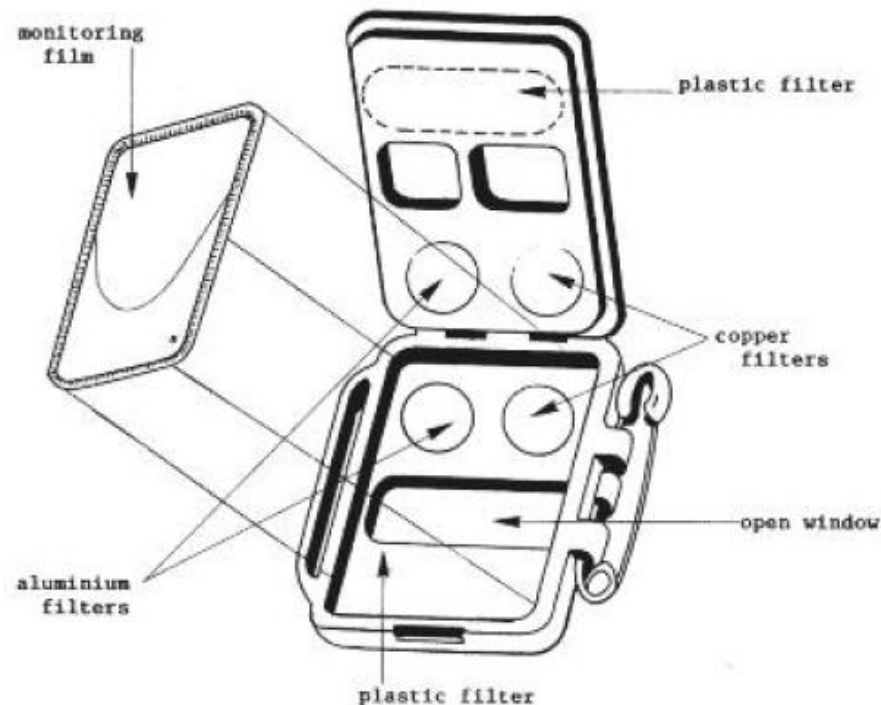
- Les dosifilms ont une très forte dépendance à l'énergie des rayons X incidents pour les petites énergies ($E < 200 \text{ keV}$)
- Cette dépendance énergétique provient de la section efficace de l'effet photoélectrique de l'Ag qui augmente largement plus vite que celle de l'air ou des tissus quand $E < 200 \text{ keV}$
- Une sensibilité maximale est observée à $\approx 30\text{-}40 \text{ keV}$
- En dessous de 30 keV , la sensibilité du film décroît à cause de l'atténuation du rayonnement dans l'enveloppe du film
- Pour des $E < 200 \text{ keV}$ \rightarrow nécessité de calibration précise à la même E que le rayonnement à mesurer

Dépendance énergétique: exemple



Filtres (1)

Le support du film est fait de telle manière que le rayonnement peut atteindre la film directement à travers une ouverture libre ou après le passage à travers un certain nombre de filtres ≠ (Al, Cu, Cd, Sn, Ag, Pb, plastic,...)



Filtres (2)

- Le choix et le design des filtres est déterminé en fonction des rayonnements à mesurer
- L'évaluation de l'exposition est faite en considérant la DO derrière chacun des filtres
- Pour des rayonnements β , un noircissement du film se fait uniquement derrière l'ouverture libre
- On peut estimer la répartition en énergie des photons qui composent la dose reçue en mesurant le noircissement obtenu derrière chaque filtre

Émulsions nucléaires: Neutrons rapides

- Pour des neutrons avec $E > 0.5 \text{ MeV}$ → on utilise des films à trace nucléaire (Eastman Kodak NTA) → couche d'émulsion plus épaisse (qqes μm → $\approx 1\text{mm}$)
- Dans ces films → concentration en hydrogène proche de celle des tissus (→ tissus-équivalent pour les neutrons rapides)
- La collision élastique des neutrons avec les protons met ces derniers en mouvement → dépôt d'énergie dans le film le long de la trajectoire du proton → trace
- On procède au comptage des traces → le nombre de traces par unité de surface du film est \propto à la dose absorbée
- Pour $E < 500 \text{ keV}$ → les traces ne sont pas reconnaissables

Émulsions nucléaires: Neutrons thermiques (1)

- Dans le film, les neutrons thermiques produisent aussi des protons (et donc des traces mesurables) à la suite de leur capture par de l'azote via la réaction $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$
- Cependant \rightarrow concentration d'azote dans le film \ll concentration d'hydrogène \rightarrow peu sensible pour les neutrons thermiques (mais utilisable)
- En pratique \rightarrow champ de neutrons contient des neutrons thermiques et rapides \rightarrow il faut pouvoir mesurer séparément les 2 \rightarrow ajout de 2 filtres (Cd et Sn)
- Le Cd a une sections efficace très élevée pour la réaction $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd} \rightarrow 2500$ barns pour $E_n=0.025$ eV et 7400 barns pour $E_n=0.179$ eV
- A l'opposé la capture de neutron par le Sn est extrêmement faible

Émulsions nucléaires: Neutrons thermiques (2)

- Résultat pour un champ de neutrons thermiques → « grande » densité de traces dans le film derrière le filtre Sn et rien derrière le filtre Cd
- Pour un champ de neutrons rapides → même densité de traces derrière les deux filtres
- De plus → à cause de la réaction (n, γ) dans le Cd → noircissement plus important derrière le Cd que derrière le Sn (en l'absence de neutrons → même noircissement derrière les 2 filtres)
- Finalement → le comptage des traces et l'évaluation du noircissement permet d'obtenir séparément les flux de neutrons thermiques et rapides
- Attention → film non-sensible aux neutrons épithermiques ($0.5 \text{ eV} < E < 1 \text{ MeV}$)

Avantages et inconvénients des dosifilms (1)

Avantages

1. Excellente résolution spatiale 2D → information sur la distribution spatiale de la dose
2. Archivage → la lecture ne perturbe pas le film → enregistrement permanent qui permet une re-lecture (vérification)
3. Largement étudié en laboratoire,...
4. Géométrie flexible
5. Pratiquement linéarité entre OD et dose
6. Indépendant du débit de dose

Avantages et inconvénients des dosifilms (2)

Inconvénients

1. **Très faible sensibilité** → le dosimètre C.B. Kodak ne mesure pas les doses absorbées en dessous de $\approx 200 \mu\text{Gy}$ → avec un débit de dose de $200 \mu\text{Gy/h}$ → 5 heures pour arriver à la dose annuelle maximale admissible de 1mSv
2. Contrôle extrêmement précis du processus de développement → grande expertise nécessaire
3. Grande dépendance énergétique pour les photons
4. Très sensible à l'environnement → T, humidité