

Biophysiq des rayonnements ionisants

Définitions:

radioélément: élém chimiq radioactif (naturel ou prod par réact° nuc → artificiel)

noyau radioactif: noyau instable rayonnant

radio nucléol: radioactivité et nucléol

radioactivité: prop. de certains élém chimiq d'émettre rayonnements ← noyau atomiq instable.

Structure atome:

atome = noyau central très dense ou nucléol chargé \oplus + nuage d'e gravitant autour de lui.
 $m(e^-) = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$

les e⁻ st liés au noyau atomique par des F d'interaction qui leur assignent une trajectoire

Sommerfeld en 1916 → atome à orbites elliptiq

ne peut pas é considérée comme bien déf pour chaq e⁻

Bor en 1913 → orbites circulaires qu'on adopte comme schéma simplifié

modèle physiq: représentat° + facile des phéno.

Modèle à orbites circulaires:

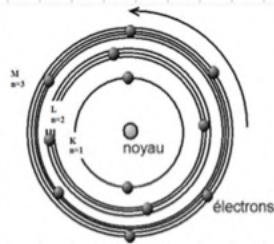
e⁻ gravitent autour du noyau sur ces orbites ≡ couches électroiq

chaq orbite → nbr quantiq princp $n(1, 2, 3)$

chaq couche → K, L, M

nbr d'e ds niv = n^2

e⁻ se placent sur K → L → M → N ...



état atome stable par ce type de remplissg → fondamental

Structure du noyau:

Constitution: nucléol: proton + neutron

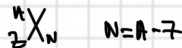
$$z: m_p = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg} \approx 1836 m_e$$

$$q(n) = 0 \quad m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg} \approx m_p$$

$$q(+e) = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Représentation:

id noyau et det sa compo



masse du noyau:

$$m(X) = m \text{ du noyau} + m \text{ de } Z e^-$$

→ la masse d'un atome est concentré dans son noyau → $m(e^-) \ll m(\text{nucléol})$

Unité de masse:

M molaire = masse d'une mole

$$M \text{ d'un atome} = \text{nbr nucléol} \times m \text{ du nucléol} = A \times 1,67 \times 10^{-27} \text{ (kg)} = A \times 1,67 \times 10^{-24} \text{ (g)}$$

M molaire atomiq = M_A

$$M_A = M \text{ d'un atome} \times N_A = A \times 1,67 \times 10^{-24} \times N_A = A \times 1,67 \times 10^{-24} \times 6,02 \times 10^{23} = A \times 1,005$$

$$C \Rightarrow M = A$$

masse molaire atomiq ⇒ nbr de nucléol (A) → unité g/mol

uma: 1/12^e de m de ¹²C

N atomes C → 12g

$$1 \text{ atome C} \rightarrow 12/N \rightarrow 1 \text{ uma} = 1/12 \times 12/N = 1/N = 1/66 \times 10^{-24} \text{ g} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Relativité Einstein:

relation d'équivalence: masse-énergie

$$E = mc^2 \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$1 \text{ uma} = \frac{1,6 \times 10^{-13} \text{ J} \cdot 10^{-10} / 1,6 \times 10^{-19}}{c^2} = \frac{931 \times 10^6 \text{ eV}}{c^2} = 931 \text{ MeV}/c^2$$

$$E = 1,66 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 1,5 \times 10^{-10} \text{ J}$$

unité d'E en physiq nuc: eV = E acquise par e⁻ soumise à V

E de liaison des noyaux:

$m_n \rightarrow$ neutrons $m_p \rightarrow$ protons $M(A, Z) \rightarrow$ noyau
 principe: $M(A, Z) = Z m_p + (A-Z) m_n$
 réalité: $M(A, Z) < Z m_p + (A-Z) m_n$
 $(\Leftrightarrow M(A, Z) = [Z m_p + (A-Z) m_n] - \Delta m)$

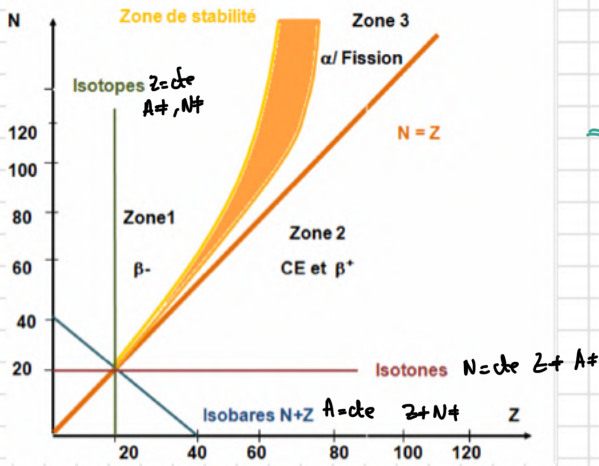
$\Delta M = [Z m_p + (A-Z) m_n] - M(A, Z)$ défaut de masse

$\hookrightarrow E$ qu'il faut fournir au noyau pour le séparer en ses constituants
 \hookrightarrow à E_L totale des nucléons dans le noyau

$E_L = \Delta M c^2$
 Dans un noyau, E_L moyenne par A $\Rightarrow E_m = \frac{E_L}{A}$ \rightarrow unité de masse

Noyau
 stable $M(A, Z) < m$ de ses constituants
 radioactif $M(A, Z) >$ masse de ses constituants
 \hookrightarrow possède excès d' E

\hookrightarrow libéré par transformation noyau \Rightarrow tout nrx noyaux stables

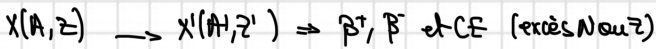


\Rightarrow diagramme de stabilité / de Segré

isomères $\rightarrow A, Z, N$ cte

Transformation radioactives:

Transformation isobariques: $A = cte$ $\rightarrow Z \neq N \neq > 40 \rightarrow Z$



noyaux père et fils sur m même ligne isobarique: m A, Z \neq d'une unité

• émission β^- : noyau en zone 1 = excès neutrons \rightarrow anti-neutrino, neutre; $m_{\bar{\nu}} \approx 0$
 • stabilité: neutron \rightarrow proton: ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + e^- + \bar{\nu}$

• équation bilan: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}$
 rayonnement β^- \rightarrow ejectés car ne st pas des composants du noy.
 \downarrow
 rayonnements nuc émis

• Condition Entiq: E_{max} au cours de la réaction: $Q_{\beta^-} = E_{\beta^- max} = E_i - E_f$

$E_{\beta^- max} = [M(A, Z) - (M(A, Z+1) + m_e + m_{\bar{\nu}})] c^2 \Rightarrow Q_{\beta^-} = E_{\beta^- max} = [M(A, Z) - M(A, Z+1)] c^2$
 $M(A, Z) - Z m_e$ $M(A, Z+1) - (Z+1) m_e$

• émission β^- spontanément possible, il suffit que: $Q_{\beta^-} > 0 \Leftrightarrow \Delta M c^2 > 0 \Leftrightarrow M(A, Z) - M(A, Z+1) > 0$

• émission β^+ : noyau de zone 2, excès de protons \rightarrow $\bar{\nu}$ et $m_{\nu} \approx 0$
 $\hookrightarrow E$ libérée, se partage au hasard entre e^+ et $\bar{\nu}$

• protons \rightarrow neutrons: ${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + e^+ + \bar{\nu}$

• rayonnement: β^+ ou e^+ : positron • neutrino $\bar{\nu}$

• équation: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + e^+ + \bar{\nu}$

• condition Entiq: $Q_{\beta^+} = E_{\beta^+ max} = E_i - E_f$
 $Q_{\beta^+} = [M(A, Z) - (M(A, Z-1) + m_e + m_{\bar{\nu}})] c^2$
 $M(A, Z) - Z m_e$ $M(A, Z-1) - (Z-1) m_e$

$Q_{\beta^+} = \Delta M c^2 - 2 m_e c^2$
 \rightarrow émission possible si: $E_{\beta^+ max} > 0 \Leftrightarrow \Delta M c^2 > 1.022 \text{ MeV}$

\Rightarrow notion E seuil: $E_{\beta^+ max} = \Delta M c^2 - 1.022 \text{ MeV}$ se partage au hasard entre e^+ et $\bar{\nu}$
 $M(A, Z) - Z m_e - [M(A, Z-1) + 2 m_e - m_{\bar{\nu}}] c^2$
 $[M(A, Z) - M(A, Z-1) - 2 m_e] c^2$

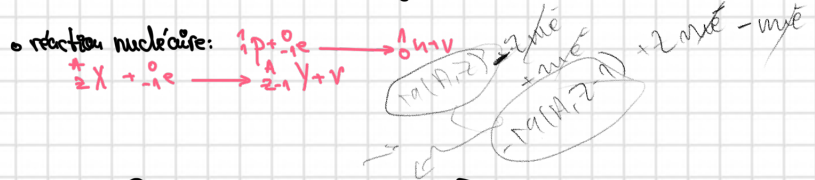
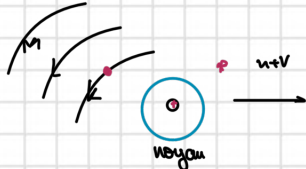
→ effet dualité:

- positon émis et se propage ds la matière perdant son E
- Au repos: e^+ rencontre $e^- \Rightarrow$ Annihilation avec émission de 2 photons γ de $m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$ ds 2 sens opposés à 180°



• Capture électronique CE: noyau de zone d, excès de protons

• CE: capture d'un e^- des couches internes de l'atome par le noyau, au sein duquel se combine $e^- + p \rightarrow$ neutron



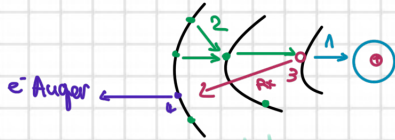
• Bilan énergétique CE: émission CE possible si: $[M(A, Z) + m_e - (M(A, Z-1) + m\nu)] c^2 > E_p$

on obtient $M(A, Z) = M(A, Z-1) + m_e$ $M(A, Z-1) = M(A, Z-1) - (Z-1)m_e$

$AMc^2 > E_p$ $E_{CE} = [M(A, Z) - M(A, Z-1)]c^2 - E_p \Rightarrow$ toute l'E est emportée par le neutrino

→ Phénomènes secondaires à la CE:

- * Emission RX: après CE:
 - o cortège électronique comporte un "trou": vacance
 - o atome excité
 - o réarrangement électronique qui aboutit à:
 - o émission RX caractéristique du noyau (fno)
 - o RX émis est photon qui a une E: $E_x = E_L - E_p$ (e^- transit de L \rightarrow K)
- * Electron Auger: l'E de transit X interagit avec un e^- périph qui sera libéré: c'est l' e^- Auger



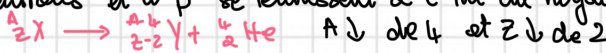
Compétition β^- et CE:
 CE favorisée si:
 E seuil $< 1,022 \text{ MeV}$
 • noyau lourds ($Z \gg 1$)

→ Transformations par partition:

- zone 3:
 - o excès neutrons et p
 - o répulsions + + +
 - o évolution \rightarrow stabilité: émission α ou fission spontanée
 zone de stabilité et en particulier vers zone $Z=83$

• émission α : noyau $Z > 83$ essayant d'évoluer \rightarrow zone de stabilité et en particulier vers zone $Z=83$

instables: 2 neutrons et 2 p se réunissent à l'int du noyau \rightarrow noyau d'He émis spontanément par noyau lourds



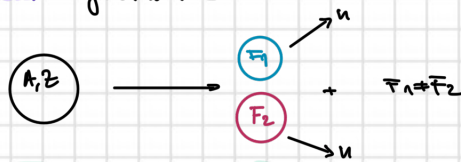
• Conditions E:

$\Delta M = M(A, Z) - (M(A-4, Z-2) + M(\text{He})) > 0$ $E_\alpha = [M(A, Z) - (M(A-4, Z-2) + M(\text{He}))]c^2$

particules α émises st monoénergétiques: ont m_e

• fission spontanée: noyau lourds

• mécanisme:



→ Désintégration électromagnétique des noyaux

Après α, β^-, β^+ ou CE

noyau reste excité \rightarrow désintégration par:

- o émission γ , conversion interne (CI), émission d'une paire (e^+, e^-)

• émission γ : sans modif de la composition

• CI: $E_{e^-} = E^* - E_k$

• émission de paire interne: $e^+ + e^-$

• Noyau * : $E^* \geq 1,022 \text{ MeV}$

• désintégrat $\rightarrow (e^+, e^-)$

• $E_e + E_{e^+} = E^* - 1,022$

Phéno 2nd ordre: e^+ : annihilation



Instantané 10^{-8} s \rightarrow 15

Isomérique > 15

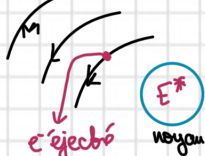
$E_i^* \rightarrow E_f \rightarrow E_\gamma = h\nu$

or $\nu = \frac{c}{\lambda}$

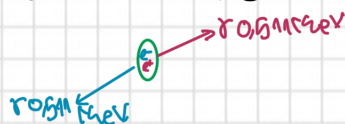
$E_\gamma = h\nu = E_i^* - E_f$

E^* : You CI? - si $E \geq 11$

- CI si noyau lourd ou faiblement excité



émission d'une phéno 2nd ordre à la CI \downarrow e Auger



e^- : excitation, ionisation des atomes de la matière

Interactions des rayonnements avec la matière

→ Interactions = transfert d'E
 → Un rayonnement : émission d'E à partir d'une source
 → A1: particules chargées ou non responsables d'ionisations

Rayonnements chargés:

- Particules chargées légères: e^-
- PC lourdes: protons; deutrons: d^{++} ; α^{++} , fragments lourds de fissions, ions lourds

Rayonnements neutres:

- neutrons n
- neutrinos ν
- Pions π^0 ...

Rayonnements électromagnétiques:

RX et R γ

→ Un rayonnement:
 • particulaire • ou électromagnétique (E.M)

→ ionisant s'il est susceptible d'arracher des e^- à la matière.

→ conditions: E_c (particules) } $> E_c$ des e^-
 ↳ l'E des rayonnement }
 - nV (protons)

→ en général, cette E ≈ 10 eV

Un rayonnement ionisant peut être:

↳ Directement ionisant:
 particules chargées légères et lourdes:
 β^+ , β^- , α , p, d, ions lourds

↳ Indirectement ionisant:
 • rayonnement EM RX, R γ
 • UV énergétique

Rayonnements non ionisants:

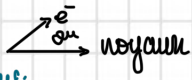
- UV proches du visible
- IR et ondes verticales → radioélectrique
 ↳ infra rouge

Interaction du rayonnement avec la matière:

• transfert d'E du rayonnement incident au milieu traversé; ceci dépend de: nature de ce rayonnement

• Son E • la nature de la matière traversée.

Rayonnement chargé:

• interactions peuvent avoir lieu avec 
 ↳ interactions particules- e^- = collisions:
 elles entraînent un transfert d'E à la matière respo des effets prodts sur le milieu.

↳ interactions particules-noyau = freinage:
 elles st respo de la prodct de RX de freinage qui peuvent soit être: → diffusés ou → tubéragés à leur tour avec la matière

Interactions des PC lourdes avec la matière: PCL

→ Ce st les p, d, α , ions lourds. → Origine: → désintégrations radioactives → réactions nucléaires

→ Interaction à caractère obligatoire avec: → e^- +++ → noyau des atomes

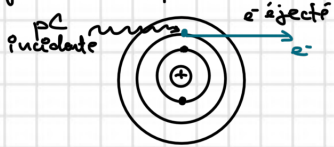
Interaction PCL- e^- = Collision:

L'E cédée ΔE par particule incidente est cédée à un e^- d' E_1 , trois cas peuvent se rencontrer:

$\Delta E > E_p$; $\Delta E < E_p$; $\Delta E \ll \dots$
 • ΔE très faible; dissipation thermique.

- $\Delta E > E_1$, ionisation:
 e^- éjecté de son orbite avec une $E_c = \Delta E - E_p$, il se prodt une ionisation et la création d'une paire d'ions (ions+ et e^-)
- e^- éjecté peut à son tour créer d'autres ionisations dnd cères se son E est suffisante.
- Ionisation suivie d'un réarrangement du cortège électronique avec émission fluorescente X

- $\Delta E < E_p$: excitation:
 E transférée à e^- est insuffisante pour l'expulser ms peut porter l' e^- à un niv énergétique sup (changement d'orbite); il ya excitation de l'atome il va puis retour à l'état fondamental par émission de rayons de fluo.



ionisation = méca fondamentale pour effets bio des rayonnements

→ Lors d'interaction PCL avec e^- , trajectoire reste rectiligne ou peu modifiée du fait de la supériorité de la masse des PCL % à celle des e^-

Quantification de l'E transférée: notion de TEL et DLI

Transfert d'E cinétique au TEL:

TEL est la quantité d'E transférée au milieu cible par la particule incidente par unité de longueur de trajectoire.

TEL = dE/dx - keV/μm: eau
- MeV/cm: air

Pour des particules de v < v_{light} dit lumière en a:

$TEL = k q_1 q_2 n \frac{z}{v^2}$
 k: charge de P1
 q2: numéro atomique de la cible
 n: vitesse de P1
 z: no d'électrons de la cible par u de volume

Applications en radiothérapie:

la variations de la DLI le long de la trajectoire d'une PCL est mis à profit en radiothérapie

En sélectionnant l'EC des P (α, p, ions lourds...) mis en mouvement par un accélérateur

On peut ajuster la profondeur du pic de Bragg à celle d'une tumeur et ainsi mieux protéger les tissus sains environnants.

Interaction des PCL avec les noyaux:

Interaction des PCL avec les noyaux atomiques sont d'une importance 2nd ordre

Interaction des PCL légères avec la matière: PCL

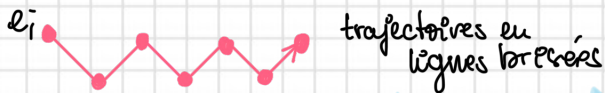
Origine: émissions β, β+, α, accélérateurs P, mise en mouvement d'e par RX-RY; des excitation électronique par effet Auger

Interactions des PCL se font avec: les e⁻ + + + Noyaux + + +

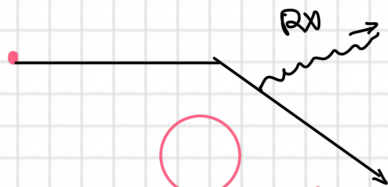
Interaction des PCL avec les e atomiques: collision



Déviation par répulsion coulombienne: diffusion avec perte d'E importante e₁



Interaction des PCL avec les noyaux atomiques: freinage



Diffusion inélastique par Champ coulombien noyau: Rayonnement freinage

Densité linéique d'ionisation (DLI) ou ionisation spécifique

DLI: nombre de paires d'ions créés par P1 par unité de longueur. Unités = (paires d'ions) / pm¹

On a TEL = W · DLI

W nécessaire pour provoquer une ionisation (en eV: W = 33 eV)

Pour des particules ≠, d'EC =, le TEL est + élevé pour une particule donnée que:

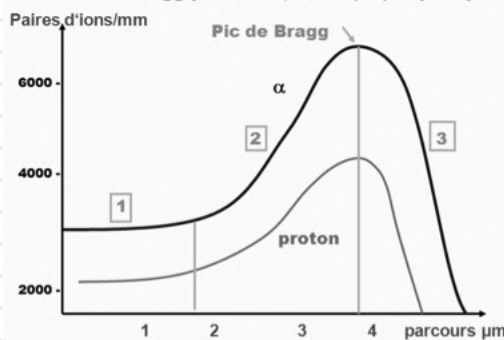
- sa charge est + grande
- sa v + faible
- sa masse + 1

Variation DLI le long de la trajectoire d'une P: courbe de Bragg

fin de parcours d'une PCL: marquée par 1^{er} DLI due au ralentissement de la P (2)

Puis une ↓ (3) lorsque, ayant capturé des e⁻ du milieu, elle s'arrête et cesse d'ioniser.

Courbe de Bragg pour α = 5,3 MeV (air) et pour p

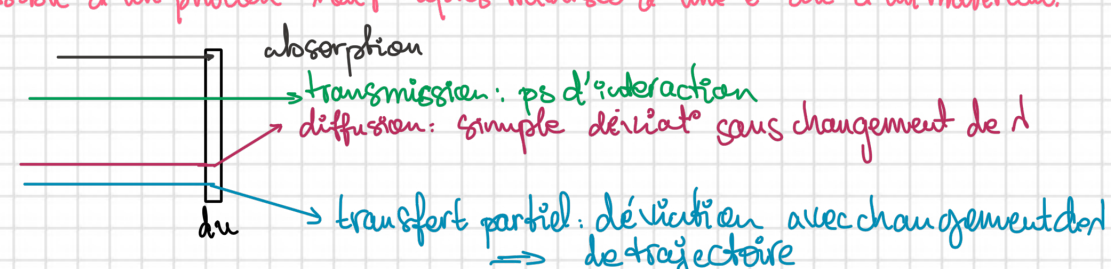


Variation DLI lors de trajectoire de PCL

Interactions des photons avec la matière

- photons en R. EM : ionisants d'E > 10 eV : UV, RX et RY
- photons X ou Y des rayonnements indirectement ionisants.
- photons X: origine électronique émis $\begin{cases} \text{par freinage d'e accélérés} \\ \text{lors du retour à l'état fondamental d'un atome} \end{cases}$
- photons Y: origine nucléaire: \rightarrow transit nucléaire \rightarrow annihilation des P \rightarrow des les accélérateurs de P
- RX et RY ont le m^e comportement vis à vis de la matière
- photons \neq des PC: $-m=0$ - charge $=0 \Rightarrow$ comportement vis à vis de la matière \neq / PC
- L'interaction photons-matière est de caractère aléatoire
- RY ont E + λ que RX \rightarrow photons X ou Y caractérisés par: \bullet fréquence ν \bullet longueur d'onde λ \bullet En: $E_{\nu} = h\nu$ et $\nu = \frac{c}{\lambda}$

→ Devenir possible d'un photon X ou Y après traversée d'une e ou d'un matériau:



Loi d'atténuation d'un faisceau de photons X ou Y:

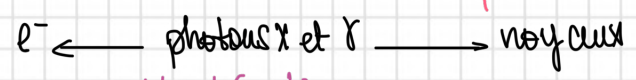
- l'E incidente E_i d'un photon, après traversée d'une e ou dm de matière, se répartit entre:
 - \bullet E transmise
 - \bullet E diffusée
 - \bullet E transférée $\} \Sigma = E_i$
- étude de probabilité d'interactions des photons X et Y avec la matière conduit à la def des lois d'atténuation d'un faisceau de photons.

nombre photons $\rightarrow N(x) = N_0 e^{-\mu x}$ \rightarrow e de la matière en cm
 surtout de μ et n'ayant pas interagit avec la matière \downarrow proba d'interaction par unité de longueur
 nombre de photons I sur une surface S de matière d'e x

- si l'on tient compte de l'intensité des 2 faisceaux de photons I_0 et $I(x)$ l'éq s'écrit:
- Si l'on considère l'e x qui atténue de 1/2 d'intensité du faisceau incident I_0 , appelée encore couche de 1/2-atténuation et notée CDA ($x = CDA$), on aura: $I_{CDA} = \frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu(CDA)}$

Soit $\ln 2 = \mu \cdot CDA \Rightarrow CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$ ($\ln 2 = 0,69$)
 ex: CDA Pb = 9,8 mm pour un faisceau de P 1,14 MeV

≠ modes d'interaction des photons X et Y avec la matière:

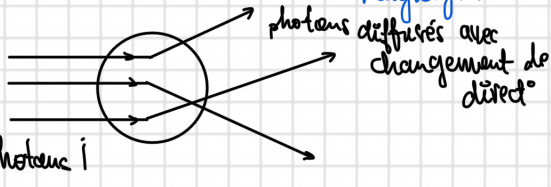


Mécanismes d'interaction:

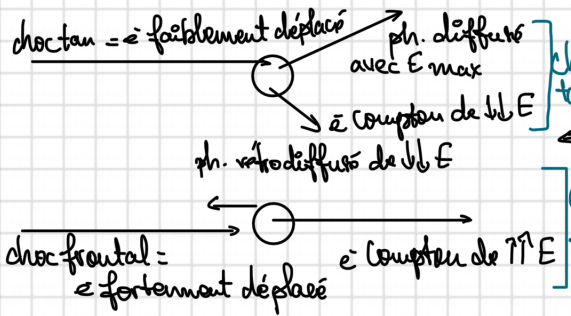
e	noyau
diffusion simple	matérialisation (paire)
effet Compton	réactions nucléaires
effet photoélectrique	

> Interaction avec les e⁻:

Diffusion simple (phéno. Thomson-Rayleigh)



Le photon i est absorbé par l'atome, puis réémis sans modification d'E, ms selon une direction ≠ de la directⁿ

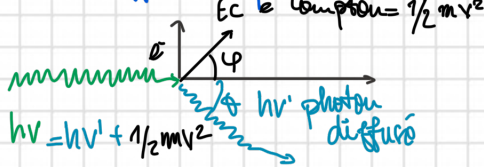


Choix tangential
Choix frontal

Probabilité d'interaction:
• Si $E = h\nu > 0,511 \text{ MeV}$
• Si eluit léger

$\mu_c = kZ / h\nu$
coeff d'atténuation par Compton

Effet Compton



interaction: photon-e libre ou peu lié.

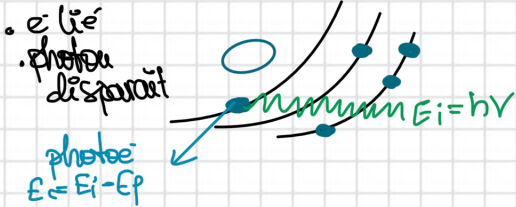
Projecté selon:

angle: $0 < \phi < 90^\circ$. $E_c = 1/2 mv^2$

Diffusion Ph. i selon:

direct d'A: $0 < \theta < 180^\circ$
• $E = h\nu'$ du ph. diffusé

Effet photoélectrique:



e⁻ lié
photon disparaît
photoe⁻
 $E_e = E_i - E_p$

E_i sert à:
• extraire de sa couche le d'Ep
• communiquer à cet e⁻ une E_c

Conditions:
• $E_i > E_p$
• phéno a lieu sur e⁻ lié
 $K^+; L^+; M^+$

Phénomènes induits: réorganisation cortège électronique avec émission de:

AX de fluo. Auger

ionisations et excitations des atomes du milieu

Probabilité d'interaction par effet photoélectrique:

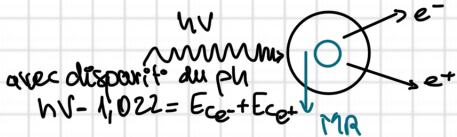
• μ_p dépend de E_n du ph. i et de Z cible:

> $\mu_p \propto Z^3$ avec Z > $\mu_p \propto 1/E^3$ avec E
• Effet prédominant jusqu'à:
• $E = 0,5 \text{ MeV}$ > Z $\propto Z^3$ (nyn lourds)

> Interaction avec les noyaux:

Matérialisation: prodⁿ de paire

Mécanisme possible si $h\nu > 1,022 \text{ MeV}$



Conséquences:
• e⁻ perd son E_c par excitation et ionisation.

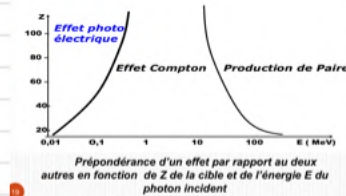
• e⁺: fin parcours s'annule avec e⁻ libre matière
• émission de ph: rde 0,511 MeV chacun

Probabilité atténuatⁿ μ_p :
 $\mu_p \propto Z^2$ (\uparrow avec Z)
 $\mu_p \propto$ l'électron avec hν

Réactions nucléaires:

• Il peut y avoir absorption du ph X par noyau avec transfo de celui-ci: α, β, n, γ réactions

ne concerne que ph de $\propto E$ ($E > 400 \text{ keV}$)



> Interactions des neutrons avec la matière:

• $m_n \approx m_p$
• n sans charge } neutrons \leftrightarrow noyau

2 types d'interaction

Absorption neutrons \rightarrow lents
↓
émission α, γ, p
fission
 F_1, F_2

Diffusion des neutrons: rapides
perte d'E par n

Les neutrons sont indirectement ionisants

La radioprotection:

→ la radioprotection : discipline qui coordonne les recherches, les travaux et les techniques concernant les moyens de prévenir et éventuellement de réparer les effets néfastes des RI.

→ Définitions: → Σ mesures prises pour protéger: travailleurs, pop, écosyst des dangers des RI tout en permettant leur utilisation. → compétence des radiobiologistes, radiotoxicolog, MD qualifiés, radiopathologistes, hygiénistes

→ Grandeurs et unités utilisées en radioprotection:

→ Dose absorbée: Da

• Da en un pt P est le rapport de l'énergie dEa absorbée ds un elmt de volume centré sur le P à la masse dm de l'elmt de volume $Da = dEa / dm$

• L'unité légale de la Da est le gray (Gy); Da ds une m = 1kg à laquelle les RI communiquent en moyenne de façon uniforme une $E = 1J$ → $1Gy = 1J/kg$

Svt on utilise encore une U ancienne, le rad, tq: $1Gy = 100\text{ rads}$.

→ Gy est une U de dose qui correspond à une irradiation relativement 1%, rarement rencontrée en milieu pro ds le cadre de radioprotect du personnel (MS fréq en radiothérapie anticancéreuse)

→ on utilise donc svt les ss-multiples de Gy: centigray cGy = rad ou milligray mGy

• Da variables selon les applications considérées: > 0,2 mGy: radio dent > 1 mGy: cliché thoraciq > 2 Gy: radiothérapie

Le débit de dose = dérivée Da par rapport au temps (Gy/s) : $\dot{D} = \frac{dD}{dt}$

• Le Da: grandeur dosimétriq se mesure et est valable à la nature de: = rayonnement = matière absorbante

Mais cette grandeur est insuffisante pour apprécier complètement les effets bio graves (morts voire, mutation) car à Da égale, ces effets varient en fct d'un certain nbre de facteurs:

= nature des RI > sensibilité du tissu absorbant ces RI > distribut° de dose et son fractionnement > distribut° spatiale de la Da ds tissu considéré

→ Dose équivalente (H) en sievert (Sv)

• À Da égale, les effets bio varient selon nature du RI. → Da par un tissu (T) pondérée par type et qualité du RI

• Wa: • α et X ... 1
• e et β ... 1 • protons ... 5
• α ... 20 • neutrons ... 5-20

$$H_{T,R} = W_R D_{T,R}$$

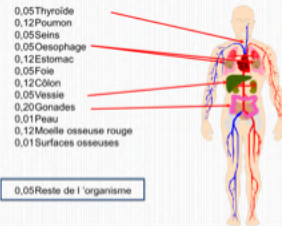
fact. de pondérat° radio
fact° du type et E du RI

→ Dose efficace (E) en Sv:

Somme des H reçues au niv de tous les organes ou T exposés, chacune pondérée par un facteur tenant compte la radiosensibilité propre du T ou de l'organe considéré.

$$E = \sum W_T H \text{ (Sv)}$$

W_T: facteurs pondération tissulaire



Grandeurs	Unités	Définitions
Energie E	électronvolt (eV)	1 eV = 1,6.10 ⁻¹⁹ Joules
Activité A	becquerel (Bq) ancienne unité : curie (Ci) 1 Ci = 3,7. 10 ¹⁰ Bq	Nombre de désintégrations par seconde
Dose absorbée D	gray (Gy) 1 Gy = 1 J.kg ⁻¹	Energie communiquée à la matière par unité de masse
Débit de dose	gray/heure (Gy.h ⁻¹)	Energie reçue par la matière exposée par unité de masse et par unité de temps
Dose équivalente H	sievert (Sv)	Effet biologique sur les tissus exposés (irradiés)
Dose efficace E	sievert (Sv)	Effet biologique sur l'ensemble de l'organisme

ex: on irradie 2 pop de 4 identiq avec neutrons et avec α et on leur délivre une dose de 1Gy.
• le facteur de pondérat° radio des neutrons est de 20, celui de α = 1.
→ calcules H pour chaq pop voir

Réponse: ou a $H = W_R D_{T,R}$ → pop 1: neutrons $H_1 = 20 \times 1 = 20\text{ Sv}$ → pop 2: α $H_2 = 1 \times 1 = 1\text{ Sv}$

→ Sources d'irradiation:

• Irradiation non professionnelle:

• naturelle • artificielle • médicale

• Irradiation professionnelle:

→ Irradiation naturelle: source la + importante, 3 origines: • cosmique, tellurique, naturellement présents ds l'organisme
→ A. cosmique: i variable avec altitude: 0,2 mSv/an au niv de la mer; 0,4 mSv/an à 1500m; 2,4 mSv/an en avion de ligne.
→ radioisotopes contenus ds le sol: source d'i d' ~ 0,3 - 0,5 mSv/an due à la présence de radionucléides naturels: ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K

> radioéléments naturels de l'organisme: ^{40}K entiaient une i interne d' $\sim 0,25 \text{ mSv/au}$

Le corps humain contient 2,2g de K/kg et chaque g de K naturel contient 37 Bq de K^{40} ce qui représente près de 600 Bq pour une personne de 70kg

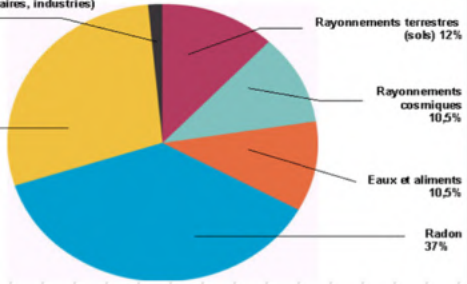
→ Irradiation artificielle: s'élève à $\sim 0,10 \text{ mSv/au}$ • provient de l'utilisation industrielle des AI et des retombées des essais nucléaires à l'air libre.

→ Irradiation médicale: en moyenne de 1 mSv/au • la personne irradiée est a priori la bénéficiaire des avantages. On peut distinguer 2 cas: thérapeutique et diagnostique attendue de l'i. Les examens médicaux → i qui est soit expérimentée en dose équivalente efficace

Notre monde est radioactif... Nous sommes soumis quotidiennement à une i naturelle.

Exposition artificielle

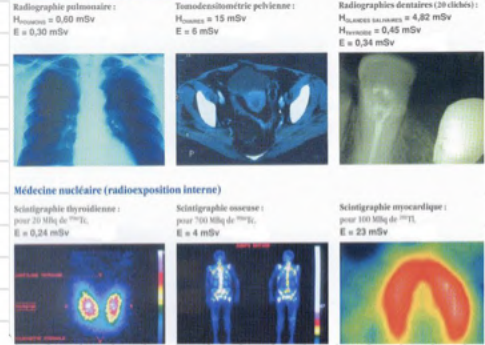
Autres (essais nucléaires, industries) 15%
Expositions médicales 28,5%



Exposition naturelle

Rayonnements terrestres (sol) 12%
Rayonnements cosmiques 10,5%
Eaux et aliments 10,5%
Radon 37%

Radiodiagnostic (radioexposition externe)



• Irradiation professionnelle: professions de santé, personnels navigants lignes aériennes et cosmonautes. Les personnes qui utilisent les appareils applications industrielles des AI

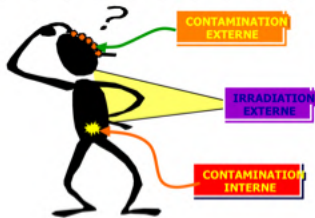
Qlg repères : eau de pluie: 0,5 Bq/L • eau de mer: 15 Bq/L • Terre: 900 Bq/L • Corps humain: K^{40} : 4.500 Bq, C^{14} : 3700 Bq
Vol Paris - NY: 0,05 mSv • Séjour 15j montagne: 0,1 mSv

Types de radio expo humaine.

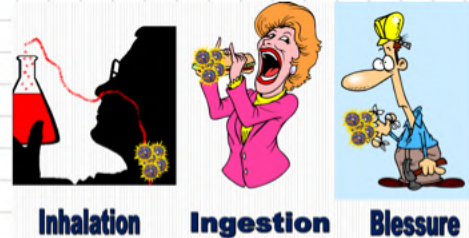
• expo. externe: à distance de la source
→ Globale: temps entier → Partielle: 1 ou plusieurs organes ou T
→ au contact de la source → Contaminat° externe

• expo. interne: Incorporation des radionucléides
↳ Contamination interne

Modalités d'i d'un corps humain:



Modes de pénétration de la contamination interne:



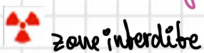
Principes fondamentaux de la radioprotection:

- justification de l'activité entraînant la radio expo. Eviter toute expo. inutile
- Optimisation des moyens de radioprotection: maintenir l'expo au niv le + bas possible pour personnel et le public
- Limitation des expo indiv.

→ Limites des doses: Classification des personnes expo.

- Travailleurs de catégorie A: susceptibles d'une dose $\geq 3/10$ limites annuelles d'expo: 20 mSv/au: i globale.
- Travailleurs de catégorie B: " " $< 3/10$ " limite réglementaire de E du public (1 mSv/au)
- autres travailleurs: considérés comme le public (limite de E = 1 mSv/au)

→ Zonage en milieu de travail: Protect° aux sources.



zone interdite



zone contrôlée: travailleur susceptible de recevoir dose $\geq 3/10$ d'une limite réglementaire



Zone surveillée: travailleur susceptible de recevoir dose $\geq 1/10$ d'une limite réglementaire.

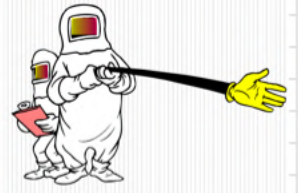
- Règles de radioprotection:

Comment se protéger de contamination interne?



Boire Manger Fumer

Comment se protéger de l'i?



TEMPS

ECRAN

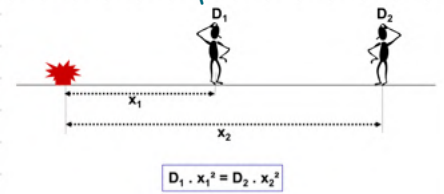
DISTANCE

temps d'expo

Notion \dot{D}
 - source en fcihaunt
 $\dot{D} = dD/dt$

par écrans

par distance



"Loi en 1/d²"

si $u_1 = 1 \text{ m}$
 $D_2 = \frac{D_1 u_1^2}{u_2^2} = \frac{D_1}{u_2^2}$

ex: 1. $D_1 = 0,2 \text{ Sv/h}$ $x_1 = 4 \text{ m}$ $x_2 = 8 \text{ m}$

$$D_1 x_1^2 = D_2 x_2^2 \Rightarrow D_2 = \frac{D_1 x_1^2}{x_2^2} = \frac{0,2 \cdot 4^2}{8^2}$$

$$= \frac{0,2}{2^2} = \frac{0,2}{4} = \frac{1}{2} \times 10^{-1}$$

$$= 0,5 \times 10^{-1} = 5 \times 10^{-2} \text{ Sv/h}$$

2. $D_1 = 0,1 \text{ Sv/h}$ $x_1 = 10 \text{ m}$ $x_2 = 100 \text{ m}$

$$D_2 = \frac{0,1 \times 10^2}{100^2} = \frac{10^{-1} \times 10^2}{(10^2)^2} = \frac{10}{10^4} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3} \text{ Sv/h}$$

3. $D_1 = 10^3 \text{ Sv/h}$ $D_2 = 2,5 \mu\text{Sv/h}$
 $x_1 = 2 \text{ m}$ $x_2 = ?$

$$D_1 x_1^2 = D_2 x_2^2 \Rightarrow x_2^2 = \frac{D_1 x_1^2}{D_2}$$

$$\Rightarrow x_2^2 = \frac{10^3 \times 2^2}{2,5 \times 10^{-6}} = \frac{2^2 \times 10^3}{2,5}$$

$$= \frac{4}{2,5} \times 10^4$$

$$\Rightarrow x_2 = 40 \text{ m} = 1600 \text{ m}^2$$

temps court \rightarrow dose + faible

Dose est proportionnelle au tps



Surveillance médicale du personnel:

- examens médicaux périodiques (6 mois)
- surveillance mensuelle dosimétrie (externe)
- surveillance radiobiologie: - Dosage RE: sg-urines...
 - Interne ou contamination.

Radiobiologie:

► Effets Bio des RI → chaîne de réactions déclenchés par interactions avec atomes constitutants la matière vivante.

- Ils dépendent de ≠ facteurs liés:
 - > dose et au débit de dose
 - > caractéristique du rayonnement
 - > type et au tissu ou au sujet

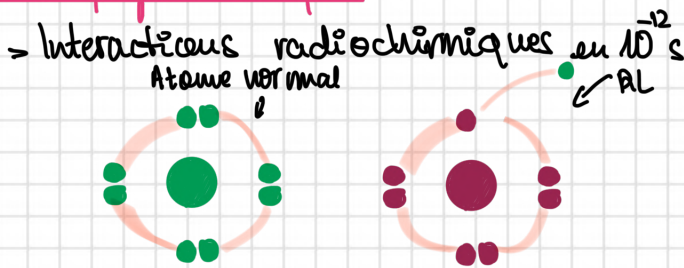
Interaction des RI avec les organismes vivants se fait selon une succession d'étapes



I. Interactions physiques:

- > particules ionisantes: α ; β ; ou celles mises en mouvement par R_x , R_γ et neutrons.
- > Interagissent de temps très court: $10^{-16} - 10^{-17}$ s avec e^- et noyaux des atomes du milieu: Ionisat°, Excitat°, Transfert thermique
- > RI à TLE faible: R_x et R_γ : faiblement ionisants
- > RI à TLE élevé: α ; β ; p : fortement ionisants

II. Interactions physicochimiques:

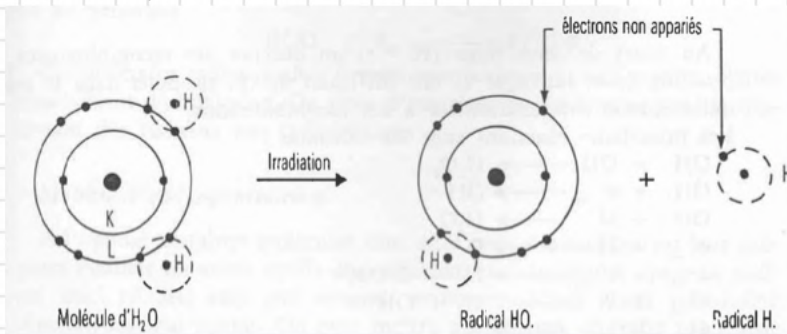


- > formation radicaux libres (RL)
- RI:
 - haute réactivité chimiq +++
 - état très instable
 - capturer un e^- pour réappairier leur(s) e^- solitaire(s)

→ Interact° RI avec e^- des mol d'eau
 ↳ richesse en eau des organismes vivants

a. Radiolyse de l'eau: ss influence des RI

La mol d'eau est décomposée en 2 radicaux HO^\bullet et H^\bullet chacun porteur d' e^- non apparié.



b. Rôle du TLE:

- 1^{er} cas: TLE élevé, DLI grande rencontre entre RL formés est $\pi\pi$
 - $H^\bullet + H^\bullet \rightarrow H_2$
 - $H^\bullet + OH^\bullet \rightarrow H_2O$
 - $OH^\bullet + OH^\bullet \rightarrow H_2O_2$ (toxic intraç)
- 2^e cas: TLE faible: réaction de recomb est la + probable:
 - $H^\bullet + OH^\bullet \rightarrow H_2O$

c. Influence présence d'O:

- 1^{er} cas: absence O_2
 - $H^\bullet + H^\bullet \rightarrow H_2$
 - $H^\bullet + OH^\bullet \rightarrow H_2O$
- 2^e cas: présence O_2 :
 - $H^\bullet + O_2 \rightarrow OOH^\bullet$
 - $2OOH^\bullet \rightarrow H_2O_2 + O_2$
 - $OOH^\bullet + H^\bullet \rightarrow HOOH$
 - $e^- + O_2 \rightarrow O_2^{\bullet -}$

l'effet de l' O_2 $\pi\pi$ radiosensibilité et explique radiorésistance des tumeurs et tissus hypoxiq.

d. Influence substances organiques:

formation d'oxydants puissants très toxiques:

mort faire par:

> Destruction des lip mb: trouble de perméabilité

> Atteinte des prot:

- altération enz:
 - > inactivat° et blocage du métabo
- > Désorganisat° de la synth: prot et

de l'ADN

↳ désorga fct° q,

III. Lésions moléculaires:

a. Effet direct:

> l'E du rayonnement est transférée directement à la mol ionisée ou excitée

> l'excédent d'E acquis par mol est perdu par:

- rayonnement de fluorescence
- rupture de liaisons chimiq

c. Cibles des lésions radio-induites:

Toute mol bio est des cibles:

= l'eau: 65-75% de organismes vivants.

> ADN: fct° centrale de la q

IV Mécanismes biochimiques des lésions génés:

a. Les syst enz: peuvent intervenir ds genèse des lésions génés, directement ou indirectement par:

- ▶ désorga synth prot et ADN
- ▶ altérat° mb

b. Ac désoxyribonucléique ADN:

- ▶ Rôle capital: div q & synth prot.
- ▶ Constituant essentiel de la chromatine du noyau
 - ↳ L: mitose ou méiose
- ▶ Présent ds mitocho ▶ 2 chaînes en db hélice
- ▶ Unité structurale: nucléotide fct° d:
 - une base (purique ou pyrimidique)
 - mol de désoxyribose
 - mol d'Ac phosphoré

2. Altération des bases:

- Détruites ou modifiées;
- hydroxylat° ou avec:

• formation d'oxydants

↳ incorporation bases inadéquales
↳ désorga db hélice

e. l'inactivation des RL:

• les syst enz q de réparat° nucléiq st ubreux (> 80), variés et très efficaces.

• ils seraient mû susceptibles de s'adapter.

La plupart des lésions seront complètement et parfaitement réparées.

b. Effet indirect:

> Résulte de l'action des RL formés lors de la radiolyse de l'eau.

> Eau: principale cible initiale des RI: 65% de la masse corporelle; on a longtemps pensé que cet effet était prédom.

> actuellement, on privilégie effet direct.

L'ADN: cible sensible des RI.

1. Les ruptures de chaînes +++

> Ruptures simples: E = 30-40 eV

sont réparables - parfois mortelle si les s'accumulent

> Ruptures de la db chaîne:

• Cassure simultanée des 2 brins.

• mort q d'emblée par perte d'intégrité structurale ADN lésion irréparable

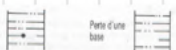
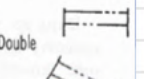
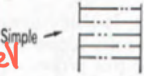
3. Altération des sucres

oxydés et hydrolysés avec libération des bases

4. Modification structure ADN

> Pontage (cross-links) par format° L. (sva)

> nombre de lésions ADN dépend de Da.



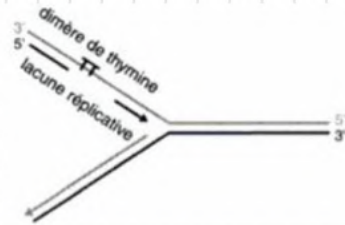
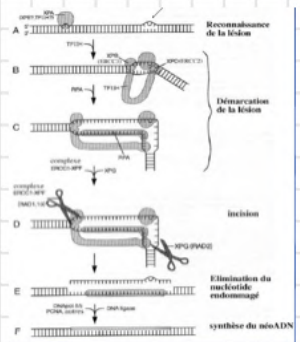
5. les syst. de réparation de l'ADN:

> Excision - resynth: 3-6h: 3 étapes

- reconnaissance de la lésion et son éliminat°.
- Synth fidèle de la portion manquante du brin d'ADN.
- Soudure de la portion synth au brin lésé.

> Recombinaison post-replicative

Au cours de la phase de répliation où existent 2 paires de 2 brins d'ADN



→ Réparation des ruptures ds chaînes.

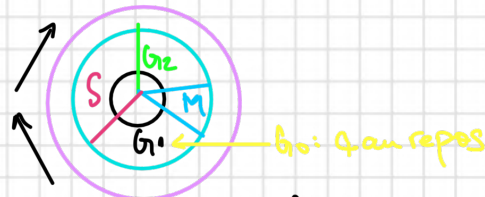
conséquence lig des lésions de l'ADN:

- > lésions lig: altérat° de la structure d'1 ou + k
 - cassure uniq sur 1k
 - cassure de + k
 - changement nbre de k
 - Altération des gènes
- ds cassure sur m k

V. Dommages 4aires:

Rappel: cycle 4

- Σ events biologiq se déroulant entre 2 mitoses successives
- Mitose: div en 2 4 filles. Chacune contenant totalité de l'16
- G1: 6h: suit mitose, 4 accumule nucléotide
- S: 3h Q d'ADN ds
- G2: 5h \pm courte.



Mort 4aire:

Lésions irréparables touchant structures 4aires vitales: k

- **Mort immédiate:** doses 1° : 99 Gy \Rightarrow arrêt de tte fct° 4aire et cytolysse
- **Mort différé:** doses moindres : 99 cGy : les 4: non tuée immédiatement ms gardent des fct normales jusqu'à la mitose ou une génération ultérieure
- **Mort indirecte:** pour 4 différenciées (SN-Foie...) lésées indirectement par atteinte des 4 interstitielles

Altérat° fct° 4aires: > Dose + faibles: \rightarrow troubles perméabilité de 4 \rightarrow troubles mobilité de la 4 \rightarrow \downarrow synth ARN et prot \rightarrow arrêt ou retard mitose \rightarrow retard croissance 4aire

Facteurs de radiosensibilité d'une G:

- radiosensibilité des G dépend des:
 - > condit° de radio-expo
 - > fact. liés à l'environnement
 - > fact. G proprement dits.

VI. Radiosensibilité des G:

> condit° radio-exposition: . Dose en Gy: fractionnée ou non

. Débit de dose: (Gy x h⁻¹): notion de temps +++

. Nature du rayonnement et son E: . EBA: Efficacité biologique relative: coeff. qui compare effets bio provoqués par 2 rayonnements ≠

> Fc liés à l'environnement: présence de radiosensibilisateurs: l'oxygène, la T° augmente l'effet O₂, certaines substances: imidazole, anesthésiq

> Fc cellulaires:

. Contenu en ADN: radiosensibilité varie selon Q d'ADN:

> ↑↑ pour G à nk > ↓↓ pour G à nk.

. Equipement enz: + il est important, mieux la G pourra réaliser la restaurat° des lésions radio induites.

. Phase du cycle Gaire: radiosensibilité est: . Max en phase M (mitose)

Nature des G:

. Min à la fin phase S.

→ radiosensibilité varie d'un T à l'autre:

T. embryo > organes hématopoïétiq > gonades > épiderme > muq intestinal

> TC > TM > TN

Radiopathologie

À l'échelle tissulaire, les AI ont des effets très ≠:

> précoces: déterministes, aigus, à court terme, jours/semaines, fortes doses, seuil, relation dose/effet, obligatoires, réversible

> tardifs: stochastiq, chroniq, à long terme, années, faibles doses, pas de seuil, pas de relation, aléatoires.

1. Effets précoces ou déterministes:

On distingue:

Irradiation

Globale

Partielle

T. sensibles

peau - T adjacents

Pronostic vital (4-4,5 Gy)

Pronostic fonctionnel

Irradiation globale: Dose < 0,2-0,3 Gy: aucun effet

D > 1 Gy, Ed de radiosensit° aigue:

. T critiq est la moelle osseuse
 . mort chez 50% des sujets pour dose létale D₅₀ (DL50) de 4 à 4,5 Gy en une seule fois

→ évolut° stéréotypée en 4 phases

p. prodromique
 1-2 h

p. de latence
 silencieuse:
 5-14 jrs.

période d'état

période de convalescence
 3-6 mois

p. critiq: signes gén hématologiques + infectieux. Mise en jeu du pronostic vital.