

# 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](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](http://metronu.ulb.ac.be/pauly_cours.html)
- Exercices (Assistante: M. Ciccarelli – [Maureen.Ciccarelli@ulb.be](mailto:Maureen.Ciccarelli@ulb.be)): 1 ECTS (25% → Examen écrit)
- Laboratoires (Organisation: M. Ciccarelli): 1 ECTS (25% → Cahier de rapports)
  - - Erasme (S. Simon)
  - 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  $\gamma$ , 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

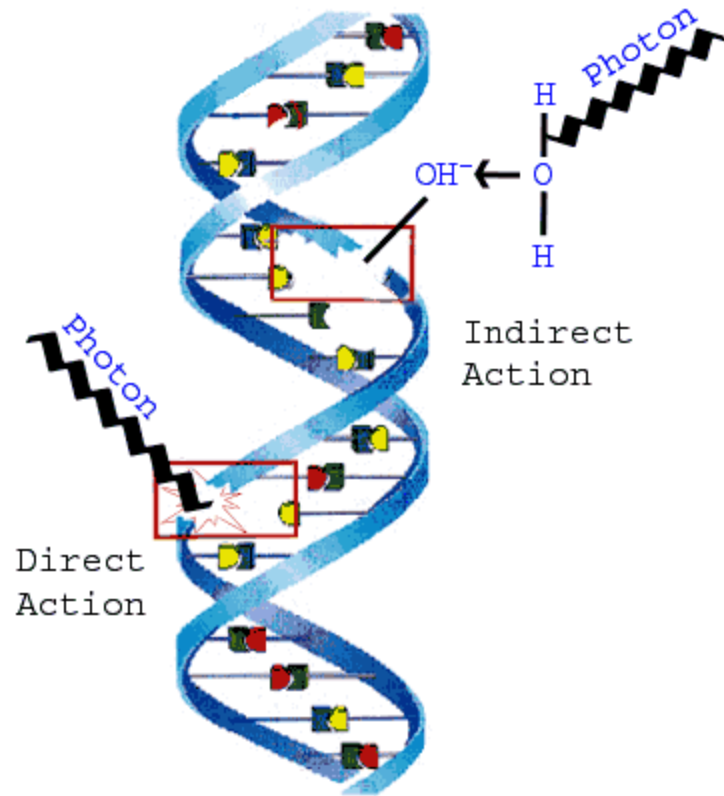
# Définition de la dosimétrie

- **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



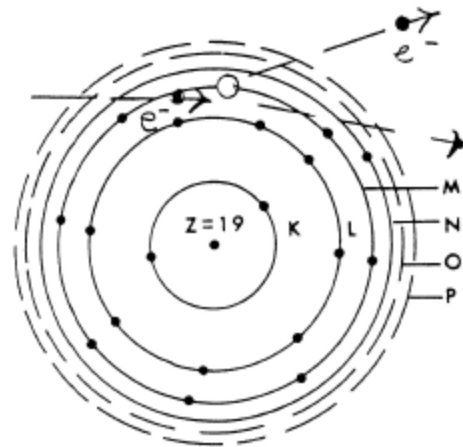
# Dommmages directs et indirects



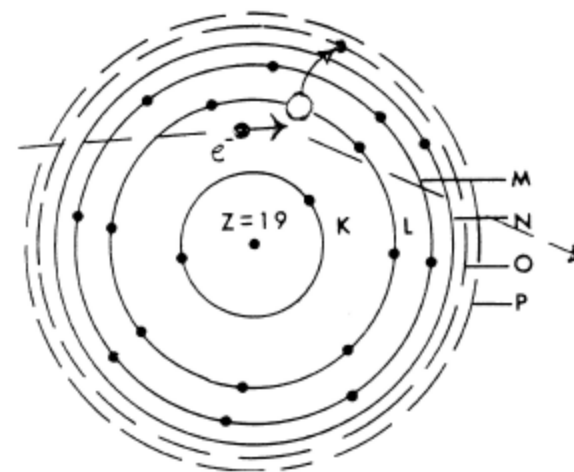
# Interactions des rayonnements ionisants avec la matière

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  $E_{\text{seuil}}$   $\rightarrow$  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 <sub>2</sub>	10.8	15.4	37
He	19.8	24.6	41
N <sub>2</sub>	8.1	15.5	35
O <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub>	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 rayonnement ionisants sont caractérisés par leurs coefficients d'interaction
- Les rayonnement 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 ( $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\alpha$ ,  $p$ , 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  $\Delta E$  subie par une particule chargée sur une portion de trajectoire et la longueur  $\Delta x$  de cette portion  $\rightarrow$  perte d'énergie moyenne par unité de longueur subie par la particule chargée le long de sa trajectoire (unité:  $\text{Jm}^{-1}$ )  $\rightarrow$  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

$\sigma$ : 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  $\approx 1$  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)

$L_{\Delta}$ : **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

$L_{\infty}$ : **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  $m_2 \leq m_1$ :  $\theta_{\max}$  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  $\alpha$  dans l'air:  $R_{CSDA} = 4.2$  cm
- 4.0 MeV  $\alpha$  dans l'air:  $R_{CSDA} = 2.6$  cm
- 5.5 MeV  $\alpha$  dans l'aluminium:  $R_{CSDA} = 2.5 \cdot 10^{-3}$  cm
- 5.5 MeV  $\alpha$  dans H<sub>2</sub>O:  $R_{CSDA} = 4.3 \cdot 10^{-3}$  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 H<sub>2</sub>O:  $R_{CSDA} = 4.3 \cdot 10^{-2}$  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  $\gamma$ , 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  $\sigma$ : (avec  $j$  types de processus)

$$\sigma = \sum_j \sigma_j$$

- Exemple: photons  $\rightarrow \mu = \tau + \sigma + \kappa$  (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:  $\text{m}^{-1}$ )  $\rightarrow$  permet d'évaluer la fréquence des collisions

## Coefficients dérivés

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

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

- $(\rho d)$ : **Densité massique superficielle** (unité:  $\text{kg m}^{-2}$ )
- $\mu/\rho$ : **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:  $\text{m}$ )
- $\rho/\mu$ : **Longueur massique d'atténuation** (unité:  $\text{kg m}^{-2}$ )

# Coefficient massique d'atténuation

- $\mu/\rho$ : **Coefficient massique d'atténuation** (unité:  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ ) → quotient de  $dI/I$  par  $\rho dl$  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  $\rho$
- Coefficient global → 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 H<sub>2</sub>O:  $\mu/\rho=0.071 \text{ cm}^2/\text{g}$  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

- $\mu_{tr}/\rho$ : **Coefficient de transfert massique d'énergie** (unité:  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ )  $\rightarrow$  quotient de  $dE_{tr}/(EN)$  (avec  $E$  l'énergie de chaque particule à l'exclusion de l'énergie au repos) par  $\rho dl$  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)
- $\mu_{en}/\rho$ : **Coefficient d'absorption massique en énergie** (unité:  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ ) → 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 $\mu_{\text{tr}} \leftrightarrow \mu_{\text{en}}$

$\gamma$ -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