

Dosimétrie

PHYS-H-500

Titulaire: N. Pauly

Références

- F.H. Attix, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, Wiley-VCH, 2004
- *Fundamental quantities and units for ionizing radiation (Revised)*. International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report n° 85, Journal of the ICRU 11 (2011) n° 1:
<http://jicru.oxfordjournals.org/content/11/1.toc>
- *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP 37 (2007) 1-332:
<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01466453/37/2-4>
Version en français: http://www.icrp.org/docs/P103_French.pdf

Références (2)

- *Arrêté Royal du 20 juillet 2001* portant règlement général de la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement contre le danger des rayonnements ionisants (Moniteur Belge du 30 août 2001) + modifications:
<http://www.fanc.fgov.be/fr/page/introduction-arretes-royaux/446.aspx>

Organisation du cours

- Théorie: 2 ECTS (50% → Examen écrit) → Slides disponibles sur http://metronu.ulb.ac.be/pauly_cours.html
- Exercices (Assistant: R. Tesse): 1 ECTS (25% → Examen écrit)
- Laboratoires (Organisation: R. Tesse): 1 ECTS (25% → Cahier de rapports)
 - - Erasme (F. De Smedt)
 - Bordet (S. Simon)
 - Isib (I. Gerardy)

Examen janvier 2013 (théorie)

- Relation de Bragg-Grey :
 - Énoncez la relation de Bragg-Grey.
 - Exprimez-la sous forme mathématique (en définissant les termes intervenant dans l'équation).
 - Énoncez les conditions de Bragg-Grey.
 - Commentez ces conditions pour des rayonnements γ , des électrons et des particules chargées lourdes incidents.
- Définissez les notions d'atténuation en faisceau étroit, d'atténuation en faisceau large, de géométrie à faisceau étroit et de géométrie à faisceau large idéale.
- Définissez la notion de réponse à la dose pour un dosimètre thermoluminescent et développez cette notion pour le cas particulier du LiF:Mg,Ti (en expliquant le rôle des impuretés Mg et Ti).
- Dosimétrie par radiophotoluminescence :
 - Définissez la radiophotoluminescence.
 - Expliquez les mécanismes de luminescence pour un verre phosphatique avec impuretés d'Ag.
 - Expliquez l'effet de build-up.

Plan du cours

Partie 1: Bases théoriques

- I. Introduction et rappels
- II. Grandeurs radiométriques et dosimétriques
- III. Configurations géométriques pour des particules non-chargées
- IV. Notions d'équilibre
- V. Théories de la cavité

Partie 2: Dosimétrie expérimentale

- VI. Introduction
- VII. Chambres d'ionisations
- VIII. Films photographiques
- IX. Dosimètres thermoluminescents
- X. Dosimètres à luminescence stimulée optiquement
- XI. Dosimètres électroniques
- XII. Dosimètres chimiques

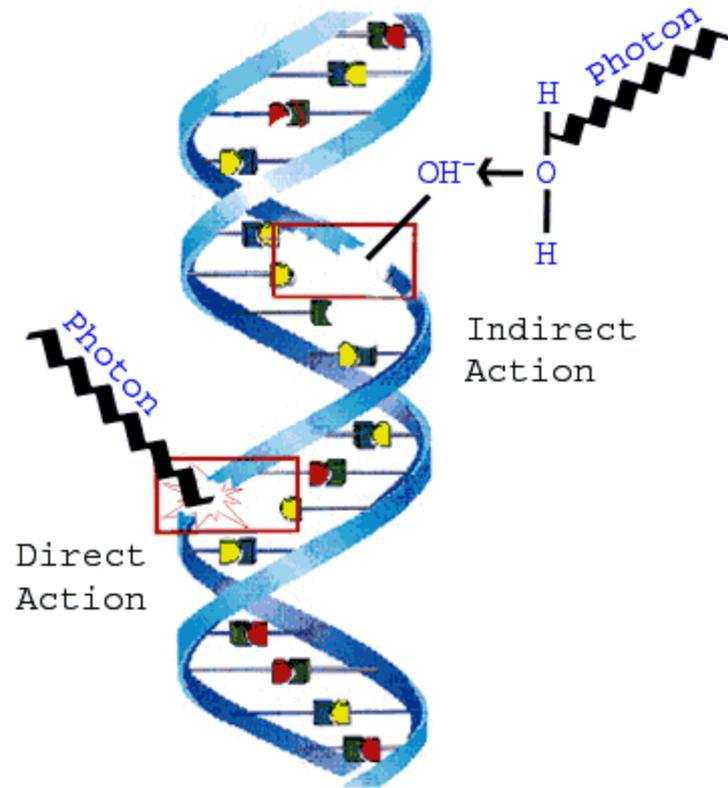
Chapitre I: Introduction et rappels

Définition de la dosimétrie

- **La physique radiologique est la science qui étudie les rayonnements ionisants et leurs interactions avec la matière, en particulier l'énergie qui est absorbée par un organisme ou un objet**
- **La dosimétrie des radiations consiste à déterminer quantitativement cette énergie déposée**

Note: L'énergie typique impliquée en dosimétrie est faible (exemple: dose semi-létale pour une exposition uniforme à un champ de rayons X: 4 Gy → 280 J) → Les effets des rayonnements ionisants s'expliquent parce que l'énergie est délivrée localement à l'échelle moléculaire

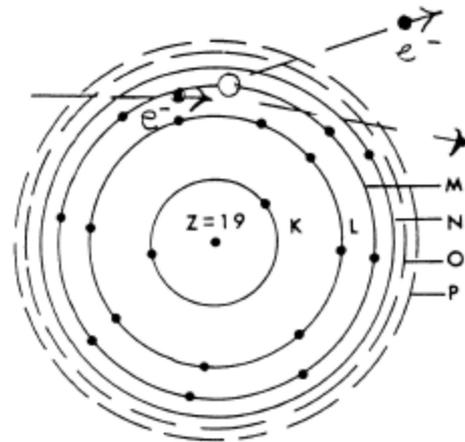
Dommages directs et indirects



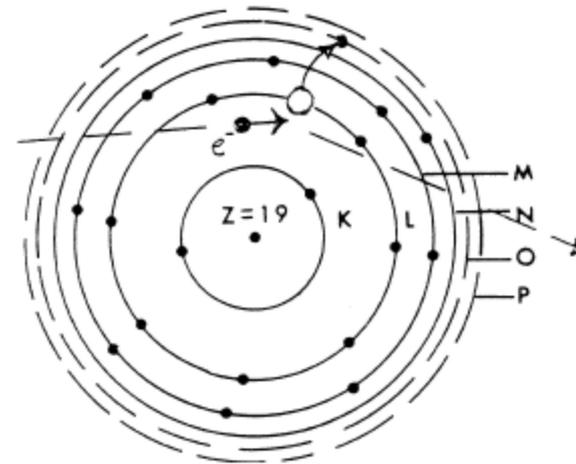
Interactions des rayonnements ionisants avec la matière

Transfert d'énergie particules → matière:

- **Ionisation:** un ou plusieurs e^- sont libérés lors de la collision d'une particule avec un atome ou une molécule
- **Excitation:** Transfert d' e^- vers des états énergétiques plus élevés dans l'atome ou la molécule



Ionisation



Excitation

Ionisations et excitations

- Typiquement: $\sigma_{\text{ionisation}} > \sigma_{\text{excitation}}$ mais pour ionisation \rightarrow présence de E_{seuil} \rightarrow comme les transferts de faibles énergies sont les + probables \rightarrow réactions d'excitations dominant généralement
- Ions et e^- créés par le rayonnement ionisant incident \rightarrow ionisation primaire
- Si le e^- crée lui-même d'autres paires ions- e^- \rightarrow ionisation secondaire
- On définit W comme l'énergie moyenne dépensée dans le milieu par paire d'ions formée
- W est « relativement » indépendant de la particule incidente ainsi que de l'énergie de celle-ci \rightarrow pour les gaz $W \approx 30$ eV
- La distinction entre ionisation et excitation dans un milieu dense est floue \rightarrow technique pragmatique: introduction d'une énergie seuil: si $E < E_{\text{seuil}}$ \rightarrow la particule n'est plus ionisante \rightarrow à la fin de son parcours, une particule n'est plus ionisante

Énergie d'excitation, d'ionisation et énergie moyenne: Exemples pour des gaz

	Excitation (eV)	Ionization (eV)	Mean energy for one pair (eV)
H ₂	10.8	15.4	37
He	19.8	24.6	41
N ₂	8.1	15.5	35
O ₂	7.9	12.2	31
Ne	16.6	21.6	36
Ar	11.6	15.8	26
Kr	10.0	14.0	24
Xe	8.4	12.1	22
CO ₂	10.0	13.7	33

Rayonnements ionisants

- Le terme *rayonnement ionisant* se rapporte aux particules chargées ou non-chargées qui peuvent produire des ionisations dans un milieu
- Les rayonnements ionisants sont caractérisés par leurs coefficients d'interaction
- Les rayonnements ionisants se subdivisent en 2 catégories:
 - Les particules directement ionisantes (e^- , particules chargées lourdes)
 - Les particules indirectement ionisantes (photons, neutrons) qui mettent en mouvement des particules ionisantes

Particules directement ionisantes

- Les particules chargées (e^- , e^+ , α , p , ion,...) interagissent via la force de Coulomb avec les e^- et les noyaux du milieu \rightarrow interactions fréquentes \rightarrow énergie perdue de manière quasi-continue \rightarrow distance finie parcourue dans la matière \rightarrow définition d'un parcours total (range)
- **Pouvoir d'arrêt** \rightarrow Quotient de la perte d'énergie moyenne ΔE subie par une particule chargée sur une portion de trajectoire et la longueur Δx de cette portion \rightarrow perte d'énergie moyenne par unité de longueur subie par la particule chargée le long de sa trajectoire (unité: Jm^{-1}) \rightarrow pour une cible « épaisse », des fluctuations en énergie faibles et une trajectoire rectiligne (approximation CSDA: *continuous-slowing-down-approximation*):
 $E = E(x) \rightarrow dE/dx$

Expression du pouvoir d'arrêt (en CSDA)

$$\frac{dE}{dx} = -NS(E)$$

N : densité atomique

S : section efficace d'arrêt

$$S = \int T d\sigma$$

T : énergie perdue

σ : section efficace de collision

Section efficace d'arrêt

- $S = S_{elec} + S_{rad} + S_{nucl}$
- Ions: $S \approx S_{elec}$ (S_{nucl} uniquement à considérer pour les faibles énergies ≈ 1 keV)
- Électrons: $S = S_{elec} + S_{rad}$ (S_{rad} particulièrement pour $Z \nearrow$)
- Pour $S_{elec} \rightarrow$ équation de Bethe-Bloch corrigée (ions), de Møller (e^-), de Bhabha (e^+)
- Expression standard pour S :

$$S_{elec} = \frac{4\pi r_e^2 mc^2}{\beta^2} Z z^2 L(\beta)$$

avec $\beta = v/c$, $z = e_{proj}/e$, $r_e = e^2/(mc^2)$ et $L(\beta)$ le « stopping number » (nombre d'arrêt)

Pouvoir d'arrêt restreint (transfert linéique d'énergie)

L_{Δ} : **Transfert linéique d'énergie (LET)** (ou Pouvoir d'arrêt restreint) \rightarrow

$$L_{\Delta} = \frac{dE_{\Delta}}{dx}$$
$$L_{\Delta} = \frac{dE_{elec}}{dx} - \frac{dE_{KE>\Delta}}{dx}$$

avec $dE_{\Delta} = dE_{elec} - dE_{KE>\Delta}$ et $dE_{KE>\Delta}$: somme des énergies cinétiques des e^{-} secondaires ($e^{-} \delta$) dont l'énergie cinétique $>$ à l'énergie $\Delta \rightarrow dE_{\Delta}$ s'interprète comme l'énergie transférée localement

L_{∞} : **Pouvoir d'arrêt non-restreint** $\rightarrow L_{\infty} = \frac{dE_{elec}}{dx}$

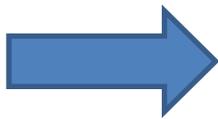
Détermination de l'énergie maximale transférée: T_{max}

$$T_{max} = \gamma E$$

avec

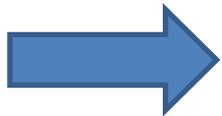
$$\gamma = \frac{4m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2}$$

m_1 : particule chargée incidente
 m_2 : particule chargée cible



Pour $m_1 = m_2 \rightarrow \gamma = 1$

Pour $m_1 \ll$ ou $\gg m_2 \rightarrow \gamma$ petit



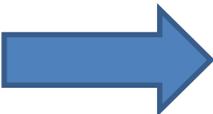
électron/électron: grand transfert d'énergie possible
électron/ion ou ion/électron: petit transfert d'énergie
ion/ion: grand transfert d'énergie possible

Déviations angulaires

- Si $m_2 \leq m_1$: θ_{\max} est donné par

$$\sin \theta_{\max} = \frac{m_2}{m_1}$$

- Sinon $\theta_{\max} = \pi$



électron/électron: grandes déviations possibles $\theta_{\max} = \pi/2$

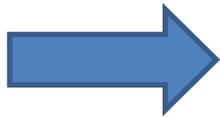
électron/ion: très grandes déviations possibles $\theta_{\max} = \pi$

ion/électron: petites déviations

ion/ion: dépend des masses mais grandes déviations possibles

Expression du range (parcours)

$$x = \int_{E(x)}^{E_0} \frac{dE'}{NS(E')}$$



Le parcours total R est obtenu pour $E(R)=0$

$$R_{CSDA} = \int_0^{E_0} \frac{dE'}{NS(E')}$$

Cette estimation du parcours est basée sur l'hypothèse CSDA!

Parcours projeté R_p : Valeur moyenne de la profondeur qu'une particule chargée atteint à son arrêt (mesurée le long de la direction initiale de la particule) $\rightarrow R_p < R_{CSDA}$

Exemples de ranges CSDA pour des ions

- 5.5 MeV α dans l'air: $R_{CSDA} = 4.2$ cm
- 4.0 MeV α dans l'air: $R_{CSDA} = 2.6$ cm
- 5.5 MeV α dans l'aluminium: $R_{CSDA} = 2.5 \cdot 10^{-3}$ cm
- 5.5 MeV α dans H₂O: $R_{CSDA} = 4.3 \cdot 10^{-3}$ cm

- 1 MeV proton dans l'air: $R_{CSDA} = 2.4$ cm
- 4 MeV proton dans l'air: $R_{CSDA} = 23.6$ cm
- 5.5 MeV proton dans l'aluminium: $R_{CSDA} = 2.3 \cdot 10^{-2}$ cm
- 5.5 MeV proton dans H₂O: $R_{CSDA} = 4.3 \cdot 10^{-2}$ cm

<http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm>

Exemples de ranges CSDA pour des e^-

- 5.5 MeV e^- dans l'air: $R_{CSDA} = 2500$ cm
- 4.0 MeV e^- dans l'air: $R_{CSDA} = 1800$ cm
- 1 MeV e^- dans l'air: $R_{CSDA} = 410$ cm

- 5.5 MeV e^- dans l'aluminium: $R_{CSDA} = 1.2$ cm
- 5.5 MeV e^- dans H_2O : $R_{CSDA} = 2.8$ cm
- 1 MeV e^- dans H_2O : $R_{CSDA} = 0.44$ cm

Particules indirectement ionisantes

- Photons (rayons γ , rayons X caractéristiques, Bremsstrahlung)
→ interagissent avec la matière via des événements uniques successifs → entre 2 événements: pas d'interaction avec la matière
- Neutrons → ne portent pas de charges → pas d'interactions avec la matière via la force de Coulomb → interagissent via la force nucléaire
- Dans les 2 cas → peuvent perdre toute leur énergie en une seule interaction et inversement peuvent traverser une « grande » quantité de matière sans interaction
- Après une interaction → émission de particules ionisantes (électrons, positrons, protons, alphas, produits de fission,...)

Types d'interactions pour les particules indirectement ionisantes

- Photons: effet photoélectrique, effet Compton, création de paire ou de triplet, diffusion Rayleigh
- Neutrons: diffusion élastique, diffusion inélastique, absorption
- Section efficace d'interaction σ : (avec j types de processus)

$$\sigma = \sum_j \sigma_j$$

- Exemple: photons $\rightarrow {}_a\mu = {}_a\tau + {}_a\sigma + {}_a\kappa$ (photoélectrique + Compton + création de paire)

Coefficient linéique d'atténuation pour des particules indirectement ionisantes

- La probabilité qu'une particule indirectement ionisante incidente (\perp) sur un matériau d'épaisseur dl et densité atomique N subisse une interaction est ${}_a\mu N dl \rightarrow$ Pour un faisceau monoénergétique constitué de I particules (\parallel) par unité de temps, la variation dI après avoir traversé la cible est, tous les chocs étant absorbants:

$$dI = -{}_a\mu N I dl$$

- Pour une cible finie (épaisseur l) et un faisceau initial de I_0 particules, l'intensité après le passage dans la cible est:

$$I = I_0 \exp(-{}_a\mu N l)$$

- $\mu = {}_a\mu N$: **Coefficient linéique d'atténuation** (unité: m^{-1}) \rightarrow permet d'évaluer la fréquence des collisions

Coefficients dérivés

- On peut aussi écrire (avec M est la masse molaire du matériau, ρ sa masse volumique et N_A le nombre d'Avogadro):

$$\mu l = \left(a \mu \frac{N_A}{M} \right) (\rho l)$$

- (ρd) : **Densité massique superficielle** (unité: kg m^{-2})
- μ/ρ : **Coefficient massique d'atténuation** (unité: $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) \rightarrow

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right) = \left(a \mu \frac{N_A}{M} \right)$$

- $\lambda=1/\mu$: **Libre parcours moyen** (unité: m)
- ρ/μ : **Longueur massique d'atténuation** (unité: kg m^{-2})

Coefficient massique d'atténuation

- μ/ρ : **Coefficient massique d'atténuation** (unité: m^2kg^{-1}) \rightarrow quotient de dI/I par ρdl où dI/I est la fraction de particules indirectement ionisantes qui subissent des interactions le long de la distance dl parcourue dans un matériau de masse volumique ρ
- Coefficient global \rightarrow prend en compte les interactions des particules dans la matière sans préciser la nature de l'interaction

Coefficient massique d'atténuation: exemples

- 1 MeV photons dans l'air: $\mu/\rho=0.064 \text{ cm}^2/\text{g}$ avec $\rho(\text{air})=0.001205 \text{ g/cm}^3$ $\rightarrow \mu=7.71 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ \rightarrow après 1m $\rightarrow I/I_0=99.2\%$
- 10 keV photons dans l'air : $\mu/\rho=5.1 \text{ cm}^2/\text{g}$ avec $\rho(\text{air})=0.001205 \text{ g/cm}^3$ $\rightarrow \mu=6.15 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ \rightarrow après 1m $\rightarrow I/I_0=54.1\%$
- 1 MeV photons dans le Pb: $\mu/\rho=0.070 \text{ cm}^2/\text{g}$ avec $\rho(\text{lead})=11.35 \text{ g/cm}^3$ $\rightarrow \mu=7.95 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$ \rightarrow après 1m $\rightarrow I/I_0 \approx 0\%$
 \rightarrow après 1cm $\rightarrow I/I_0 \approx 45.2\%$
- 1 MeV photons dans H₂O: $\mu/\rho=0.071 \text{ cm}^2/\text{g}$ avec $\rho(\text{H}_2\text{O})=1.0 \text{ g/cm}^3$ $\rightarrow \mu=7.7 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ \rightarrow après 1m $\rightarrow I/I_0 \approx 0\%$
 \rightarrow après 1cm $\rightarrow I/I_0 \approx 92.5\%$

<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>

Coefficient de transfert massique d'énergie

- μ_{tr}/ρ : **Coefficient de transfert massique d'énergie** (unité: m^2kg^{-1}) \rightarrow quotient de $dE_{tr}/(EN)$ (avec E l'énergie de chaque particule à l'exclusion de l'énergie au repos) par ρdl où $dE_{tr}/(EN)$ est la fraction d'énergie des particules incidentes transformée en énergie cinétique de particules chargées par interactions dans une épaisseur dl du matériau de masse volumique $\rho \rightarrow$ autre notation: $\mu_{tr} = (E_{tr}/E)\mu$
- Coefficient global d'absorption massique en énergie qui sera la somme des coefficients d'interactions considérés
- Exemple: photons \rightarrow

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = f_{ph} \frac{\tau}{\rho} + f_C \frac{\sigma}{\rho} + f_{pair} \frac{\kappa}{\rho}$$

avec f_i , les fractions d'énergie du photon transférées sous forme d'énergie cinétique à des particules chargées pour chaque processus

Coefficient d'absorption massique en énergie

- Une fraction de l'énergie cinétique emportée par les particules chargées mises en mouvement lors des interactions des particules primaires avec le matériau peut ne pas être absorbée localement → une partie de leur énergie peut être émise sous forme de rayonnement de freinage (surtout pour des électrons secondaires d'énergie élevée)
- μ_{en}/ρ : **Coefficient d'absorption massique en énergie** (unité: m^2kg^{-1}) → produit du coefficient de transfert massique en énergie par $(1-g)$, où g est la fraction de l'énergie des particules secondaires chargées perdue sous forme de rayonnement de freinage dans le matériau

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = (1 - g) \frac{\mu_{tr}}{\rho}$$

Comparaison $\mu_{\text{tr}} \leftrightarrow \mu_{\text{en}}$

γ -ray Energy (MeV)	$100 (\mu_{\text{tr}} - \mu_{\text{en}})/\mu_{\text{tr}}$		
	$Z = 6$	29	82
0.1	0	0	0
1.0	0	1.1	4.8
10	3.5	13.3	26