


 Université Claude Bernard Lyon 1

Dosimétrie – radiobiologie - radioprotection

Anthime FLAUS
 Service de Médecine Nucléaire

1

1

Plan général

1. Introduction
2. Dosimétrie
 - Dosimétrie externe
 - Dosimétrie interne
2. Radiobiologie
 - Effet déterministe
 - Effet stochastique
3. Radioprotection
 - Travail
 - Patient
 - Public

2

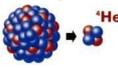
1. Introduction

- Les différents rayonnements ionisants
- L'exposition aux rayonnements ionisants

3

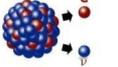
Rappel : les différents rayonnements ionisants

Radioactivité alpha



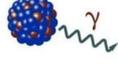
${}^4\text{He}$

Radioactivité bêta



e^-

Radioactivité gamma



γ

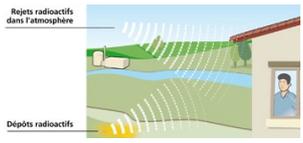
- particules chargées
- Rayonnements électro-magnétiques

Image : <https://www.encyclopedie-environnement.org/physique/radioactivite-reactions-nucleaires/>

4

Rappel : Deux types d'exposition aux rayonnements ionisants

1 - Irradiation pour une exposition externe aux rayonnements ionisants



<https://www.irsn.fr/avisir-comprendre/sante/lesposition-rayonnements-ionisants>

5

Rappel : Deux types d'exposition aux rayonnements ionisants

2 - Contamination pour une exposition interne aux particules radioactives

La source radioactive a pénétré dans l'organisme



Par inhalation de particules radioactives



Par ingestion d'aliments contaminés



Par passage cutané (plaie)

<https://www.irsn.fr/avisir-comprendre/sante/lesposition-rayonnements-ionisants>

6

Problématiques ?

1. Comment quantifier et exprimer la dose reçue ?
2. Quel est l'impact biologique de la dose ?
3. Comment s'en protéger ?

7

Partie 1 : Dosimétrie

1. Introduction : *définition et intérêt de la dosimétrie*
2. Dosimétrie des irradiations par les photons (dosimétrie externe)
3. Dosimétrie interne, liée à l'irradiation par les radionucléides en cas de contamination de l'organisme

8

Objectifs pédagogiques de la partie 1

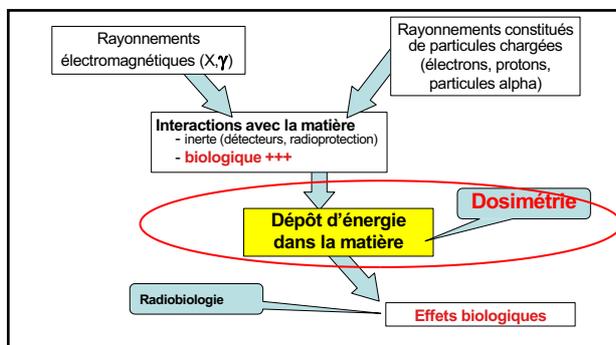
- Comprendre comment l'énergie se dépose dans la matière et les tissus selon les rayonnements en cause (*Cf interactions rayonnements matière*)
- Connaître les principes de **quantification** de cette énergie
- Maîtriser la notion de **dose** reçue (= *délivrée* = *absorbée*)
- Bien faire la différence entre la **dose** et les **conséquences de la dose** (qui dépendent d'autres facteurs que la dose elle-même)
- Ne pas confondre la **dose en Gy (J/kg)** avec la **dose équivalente** (grandeur de radiobiologie) et la **dose efficace** (grandeur utilisée en radioprotection)
- Faire la distinction entre dosimétrie **externe** (photons) et dosimétrie **interne** (contamination par des radionucléides, notion d'hétérogénéité et notion d'activité cumulée)

9

Partie 1 : Dosimétrie

1. **Introduction : définition et intérêt de la dosimétrie**
2. Dosimétrie des irradiations par les photons (dosimétrie externe)
3. Dosimétrie interne, liée à l'irradiation par les radionucléides en cas de contamination de l'organisme

10



11

Dose : définition

- La dose représente une **énergie absorbée par unité de masse**
- Elle s'exprime donc en J/kg et avec une unité qui est le **gray (Gy)** avec $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$
- et donc...
- **La dose ne dépend donc pas du volume (ou de la masse) qui a été irradié**

12

Dosimétrie des irradiations par les photons (dosimétrie externe)

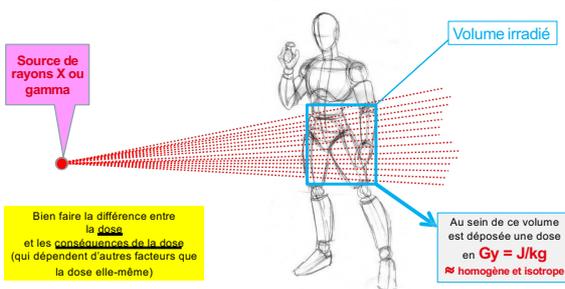
13

Dosimétrie : irradiations « externe »

- **Irradiation « externe »** : conséquence de l'exposition à un faisceau de rayonnements
 - indirectement ionisants : **photons** (et neutrons)
 - obéissant à la loi d'atténuation
 - Agissant à distance

14

Irradiation externe



15

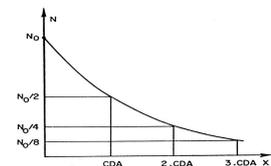
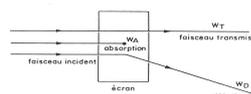
Dosimétrie des faisceaux de photons (X ou γ)

- Énergie **émise** par la source et **transportée** par le faisceau
- Énergie reçue et **transférée** au milieu (par interactions) ou KERMA
- Énergie **absorbée** par le milieu = dose reçue (qui **conditionne les effets biologiques**)

16

Rappel : loi d'atténuation

- $dN = -\mu N dx$
- D'où : $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$



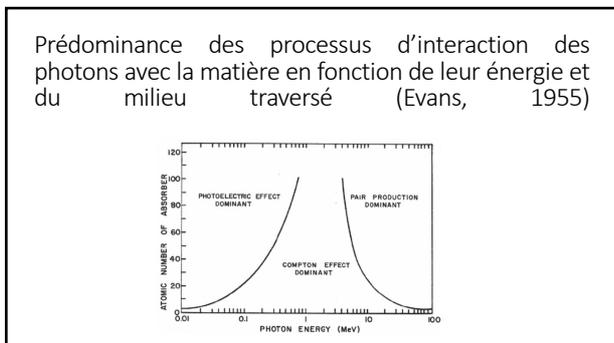
17

Coefficients d'atténuation

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

- Coefficient linéaire d'atténuation : μ (cm⁻¹)
- Coefficient massique d'atténuation : μ/ρ (cm².g⁻¹)
- Ces coefficients représentent la probabilité d'interaction des photons dans le milieu, qui dépend :
 - De l'énergie des photons
 - De la densité du milieu

18



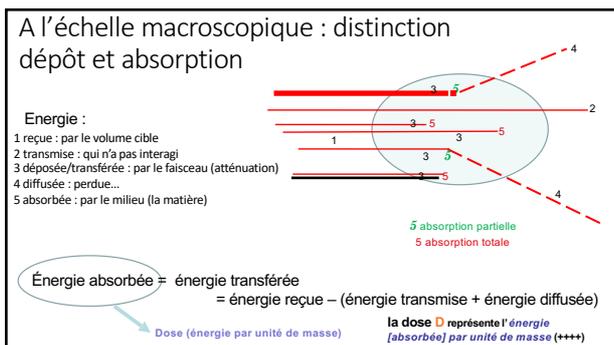
19

Pour les photons < 50 keV l'effet photoélectrique est prédominant et μ_{en}/ρ est proportionnel à Z^3 .

La dose est alors plus élevée dans l'os ($Z=20$ pour le calcium) que dans l'air ($Z_{moyen} = 14,5$) et donc que dans les tissus mous ; inversement la dose dans la graisse est moins élevée que dans l'air ($Z = 12$ pour le carbone et $Z = 1$ pour l'hydrogène).

C'est ce qui explique qu'on puisse voir les os sur une radiographie

20



21

- Calcul et mesure de la dose
- La dose est l'énergie déposée par les photons et absorbée par la matière, en Gy (J/kg)
 - C'est donc la somme, durant un temps donné, de toutes les énergies communiquées par des photons à des électrons du milieu irradié (photoélectrons et électrons Compton)
 - Dans le cas d'une irradiation par des photons, le dépôt d'énergie et donc la dose, peut donc être considéré comme **homogène et isotrope dans un volume élémentaire (donc à l'échelle cellulaire)**
 - Dans un grand volume, la dose diminue avec l'épaisseur de matière traversée, conformément à la loi d'atténuation

22

- Calcul et mesure de la dose
- Le calcul est théoriquement possible, mais en pratique irréalisable faute de pouvoir connaître tous les paramètres
 - On **mesure** donc la dose, en utilisant des **dosimètres** qui peuvent être divers :
 - Chambres d'ionisation (débitmètre type « babyline »)
 - Films
 - Dosimètres électroniques
 - C'est possible lors d'une situation connue et contrôlée (radioprotection, radiothérapie et irradiation médicale, expérimentations..)
 - En revanche en situation accidentelle, par définition les mesures ne peuvent pas être effectuées et on ne peut qu'estimer la dose a posteriori

24

Dose reçue en cas d'exposition à une source radioactive (émettrice gamma)

- Dose absorbée entre $t=0$ et $t=U$ à une distance d d'une source radioactive :

$$D = \int_0^U d(t) \cdot dt = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \times \frac{E}{4 \pi d^2} \int_0^U A(t) dt$$

Énergie Activité de la source

Coefficient massique d'atténuation Surface de la sphère

26

Source de rayons X ou gamma

Volume irradié

Dose Absorbée
 Au sein de ce volume est déposée une dose en **Gy = J/kg**
 ≈ homogène et isotrope

Ne prend pas en compte :
 - le type de rayonnement
 - le type de tissu ou d'organe touché

27

W_R : différence entre fort et faible TEL

Pour une même énergie absorbée, et donc **pour une même dose**, les effets biologiques cellulaires et donc tissulaires seront différents

Facteur qualitatif à prendre en compte

La dose équivalente **n'est pas une grandeur physique**

28

Dose équivalente (H, en sievert)

- C'est la dose pondérée par un facteur tenant compte du type de rayonnement (**facteur de pondération lié au rayonnement**), c'est-à-dire du **pouvoir d'ionisation du rayonnement**, c'est à dire du **TEL (transfert énergie linéique)**
- « il vaut mieux recevoir sur la tête 1 kg de plumes que 1 kg de plomb... »
- Ce n'est pas une grandeur physique, mais une quantité utilisée en radiobiologie, dont l'unité est le **Sievert (Sv)** (Cf chapitre radiobiologie), et qui relativise la gravité, pour une même dose, des dégâts dans les tissus vivants

La dose équivalente est **$H(Sv) = D(Gy) \cdot W_R$**

29

Signification de la dose équivalente (exemple)

- 1 Gy protons aura les mêmes effets que 2 Gy photons
- 1 Gy protons correspond à une dose équivalente de 2 Sv
- 1 Gy photons correspond à une dose équivalente de 1 Sv
- Pour avoir les mêmes effets avec des protons qu'avec des photons, la dose en Gy doit être deux fois moindre

30

Dose efficace (E, en sievert)

- N'est pas une grandeur physique
- Ne s'applique qu'aux effets stochastiques
- Est une « unité » de **RADIOPROTECTION** destinée à évaluer un **risque à long terme** : aucune signification biologique ...
- Est considérée au niveau du corps entier pour toute la vie, en cumulant les irradiations reçues au cours du temps par différentes régions de l'organisme...
- Ne concerne que les **faibles doses**

31

Notion de « dose » efficace

- La dose efficace correspond à la dose équivalente qui, reçue de façon **uniforme par l'ensemble de l'organisme**, entrainerait le **même risque [stochastique]** que des doses équivalentes H différentes reçues par différents organes...
- « Grandeur » de **radioprotection** exclusivement (**non physique, et pas non plus de radiobiologie...**)

32

Dose efficace (E)

- Prend en compte le **risque tardif total** résultant de l'exposition de plusieurs organes ou tissus de radiosensibilité différente vis-à-vis de la cancérogenèse
- N'a de sens que pour les risques *stochastiques*
- $E = \sum (W_T \cdot H_T)$ W_T facteur de pondération tissulaire
- S'exprime en **Sievert (Sv)**
si la dose absorbée s'exprime en Gy
- W_T tient compte des effets à long terme cancérogènes et génétiques (notion de « détriment »)

33

Dosimétrie irradiations « interne »

Dosimétrie interne, liée à l'irradiation par les radionucléides en cas de contamination de l'organisme

- Irradiation « interne » : liée à une contamination de l'organisme par des radionucléides
 - Due essentiellement aux particules chargées
 - Hétérogène, dépendant de la biodistribution et du métabolisme des radionucléide incriminés

34

Secondaire +++ à une contamination par des radionucléides émetteurs de particules chargées

- **Contamination cutanée** : ne concerne que les couches superficielles (= la peau)
 - Contact cutané avec des émetteurs β ou α
- **Contamination interne +++**
 - Administration de molécules radioactives (Médecine Nucléaire)
 - Radiocontamination accidentelle

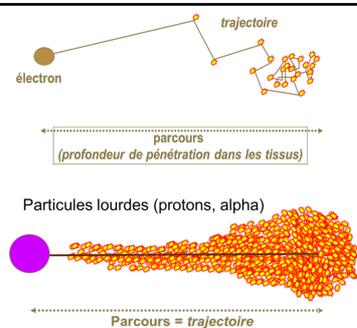
35

Problématique pour la dosimétrie interne

- 1 - Du fait de l'hétérogénéité, le calcul en J/kg, c'est-à-dire en Gy, est beaucoup plus complexe et doit s'envisager à l'échelle cellulaire
- 2 - De plus l'irradiation se fait de façon prolongée et décroissante, et la dose est délivrée au cours du temps après la contamination

36

Rappel :
Trajectoire et parcours des particules chargées



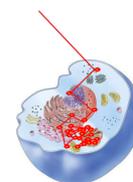
37

Irradiation interne : le dépôt de dose est hétérogène

- Essentiellement due aux particules chargées (β , α), et très peu aux émissions γ ou X associées



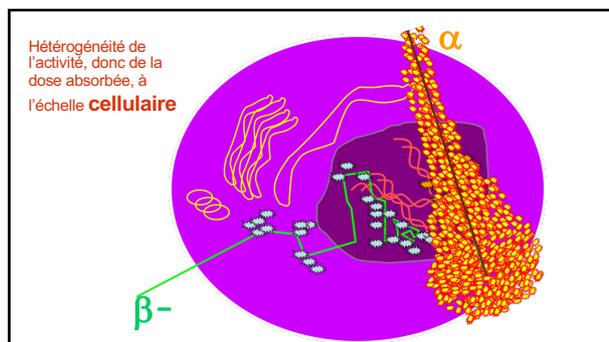
- Les particules chargées délivrent **100 % de leur énergie** dans les tissus



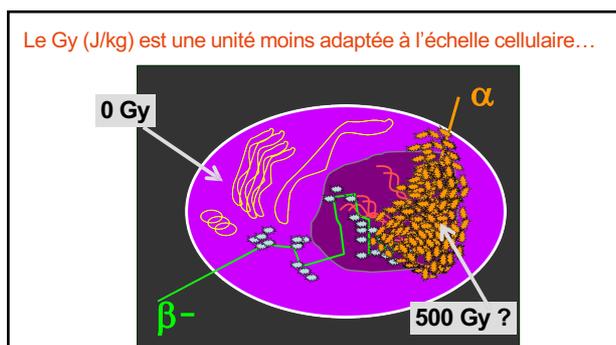
38



39



40



41

- Du fait de l'hétérogénéité, le calcul en J/kg, c'est-à-dire en Gy, est beaucoup plus complexe et doit s'envisager à l'échelle microscopique (cellulaire)

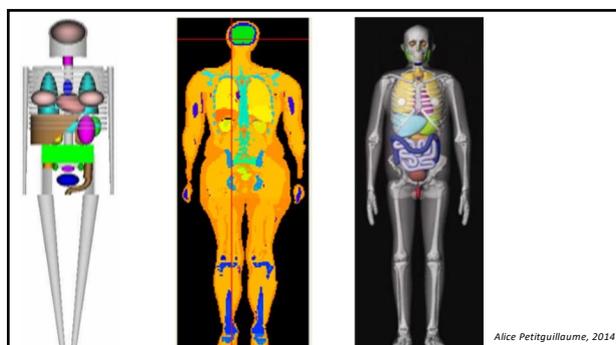
Chaque point du volume est à la fois :

- une source
- et une cible, qui reçoit des rayonnements des points voisins

→ modèles complexes

<https://radiologykey.com/internal-radiation-dosimetry/>

42



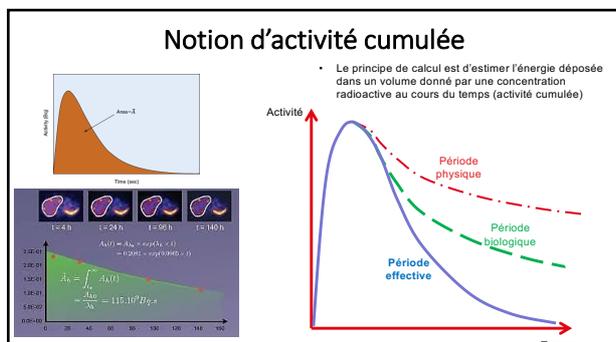
43

Dosimétrie et irradiation internes : variable temporelle

- De plus l'irradiation se fait de façon **prolongée et décroissante**, et la dose est délivrée au cours du temps après la contamination => **Bas débit de dose continu**
- **Débit de dose local** (essentiellement les émissions β - ou α) dépend de
 - De la concentration du radioélément qui varie au cours du temps (métabolisme, élimination)
 - Notion de **période biologique**
 - et de la décroissance radioactive : **période physique**
- **Période effective** T_{eff} $\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{phys}} + \frac{1}{T_{biol}}$

On a toujours $T_{eff} < T_{phys}$ et $T_{eff} < T_{biol}$

44



45

Messages essentiels

- La dose s'exprime en **Gy (J/kg)**
- Raisonement très différent entre dosimétrie externe / interne
- Dose absorbée > dose équivalente > dose efficace

Image: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2e/Doses_relations_simples.svg/288px-Doses_relations_simples.svg.png

46

Partie 2 : Radiobiologie

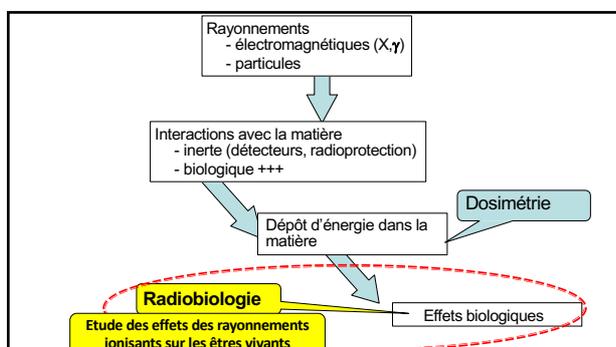
1. Effet déterministe
2. Effet stochastique

48

Objectifs pédagogiques

- Comprendre que les effets biologiques des rayonnements ionisants (RI) dépendent de nombreux facteurs, quantitatifs et qualitatifs
- Comprendre la conséquence essentielle qui est que les RI ne sont pas synonymes d'effets délétères dans tous les cas
- Comprendre que l'organisme est obligatoirement exposé à des RI et parfaitement adapté à cette irradiation « naturelle »
- Comprendre les mécanismes et les conséquences des effets radiobiologiques sur les cellules, les tissus et l'organisme, et les effets délétères possibles (radiopathologie)

49



50

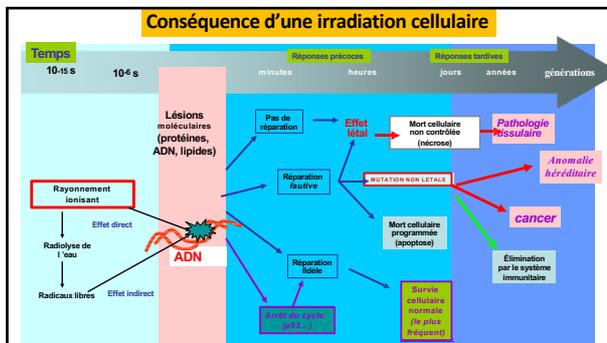
Radiobiologie : plusieurs distinctions à faire

- Les effets sont à envisager au niveau :
 - Cellulaire
 - Tissulaire
 - Des organes
 - De l'organisme
 - (trans-générationnel = effets « génétiques », héréditaires, actuellement considérés comme inexistantes)
- En distinguant les effets
 - Déterministes
 - Stochastiques

51

- ### Points importants
- Effets des rayonnements ionisants n'est pas synonyme de dangerosité
 - Les effets d'une irradiation doivent être évalués en fonction
 - de données quantitatives et qualitatives relatives aux rayonnements
 - des données de biologie cellulaire et tissulaire, ainsi que des systèmes de défense de l'organisme (immunité)
 - Il est fondamental de distinguer les effets **déterministes** (pour des doses élevées) et les effets **stochastiques** (qui font discuter la dangerosité des faibles et très faibles doses)

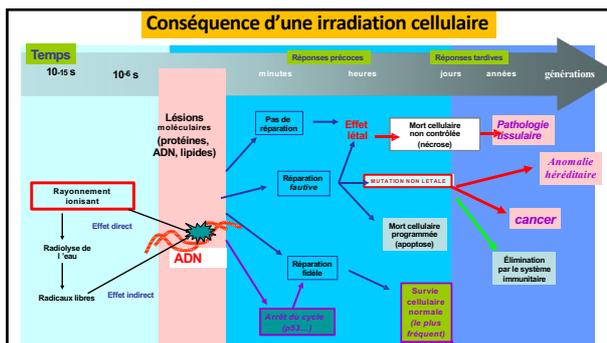
52



53

- ### Effets moléculaires des radiations
- **Ionisations (et excitations)** des molécules à l'intérieur des cellules
 - Directes des molécules d'intérêt biologique (protéines)
 - Indirectes par radiolyse de l'eau : radicaux libres fugaces mais très réactifs
 - soit oxydants : HO[•]
 - soit réducteur : H[•]
 - **Puis trois possibilités**
 - Recombinaison en composés inertes (HO[•] + H[•] → H₂O et H[•] + H[•] → H₂)
 - Diffusion et altérations moléculaires (oxydations, rupture de liaisons)
 - Radical H₂O^{•+} et hydroperoxydes R-O-O-H[•] : oxydants persistants à vie « longue »
- lésions moléculaires
- Rôle +++ de l'oxygénation tissulaire pour la formation de peroxyde pour des TEL faibles (photons, électrons).

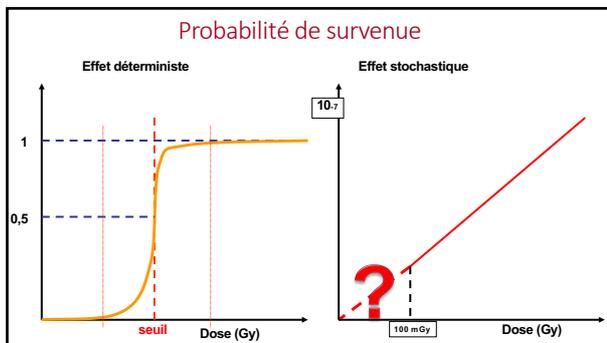
54



56

- ### Effets des rayonnements : Il faut distinguer (notion essentielle)
- **les effets déterministes**
 - immédiats (précoces) mais souvent séquelles à long terme
 - ♦ survenant toujours au dessus d'un seuil de dose
 - ♦ gravité proportionnelle à la dose (dose absorbée/équivalente)
 - **les effets stochastiques**
 - ♦ tardifs
 - ♦ « aléatoires » : notion de risque (probabilité accrue mais faible de survenue (par rapport à la population générale))
 - ♦ dépourvus de seuil ??
 - ♦ gravité indépendante de la dose mais fréquence qui augmente avec la dose
 - ♦ notion d'instabilité génétique et de susceptibilité individuelle

57



58

Ces effets dépendent :

- **Pour les effets déterministes**
 - De la dose en Gy (J/kg)
 - Du type de rayonnement (Cf notion de *dose équivalente* en Sv)
 - Du débit de dose +++
 - Des tissus concernés
 - Du volume irradié (de faible à corps entier)
- **Pour les effets stochastiques**
 - De la dose
 - Du débit de dose
 - Du cumul des doses... dans le temps et l'espace (Cf notion de « dose efficace »)

59

Effets déterministes

- Les effets déterministes sont dus à la destruction d'une proportion significative de cellules d'un tissu ou d'un organe. Pour qu'ils se manifestent, il faut que le taux de cellules détruites soit suffisant pour excéder les capacités de réparation du tissu ou de l'organe.

Loi de Bergonié et Tribondeau

En 1906, Bergonié et Tribondeau ont montré que la radiosensibilité d'une cellule varie :

- proportionnellement à sa capacité de division
- inversement proportionnellement à son degré de différenciation.

60

Effets tissulaires des rayonnements

- Dépendent du pourcentage de cellules touchées
- Possibilité de réparation complète
- Effets immédiats, déterministes, de gravité proportionnelle à la dose...
- Conséquences plus ou moins tardives, possibilité de séquelles (liées à des phénomènes de fibrose)

61

Effet sur les différents organes

- Les effets déterministes sont liés aux doses élevées
- Il existe un seuil pour chaque organe
- Effets immédiats / traduction clinique différée / séquelles
- La gravité d'une irradiation dépend de :
 - La **dose**
 - Le **débit de dose**
 - Le **volume irradié**
 - Les **tissus et organes concernés**
- Cas extrême : irradiation **corps entier**

La gravité de l'irradiation dépend aussi de la qualité des rayonnements : « dose » équivalente en Sv

62

Exemple de seuil pour les effets déterministes

- Pour des doses faibles, inférieures à une valeur seuil dépendant essentiellement du type d'effet biologique, **aucun effet** n'est décelable.
- On commence à observer certains effets déterministes aux alentours de **0,3 Gy** pour des expositions partielles.
- Pour une **exposition globale [corps entier]**, on prend la **valeur référence de 0,5 Gy** comme valeur seuil.
- A partir d'une certaine dose absorbée (environ **2 Gy**), pour une exposition globale, il y a un **risque de décès**.
- On appelle la dose létale 50 % (DL50), la dose absorbée, pour l'organisme entier (donc une exposition globale), pour laquelle la probabilité de décéder soixante jours après l'exposition, sans traitement médical, est de 50 %. Elle est égale à **4,5 Gy**.

D'après : <https://www.asn.fr/informer/Dossiers-pedagogiques/Les-effets-des-rayonnements-ionisants>

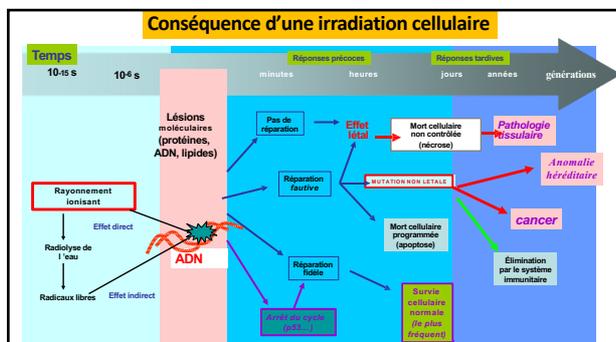
63

Exemple



Dose (en Gy)	1	5	10	20	50
Atteinte de la peau		ROUGEURS	BRULURES	NECROSE	

64



65

Effets stochastiques

- Les cellules et l'organisme sont adaptés et capables de résister aux effets délétères des rayonnements
- Toutes les lésions moléculaires et cellulaires n'ont pas obligatoirement des conséquences
- Il faudrait donc des doses suffisamment élevées (> 100 mGy) pour que les mécanismes de réparation et de défense soient dépassés (réparation ADN, apoptose radio-induite, surveillance immunitaire).
- Dans ce cas, une cellule dont l'ADN a été lésé et qui n'a pas été éliminée peut conduire, après un délai assez long, à un cancer

66

Effets stochastiques

- La difficulté de démontrer les effets stochastiques:
 - Les cancers qui frappent entre 25 et 30 % de la population en terme de mortalité, ont des causes multiples et des origines multifactorielles
 - On n'est donc pas capables d'observer les cancers radio induits, mais seulement une sur-incidence (qui augmente avec la dose) avec probablement un seuil

Ce qui est connu

- le délai d'apparition est de 2 à 3 ans pour les leucémies, de 5 à 30 ans pour les autres cancers avérés aux doses > 200 mSv
- au dessous de 0,2 Sv, aucune étude épidémiologique ne révèle de manière catégorique des cancers en excès
- au dessus de 0,5 Sv, la fréquence des **cancers en excès** augmente avec la dose

67

Ce qui est discuté

- **Au dessous de 200 mSv, aucune étude épidémiologique ne démontre de manière catégorique des cancers en excès**
- **Deux possibilités :**
 - Postuler que les doses < 200 mSv induisent des cancers avec une très faible fréquence : RLSS (intérêt en radioprotection +++)
 - Admettre qu'il existe un seuil en se référant aux données récentes de radiobiologie

68

Partie 3: Radioprotection

1. Travailleur
2. Patient
3. Public

69

Objectifs pédagogiques

- Connaître les grands principes des moyens de radioprotection :
 - Vis-à-vis de l'exposition aux rayons X et gamma
 - Vis-à-vis de la radio-contamination
- Comprendre les particularités pour chaque catégorie : travailleur, patient et public
- Distinguer gestion des effets déterministes et prévention des effets stochastiques
- Savoir expliquer les principes de **justification** et d'**optimisation** et de **limitation**. Comprendre qu'il n'y a **pas de limitation** des doses en pour les patients

70

Les 3 grands principes de la radioprotection IRSN

- **Justification**
- **Optimisation**
- **Limitation**

(Code de la Santé Publique)

LE PRINCIPE DE JUSTIFICATION
 « Une activité nucléaire ou une intervention ne peut être entreprise ou exercée que si elle est justifiée par les avantages qu'elle procure, notamment en matière sanitaire, sociale, économique ou scientifique, rapportés aux risques inhérents à l'exposition aux rayonnements ionisants auxquels elle est susceptible de soumettre les personnes »
 Il faut retenir que le respect de ce principe n'est pas uniquement fonction du niveau de dose auquel peut conduire la pratique.
 Le principe de justification, quand il est établi, est entériné par une autorisation administrative.

LE PRINCIPE D'OPTIMISATION
 Parfois dénommé ALARA, son acronyme anglais (« as low as reasonably achievable »), le principe d'optimisation est à mettre en œuvre une fois la justification établie.
 « L'exposition des personnes aux rayonnements ionisants résultant d'une de ces activités ou interventions doit être maintenue au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de l'état des techniques, des facteurs économiques et sociaux et, le cas échéant, de l'objectif [médical recherche] »

PRINCIPE DE LIMITATION
 « L'exposition d'une personne aux rayonnements ionisants résultant d'une de ces activités ne peut porter la somme des doses reçues au-delà des limites fixées par voie réglementaire, sauf lorsque cette personne est l'objet d'une exposition à des fins médicales ou de recherche biomédicale. »
 Ces limites ne sont pas les mêmes en fonction des catégories de population (travailleurs, public).

71

Partie 3: Radioprotection

1. **Travailleur: code du travail**
 - Ne faire courir aucun risque lié au travail
 - Utilisation licite de la RLSS
2. **Patient**
3. **Public**

72

Radioprotection des travailleurs (Code du Travail + Code de la Santé Publique)

- Effets déterministes : doivent être évités à 100 %
- Effets stochastiques : attitude préventive de principe
 - Justification
 - Optimisation
 - Limitation
- Seuil de prévention ≠ seuil de dangerosité

73

- La radioprotection des travailleurs s'attache à **éliminer tout danger** lié à l'irradiation, en **réduisant au maximum le risque** d'irradiation.
 - Dans ce contexte toute dose même la plus faible doit être évitée au maximum, même sans être dangereuse
 - Principe de **limitation** en plus des principes de **justification** et d'**optimisation** : **valeurs limites d'exposition**
- La radioprotection des travailleurs impose des **contraintes d'organisation** du travail (études de poste, zonage, aménagements des locaux et outils de travail)
- L'efficacité de la radioprotection des travailleurs est vérifiée par une **surveillance dosimétrique individuelle** continue

74

Valeurs limites d'exposition professionnelle

Limites d'exposition sur un an consécutif

	Catégorie A	Catégorie B et jeunes travailleurs	Population générale
Corps entier (dose efficace)	20 mSv	6 mSv	1 mSv
Peau (dose équivalente sur tout cm ²)	500 mSv	150 mSv	50 mSv
Cristallin (dose équivalente)	20mSv	15 mSv	15 mSv
Main, poignet, pied, cheville (dose équivalente)	500 mSv	150 mSv	non existante

Tableau : <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/sante/modalites-surveillance-exposition-travailleurs>

75

Principes de radioprotections

- Justification
- **Optimisation**
- Limitation

Visé à toujours diminuer les doses, même quand celles-ci sont inférieures aux limites admissibles, à condition de ne pas entraîner de conséquences déraisonnables (coût excessif, induction d'autres risques...)

Principe « ALARA » : « As Low As Reasonably Achievable »

76

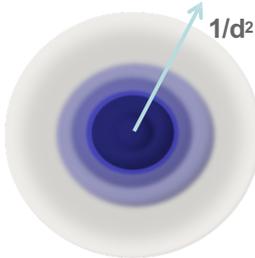
Moyens de radioprotections contre l'irradiation

- Risque : rayons X issus d'un générateur ou rayons gamma issus d'une source radioactive
- Moyens à utiliser :
 - DISTANCE +++
 - TEMPS
 - ECRANS atténuateurs (jamais à 100 %)

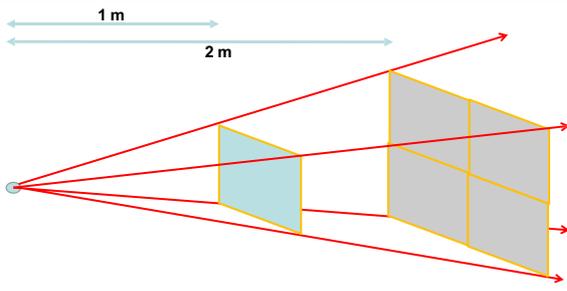
77

DISTANCE

- Le plus efficace : la dose diminue comme la distance au carré
- Doubler la distance = diminuer le débit de dose par 4
- Passer de 1m à 10 m de la source = diviser le débit de dose par 100



78



Distance : 40 µSv/h à 1m → 10 µSv/h à 2m

79

TEMPS

- Pour un débit de dose donné, et à une distance donnée, la dose augmente proportionnellement au temps d'exposition à la source
 - Ex : 10 mSv/h à 1m : un sujet exposé placé à 2 m recevra une dose de 2,5 mSv au bout d'une heure et de 5 mSv au bout de 2h
- NB : pour l'exposition à une source radioactive, tenir compte de la décroissance si la période est courte

80

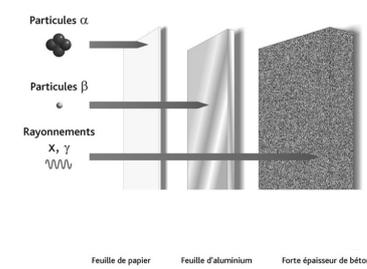
Ecrans (plombés)

- Écrans fixes, écrans mobiles, paravents, tabliers, ...

(Rappel : la CDA dépend de l'énergie...)



81



Particules α

Particules β

Rayonnements X, γ

Feuille de papier Feuille d'aluminium Forte épaisseur de béton

82

Protection à distance contre les différents rayonnements

Rayonnements	Distance maximale parcourue dans l'air	Distance maximale parcourue dans les tissus	Écrans à utiliser
Alpha	Quelques dizaines de microns	Quelques microns	Papier
Béta faible énergie	Quelques cm	Quelques mm	Feuille plastique, aluminium (équivalent eau)
Béta forte énergie	Quelques m	Quelques cm	Plexiglas, aluminium (équivalent eau)
X, gamma	« infini » (plusieurs dizaines à centaines de m)	Quelques dizaines de cm	Plomb
X de haute énergie, neutrons	« infini » (plusieurs km)	Pas de limite...	Béton (plusieurs m)

83

Moyens de radioprotections contre la contamination

- Concerne les sources radioactives « non scellées »
- Risque lié surtout aux émissions bêta et alpha
- Problématique : empêcher toute contamination de la peau et toute pénétration dans l'organisme (contamination interne)

84



85

Importance de la surveillance: dosimétrie

- Mesurer la dose reçue et attribuer une valeur aux grandeurs telles que "dose équivalente" ou "dose efficace"
- Exposition externe : se mesure à l'aide de dosimètre portés par les travailleurs



- Exposition interne : difficile à mesurer

86

- La radioprotection des travailleurs s'attache à **éliminer tout danger** lié à l'irradiation, en **réduisant au maximum le risque** d'irradiation.
 - Dans ce contexte toute dose même la plus faible doit être évitée au maximum, même sans être dangereuse
 - Principe de **limitation** en plus des principes de **justification** et d'**optimisation** : **valeurs limites d'exposition**
- La radioprotection des travailleurs impose des **contraintes d'organisation** du travail (études de poste, zonage, aménagements des locaux et outils de travail)
- L'efficacité de la radioprotection des travailleurs est vérifiée par une **surveillance dosimétrique** continue

• On ne se protège pas du tout de la même façon vis-à-vis d'une **irradiation externe** et vis-à-vis d'un **risque de contamination**

87

Partie 3: Radioprotection

1. Travailleur
2. Patient
 - **Balance bénéfice/risque**
3. Public

88

Radioprotection des patients

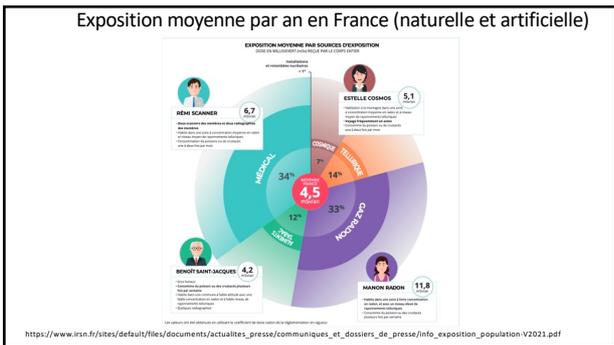
- Notion essentielle : **balance bénéfice risque**
- Justification
- Optimisation : Minimiser les doses tout en maintenant la **meilleure qualité diagnostique** (prévention des effets stochastiques)
- **Pas de limitation !**
- **Prevention des effets déterministes**
 - Examens diagnostiques ne délivrent pas de doses suffisantes
 - 2 cas particuliers: radiothérapie et radiologie interventionnelle => Accepter les effets déterministes quand inévitables, au vu d'un bénéfice pour le patient qui le justifie
- **Prevention des effets stochastiques chez les patients**
 - La plupart des examens diagnostiques délivrent des doses < 100 mSv
 - Raisonnement très différent par rapport à la radioprotection des travailleurs

89

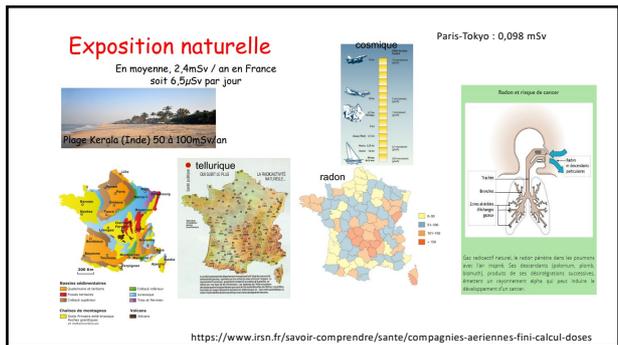
Partie 3: Radioprotection

1. Travailleur
2. Patient
3. **Public**
 - "risque zero"
 - Mesures collectives...

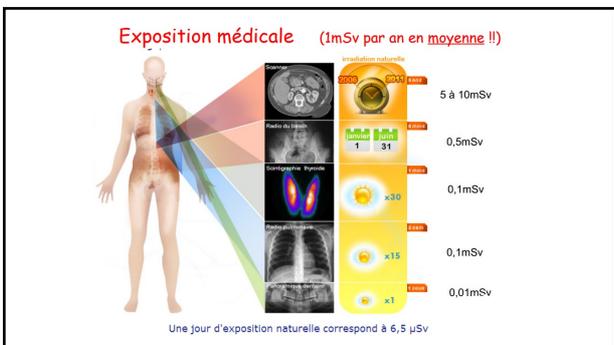
90



91



92



93

QCM: Radioprotection - radiobiologie

94

#1

- Dosimétrie, quelles sont les réponses justes:
- A. L'activité d'une source est mesurée en Curie Ci
- B. L'activité d'une source est mesurée en Sievert Sv
- C. L'activité d'une source est mesurée en Becquerel Bq
- D. Le Gray est une énergie absorbée par unité de masse
- E. Le Curie est une unité du système international

95

95

#1

- Dosimétrie, quelles sont les réponses justes:
- A. L'activité d'une source est mesurée en Curie Ci
- B. L'activité d'une source est mesurée en Sievert Sv **Faux unité de radioprotection dérivée du Gray**
- C. L'activité d'une source est mesurée en Becquerel Bq = nombre de désintégrations par seconde
- D. Le Gray est une énergie absorbée par unité de masse
- E. Le Curie est une unité du système international **Faux le Curie est une unité encore utilisée pour quantifier l'activité mais l'UI est le Bq**

96

96

#2

Radiobiologie, quelles sont les réponses justes:

- A. Les effets stochastiques sont immédiats
- B. Les effets stochastiques ont une gravité proportionnelle à la dose
- C. Les effets déterministes surviennent toujours au-dessus d'un seuil
- D. Les effets moléculaires des radiations passent par des ionisations directes des molécules d'intérêt biologique ou indirectes par radiolyse de l'eau
- E. Pour les TEL faible, la formation de peroxyde dépend de la présence d'oxygène

97

97

#2

Radiobiologie, quelles sont les réponses justes:

- A. Les effets stochastiques sont immédiats **FAUX les effets stochastiques sont tardifs**
- B. Les effets stochastiques ont une gravité proportionnelle à la dose **FAUX notion de seuil discuté / gravité indépendante de la dose mais fréquence qui augmente avec la dose**
- C. Les effets déterministes surviennent toujours au-dessus d'un seuil
- D. Les effets moléculaires des radiations passent par des ionisations directes des molécules d'intérêt biologique ou indirectes par radiolyse de l'eau
- E. Pour les TEL faible, la formation de peroxyde dépend de la présence d'oxygène

98

98

3

Après l'apparition de lésions moléculaires ou cellulaires :

- A. Il peut y avoir une réparation fidèle des lésions et il s'agit du cas le plus fréquent
- B. Il peut y avoir une absence de réparation qui entrainera la mort cellulaire
- C. Une réparation fautive peut entrainer la mort cellulaire
- D. Une cellule transformée donne systématiquement un cancer
- C. Toutes les lésions moléculaires et cellulaires n'ont pas obligatoirement de conséquences

99

99

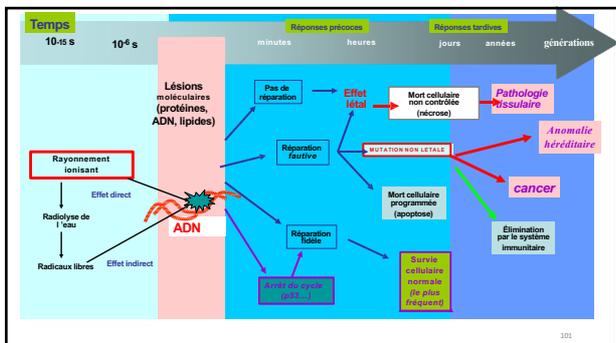
3

Après l'apparition de lésions moléculaires ou cellulaires :

- A. Il peut y avoir une réparation fidèle des lésions et il s'agit du cas le plus fréquent
- B. Il peut y avoir une absence de réparation qui entrainera la mort cellulaire
- C. Une réparation fautive peut entrainer la mort cellulaire
- D. Une cellule transformée donne systématiquement un cancer
- C. Toutes les lésions moléculaires et cellulaires n'ont pas obligatoirement de conséquences

100

100



101

4

Une source ponctuelle de rayonnement X de débit de dose constant, estimée à 90µGy/h à 1 m
 On donne CDA Pb=1.3 mm. Le sujet se trouve à 2m de la source, derrière un écran d'épaisseur de 1CDA
 Parmi les propositions suivantes, quelle est la mesure la plus efficace pour réduire la dose absorbée liée à l'irradiation par cette source :

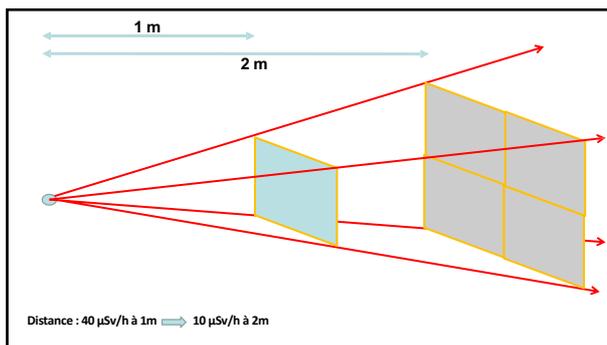
- A. Doubler la distance par rapport à la source
- B. Doubler l'épaisseur de l'écran protecteur derrière lequel le sujet se tient (1CDA=>2CDA)
- C. Diminuer par deux le temps pendant lequel le sujet est exposé
- D. Toutes ces mesures ont la même efficacité
- E. Aucune de ces mesures n'est efficace pour réduire la dose absorbée

102

DISTANCE

- Le plus efficace : la dose diminue comme la distance au carré
- Doubler la distance = diminuer le débit de dose par 4
- Passer de 1m à 10 m de la source = diviser le débit de dose par 100

103



104

TEMPS

- Pour un débit de dose donné, et à une distance donnée, la dose augmente proportionnellement au temps d'exposition à la source
 Ex : 10 mSv/h à 1m : un sujet exposé placé à 2 m recevra une dose de 2,5 mSv au bout d'une heure et de 5 mSv au bout de 2h
- NB : pour l'exposition à une source radioactive, tenir compte de la décroissance si la période est courte

105

Ecrans (plombés)

- Écrans fixes, écrans mobiles, paravents, tabliers, ...

(Rappel : la CDA dépend de l'énergie...)

Etc.

106

4

90 µGy/h à 1m

1 CDA

2 m

Une source de rayonnement gamma ponctuel de débit de dose constant, estimée à 90 µGy/h à 1 m
On donne CDA Pb=1.3 mm. Le sujet se trouve à 2m de la source, derrière un écran d'épaisseur de 1CDA
Parmi les propositions suivantes, quelle est la mesure la plus efficace pour réduire la dose absorbée liée à l'irradiation par cette source

- A. Doubler la distance par rapport à la source (divise la dose par 4)
- B. Doubler l'épaisseur de l'écran protecteur derrière lequel le sujet se tient (1CDA=>2CDA) divise par 2
- C. Diminuer par deux le temps pendant lequel le sujet est exposé divise par 2
- D. Toutes ces mesures ont la même efficacité Faux
- E. Aucune de ces mesures n'est efficace pour réduire la dose absorbée Faux elles permettent tous de réduire la dose

107

107

#5

Soit A_1, A_2, A_3 la dose absorbée corps entier reçue par le patient dans les situations 1, 2 et 3

- A. A_1 est supérieure à A_2
- B. A_3 est égale à A_2
- C. $A_3 = A_1 / 8$
- D. $A_3 = A_1 / 4$
- E. $A_3 = A_2 / 2$

108

108

#5

Soit A_1, A_2, A_3 la dose absorbée corps entier reçue par le patient dans les situations 1, 2 et 3

- A. A_1 est supérieure à A_2
- B. A_3 est égale à A_2
- C. $A_3 = A_1 / 8$ $A_2 = A_1$
- D. $A_3 = A_1 / 4$ $A_3 = A_1 / 2 = A_2 / 2$
- E. $A_3 = A_2 / 2$

109

109

#6

Quelle est la période effective de l'iode 131 sachant que la période physique est de 8,02 jours et la période biologique est de 140 jours ?

- A. 140 jours
- B. 8,02 jours
- C. 5,3 heures
- D. 1500,4 jours
- E. 7,6 jours

110

110

Dosimétrie et irradiation internes

- De plus l'irradiation se fait de façon **prolongée et décroissante**, et la dose est délivrée au cours du temps après la contamination => **Bas débit de dose continu**
- Débit de dose local** (essentiellement les émissions β ou α) dépend de
 - De la concentration du radioélément qui varie au cours du temps (métabolisme, élimination)
 - Notion de **période biologique**
 - et de la décroissance radioactive : **période physique**
- Période effective T_{eff}** :
$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{phys}} + \frac{1}{T_{biol}}$$

On a toujours $T_{eff} < T_{phys}$ et $T_{eff} < T_{biol}$

111

111

Notion d'activité cumulée

Activité

Temps

Période physique

Période biologique

Période effective

112

112

#6

Quelle est la période effective de l'iode 131 sachant que la période physique est de 8,02 jours et la période biologique est de 140 jours ?

- A. 140 jours
- B. 8,02 jours
- C. 5,3 heures
- D. 1500,4 jours
- E. 7,6 jours

Réponse E

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{\text{phys}}} + \frac{1}{T_{\text{bio}}}$$

$$1 / T_{\text{eff}} = T_{\text{bio}} / (T_{\text{phys}} \times T_{\text{bio}}) + T_{\text{phys}} / (T_{\text{bio}} \times T_{\text{phys}})$$

$$T_{\text{eff}} = (T_{\text{phys}} \times T_{\text{bio}}) / (T_{\text{phys}} + T_{\text{bio}})$$

$$= (8 \times 140) / (8 + 140) = 7,57 \text{ jours} < 8 \text{ jours}$$

113

113

7

Radioprotection des travailleurs : ces vêtements de protection des liquidateurs de Tchernobyl les protègent:

- A. De l'irradiation
- B. De la contamination externe
- C. De la contamination interne
- D. Aucune réponse n'est exacte



114

114

7

Radioprotection des travailleurs : ces vêtements de protection des liquidateurs de Tchernobyl les protègent:

- A. De l'irradiation
- B. De la contamination externe
- C. De la contamination interne
- D. Aucune réponse n'est exacte



115

115

8

Parmi ces propositions, lesquelles sont des principes fondamentaux de radioprotection patients:

- A. La justification
- B. La réduction du temps d'exposition
- C. L'interposition d'écran
- D. l'optimisation
- E. Aucune réponse n'est exacte

116

116

8

Parmi ces propositions, lesquelles sont des principes fondamentaux de radioprotection patients:

- A. La justification
- B. La réduction du temps d'exposition
- C. L'interposition d'écran
- D. l'optimisation
- E. Aucune réponse n'est exacte

117

117

9

Un patient peut recevoir, par an, AU PLUS, une dose équivalente de:

- A. 20 Sv
- B. 150 mSv
- C. 20 mSv
- D. 1 mSv (dose dite « public »)
- E. Aucune réponse n'est exacte

118

118

9

Un patient peut recevoir, par an, AU PLUS, une dose équivalente de:

- A. 20 Sv
- B. 150 mSv
- C. 20 mSv
- D. 1 mSv (dose dite « public »)
- E. Aucune réponse n'est exacte

119

119

Radioprotection des patients

- Notion essentielle : **balance bénéfique risque**
- Justification
- Optimisation : Minimiser les doses tout en maintenant la **meilleure qualité diagnostique** (prévention des effets stochastiques)
- **Pas de limitation !**
- **Prévention des effets déterministes**
 - Examens diagnostiques ne délivrent pas de doses suffisantes
 - 2 cas particuliers: radiothérapie et radiologie interventionnelle => Accepter les effets déterministes quand inévitables, au vu d'un bénéfice pour le patient qui le justifie
- **Prévention des effets stochastiques chez les patients**
 - La plupart des examens diagnostiques délivrent des doses < 100 mSv
 - Raisonement très différent par rapport à la radioprotection des travailleurs

120

120

#10

La dose absorbée par unité d'activité administrée par la thyroïde pour un homme adulte est de 3200 $\mu\text{Gy}/\text{MBq}$ pour une scintigraphie thyroïdienne à l'I-123. Lors de l'examen, on injecte 10MBq. Le facteur de pondération lié au rayonnement W_R est 1. Le facteur de pondération tissulaire W_T , selon l'ICRP 2007 est de 0,04. Quelle dose absorbée, la dose efficace et la dose équivalente reçue par la thyroïde ?

121

121

#10

- La dose est l'énergie déposée par les photons et absorbée par la matière, en Gy (J/kg)
- $D = 32 \text{ mGy}$
- La dose équivalente permet de prendre en compte la nature du rayonnement
- $H = 32 \times 1 = 32 \text{ mSv}$
- La dose efficace est une grandeur de radioprotection
- $E = 32 \times 0.04 = 1.28 \text{ mSv}$

122

122

References

- Remerciements au Pr Vuillez

123

123