


 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

2

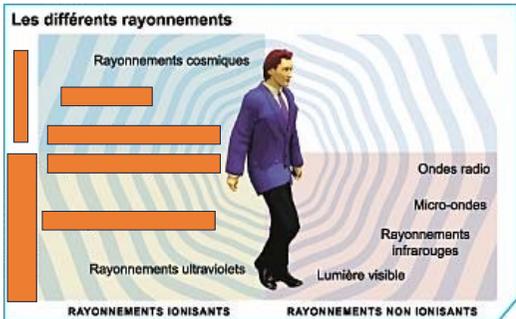
## 1. Introduction

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

3

3

## Rappel : les différents rayonnements ionisants



Les différents rayonnements

Rayonnements cosmiques  
 Ondes radio  
 Micro-ondes  
 Rayonnements infrarouges  
 Lumière visible  
 Rayonnements ultraviolets

RAYONNEMENTS IONISANTS      RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Image : <https://www.encyclopedie-environnement.org/physique/radioactive-reactions-nucleaires/>  
<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/radioactive/homme-rayonnements.aspx?type=Chapitre&numero=1>

4

4

Rappel : Deux types d'exposition aux rayonnements ionisants

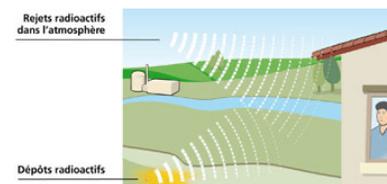
- 1 - Irradiation pour une exposition externe aux rayonnements ionisants
- 2- Contamination pour une exposition interne aux particules radioactives

<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/sante/lexposition-rayonnements-ionisants>

5

Rappel : Deux types d'exposition aux rayonnements ionisants

- 1 - Irradiation pour une exposition externe aux rayonnements ionisants



<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/sante/lexposition-rayonnements-ionisants>

6

Rappel : Deux types d'exposition aux rayonnements ionisants

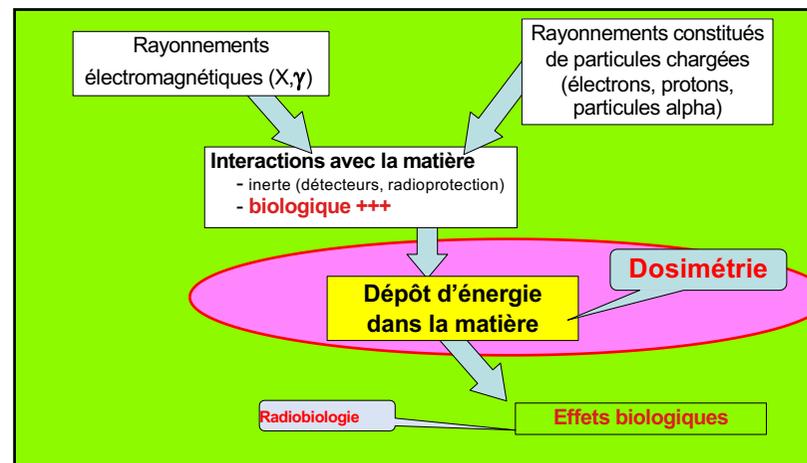
- 2 - Contamination pour une exposition interne aux particules radioactives

La source radioactive a pénétré dans l'organisme



<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/sante/lexposition-rayonnements-ionisants>

7



8

## Problématiques ?

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

9

## Partie 1 : Dosimétrie

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

10

## 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**

11

## Pourquoi quantifier l'énergie ?

- pour estimer la dose reçues par les patients au cours d'examen utilisant des rayonnements ionisants
- pour optimiser les protocoles de traitement en radiothérapie en prévoyant l'énergie qui sera absorbée par les tissus tumoraux et les tissus sains
- pour la surveillance des personnes que leur profession expose aux rayonnements ionisants
- pour établir des normes de radioprotection individuelle ou collective

12

## Dosimétrie externe : irradiations par les photons

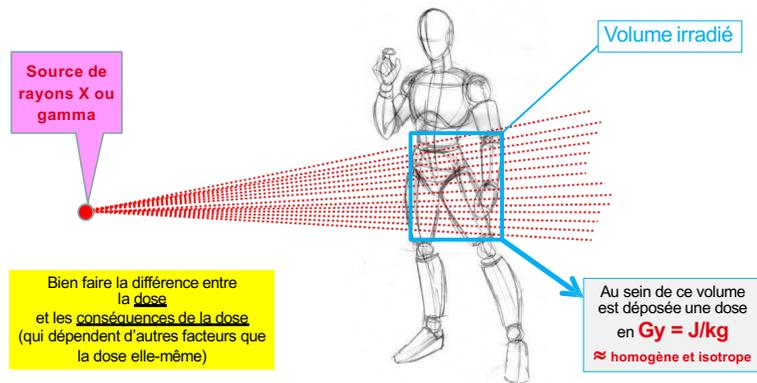
13

## 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 $\gamma$ )

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

16

### Rappel : loi d'atténuation

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

- Coefficient linéaire d'atténuation :  $\mu$  (cm<sup>-1</sup>)
- Coefficient massique d'atténuation :  $\mu/\rho$  (cm<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>)

- Ces coefficients représentent la probabilité d'interaction des photons dans le milieu, qui dépend :
  - De l'énergie des photons
  - De la densité du milieu

Figure 14-7 Atténuation d'un faisceau de photons

17

### Prédominance des processus d'interaction des photons avec la matière en fonction de leur énergie et du milieu traversé (Evans, 1955)

18

Pour les photons < 50 keV l'effet photoélectrique est prédominant et  $\mu_{en}/\rho$  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

19

### A l'échelle macroscopique : distinction dépôt et absorption

**Energie :**

- 1 reçue : par le volume cible
- 2 transmise : qui n'a pas interagi
- 3 déposée/transférée : par le faisceau (atténuation)
- 4 diffusée : perdue...
- 5 absorbée : par le milieu (la matière)

Énergie absorbée = énergie transférée  
 = énergie reçue - (énergie transmise + énergie diffusée)

Dose (énergie par unité de masse)

la dose D représente l'énergie [absorbée] par unité de masse (++++)

20

## 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

21

## 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.
- 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

22

## • Dose absorbée en un temps $\tau$ près d'une source radioactive :

- nombre de photons émis dans tout l'espace à l'instant  $t$  :

$$A(t) = A_0 2^{-t/T} = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Activité de la source}$$

- débit de photons dans une section  $dS$  de la cible :

$$\frac{dN}{dt} = A(t) \times \frac{dS}{4\pi d^2} \quad \text{Surface de la sphère}$$

- flux d'énergie incidente dans cette section  $dS$  :

$$\frac{dE}{dt} = E \times \frac{dN}{dt} = E \times A(t) \times \frac{dS}{4\pi d^2}$$

- débit de dose à la cible :

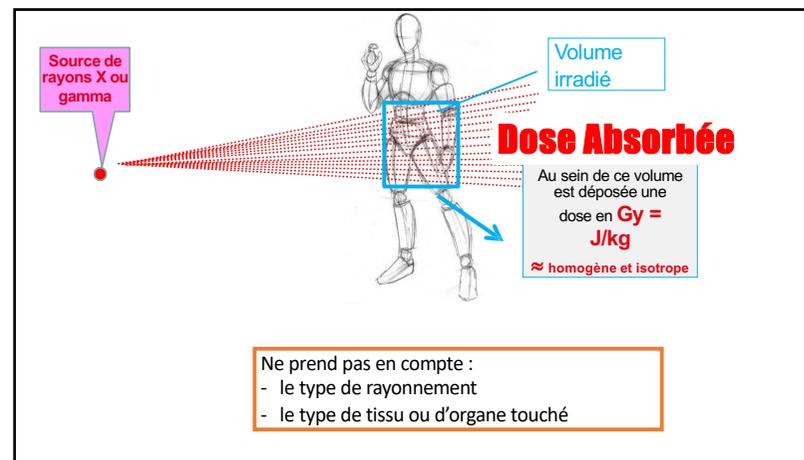
$$d(t) = \frac{\mu^*}{\rho} \times \frac{dE}{dt} \times \frac{1}{dS} = \left( \frac{\mu^*}{\rho} \right) \times \frac{E \times A(t)}{4\pi \times d^2}$$

Coefficient massique d'atténuation

- dose à la cible :

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

23

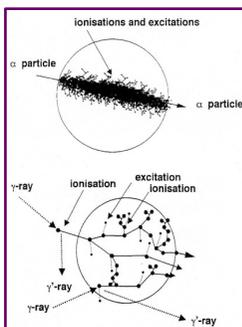


24

## Importance du type de rayonnement

$\Rightarrow W_R$

différence entre fort et faible TEL



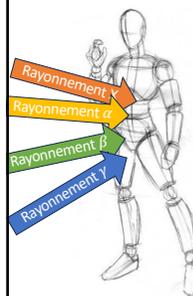
Pour une même énergie absorbée, et donc pour une même dose, les effets biologiques cellulaires et donc tissulaires seront différents

Facteur qualitatif à prendre en compte

La dose équivalente n'est pas une grandeur physique

25

## 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  $H (Sv) = D(Gy).W_R$

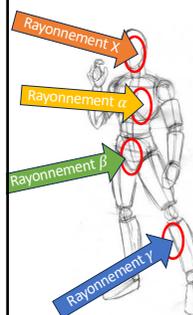
26

## 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

27

## 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

28

### 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...**)

29

### 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 cancérogénèse**
- 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 cancérigènes et génétiques (notion de « **détriment** »)

30

### Particularité de la dosimétrie « 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 (cutanée ou interne)
  - Due essentiellement aux particules chargées
  - Hétérogène, dépendant de la biodistribution et du métabolisme des radionucléide incriminés

31

### Particularité de 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

32

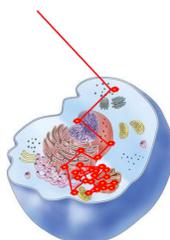
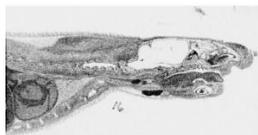
### Irradiation interne : le dépôt de dose est hétérogène

- Essentiellement due aux particules chargées ( $\beta$ ,  $\alpha$ ), et très peu aux émissions  $\gamma$  ou X associées



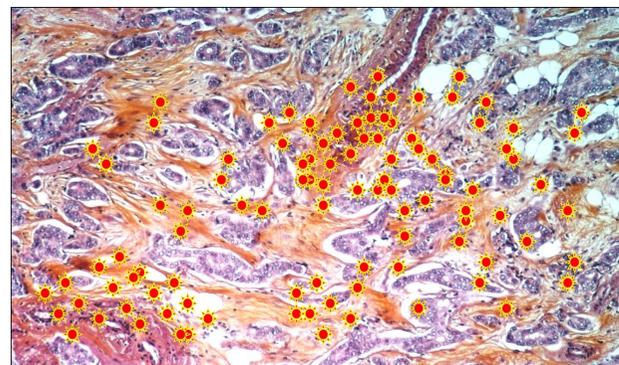
scintigraphie : un exemple de contamination interne !

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



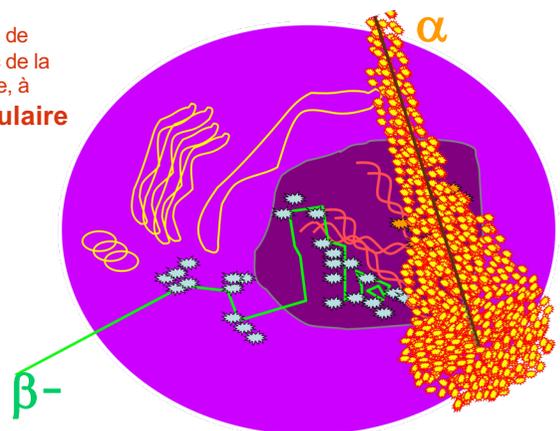
33

Hétérogénéité de l'activité, donc de la dose absorbée, à l'échelle **tissulaire...**



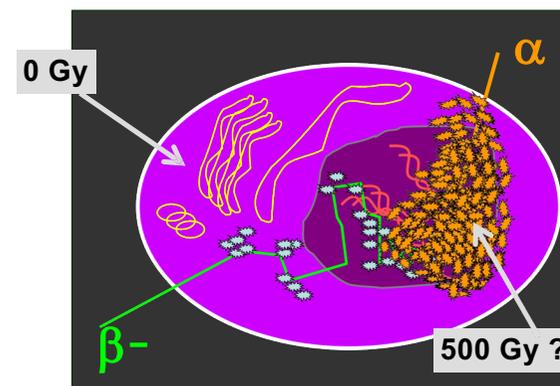
34

Hétérogénéité de l'activité, donc de la dose absorbée, à l'échelle **cellulaire**



35

Le Gy (J/kg) est une unité moins adaptée à l'échelle cellulaire...



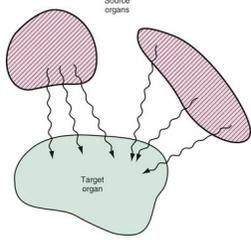
36

- 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 :

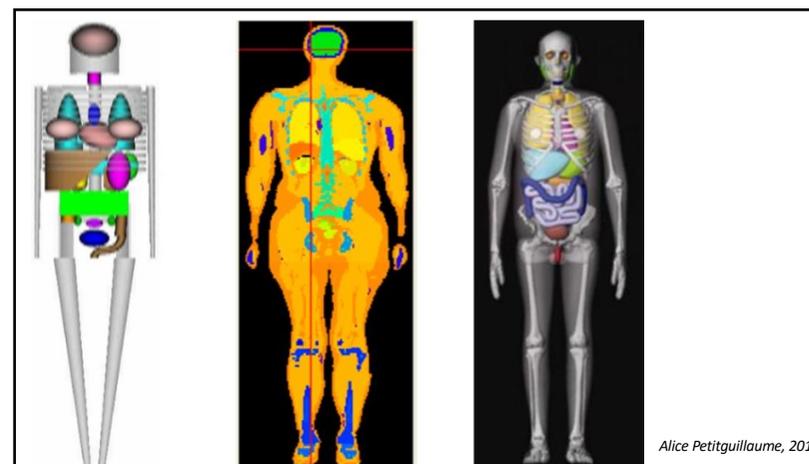
- une source
- et une cible, qui reçoit des rayonnements des points voisins

→ modèles complexes



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

37



38

### Dosimétrie et irradiation internes : variable temporelle

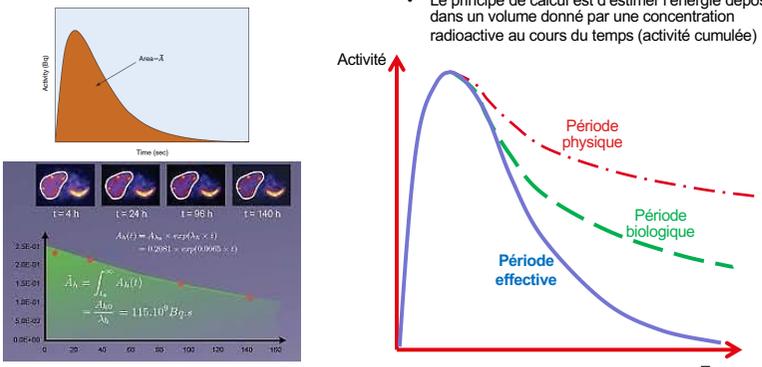
- De plus l'irradiation se fait de façon **prolongée et décroissante**, et la dose est délivrée au cours du temps après la contamination => **Bas débit de dose continu**
- **Débit de dose local** (essentiellement les émissions  $\beta$  ou  $\alpha$ ) dépend de
  - De la concentration du radioélément 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  $T_{eff} < T_{biol}$**

39

### Notion d'activité cumulée

- Le principe de calcul est d'estimer l'énergie déposée dans un volume donné par une concentration radioactive au cours du temps (activité cumulée)



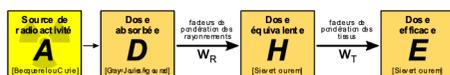
$A_N(t) = A_N \times \exp(-\lambda_N \times t)$   
 $= (0,281) \times \exp(-0,0005 \times t)$

$\bar{A}_N = \int_0^{\infty} A_N(t) dt$   
 $= \frac{2,10}{\lambda_N} = 117,10^9 Bq \cdot s$

40

## Messages essentiels

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



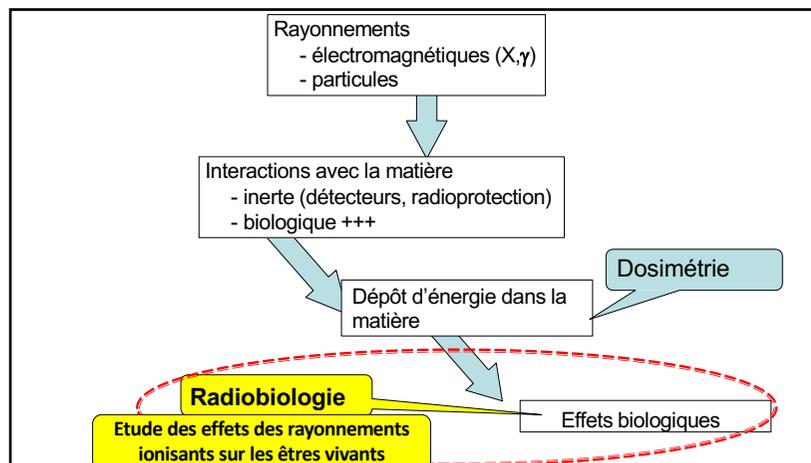
Images :  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ae/Doses\\_relations\\_simples.svg/2880px-Doses\\_relations\\_simples.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ae/Doses_relations_simples.svg/2880px-Doses_relations_simples.svg.png)

41

## Partie 2 : Radiobiologie

1. Effet déterministe
2. Effet stochastique

42



43

## Radiobiologie : plusieurs distinctions à faire

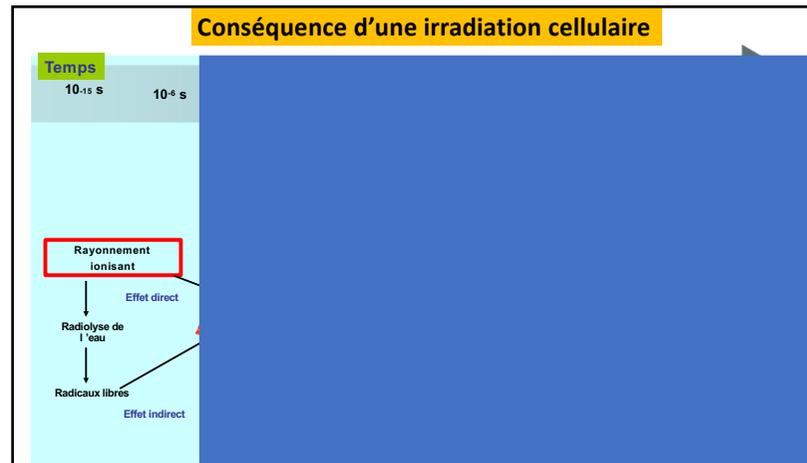
- Les effets sont à envisager au niveau :
  - Cellulaire
  - Tissulaire
  - Des organes
  - De l'organisme
  - (trans-générationnel = effets « génétiques », héréditaires, actuellement considérés comme inexistantes)
- En distinguant les effets
  - Déterministes
  - Stochastiques

44

### 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)

45



46

### Effets moléculaires des radiations

- **Ionisations (et excitations)** des molécules à l'intérieur des cellules
  - Directes des molécules d'intérêt biologique (protéines) : ionisation/excitation
  - Indirectes par **radiolyse** de l'eau : radicaux libres fugaces mais très réactifs
    - soit oxydants : le radical hydroxyl HO<sup>•</sup>
    - soit réducteur : le radical hydrogène H<sup>•</sup>
- **Puis trois possibilités**
  - Recombinaison en composés inertes (HO<sup>•</sup> + H<sup>•</sup> → H<sub>2</sub>O et H<sup>•</sup> + H<sup>•</sup> → H<sub>2</sub>)
  - Diffusion et altérations moléculaires (oxydations, rupture de double liaisons)
  - Radical H<sub>2</sub>O<sup>•</sup> et hydroperoxydes R-O-O-H<sup>•</sup> : oxydants très réactifs à vie « longue »

lésions moléculaires

Rôle +++ de l'oxygénation tissulaire pour la formation de peroxyde pour des TEL faibles (photons, électrons).

47

### Influence du TEL et de l'oxygène sur les effets moléculaires des radiations

- **TEL élevé** (particules α, protons, neutrons)  
Forte probabilité de réaction HO<sup>•</sup> + HO<sup>•</sup> → H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ⇒ effets importants
- **TEL faible** (photons, électrons)  
La formation de peroxydes dépend de la présence d'oxygène : rôle +++ de l'oxygénation tissulaire

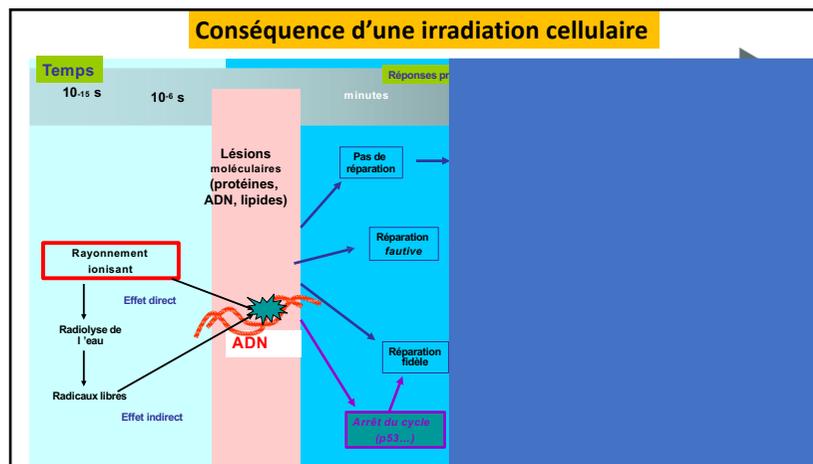
$$H^{\bullet} + O_2 \rightarrow HO_2^{\bullet} ; 2 HO_2^{\bullet} \rightarrow H_2O_2 + O_2$$

$$RH + HO^{\bullet} \rightarrow R^{\bullet} + H_2O ; R^{\bullet} + O_2 \rightarrow RO_2^{\bullet}$$

$$RO_2^{\bullet} + R'H \rightarrow ROOH + (R')$$

L'effet oxygène explique la faible radiosensibilité des tumeurs anoxiques mal vascularisées

48



49

## Effets cellulaires des radiations

- différent selon le tissu selon que la cellule impliquée est susceptible de se diviser ou non et dans le premier cas, selon la phase du cycle
  - cellule différenciée qui ne se divise plus => perte de fonction si dose >100Gy
  - cellule qui se divise : retard de mitose (dizaines de mGy) et more cellulaire ( 1 à 2 Gy)
- Influence :
  - fractionnement de la dose : permet la réparation (qqhr)
  - débit de dose : saturation des mécanismes de réparation
  - cycle cellulaire : plus radiosensible en prémitose
  - de l'oxygène : idem effet moléculaire

50

A l'échelle tissulaire, il faut distinguer deux types d'effets très différents

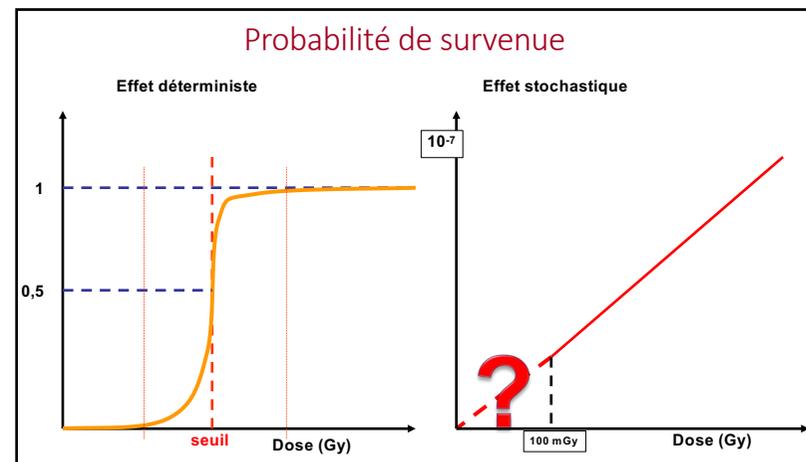
### ➤ les effets déterministes

- 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

51



52

## 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 »)

53

## 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>

54

## Exemple



55

## 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

56

## 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

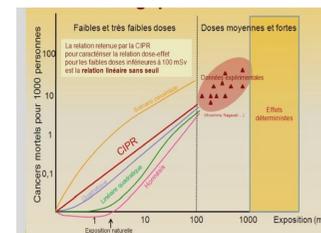
## Ce qui est connu

- 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

57

## 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



58

## Partie 3: Radioprotection

1. Travailleur
2. Patient
3. Public

62

## 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

63

## Les 3 grands principes de la radioprotection



<ul style="list-style-type: none"> <li>• Justification</li> <li>• Optimisation</li> <li>• Limitation</li> </ul> <p>(Code de la Santé Publique)</p>	<p><b>LE PRINCIPE DE JUSTIFICATION</b>            « Une activité nucléaire ou une intervention ne peut être entreprise ou exercée que si elle est justifiée par les <b>avantages</b> qu'elle procure, notamment en matière sanitaire, sociale, économique ou scientifique, <b>rapportés aux risques</b> inhérents à l'exposition aux rayonnements ionisants auxquels elle est susceptible de soumettre les personnes »            Il faut retenir que le respect de ce principe <b>n'est pas uniquement fonction du niveau de dose</b> auquel peut conduire la pratique.  <i>Le principe de justification, quand il est établi, est entériné par une autorisation administrative.</i></p>
	<p><b>LE PRINCIPE D'OPTIMISATION</b>            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 <b>niveau le plus faible</b> qu'il est <b>raisonnablement possible d'atteindre</b>, compte tenu de l'état des techniques, des facteurs économiques et sociaux et, le cas échéant, de l'objectif [médical recherché] »</p>
	<p><b>PRINCIPE DE LIMITATION</b>            « 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 <b>limites</b> fixées par voie <b>réglementaire, sauf lorsque cette personne est l'objet d'une exposition à des fins médicales ou de recherche biomédicale.</b> »            Ces limites ne sont pas les mêmes en fonction des catégories de population (travailleurs, public).</p>

64

## 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

65

## 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

66

- 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

67

## Valeurs limites d'exposition professionnelle

Limites d'exposition sur un an consécutif

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

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

68

## Principes de radioprotections

- Justification
- **Optimisation**
- Limitation

Visa 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 »**

69

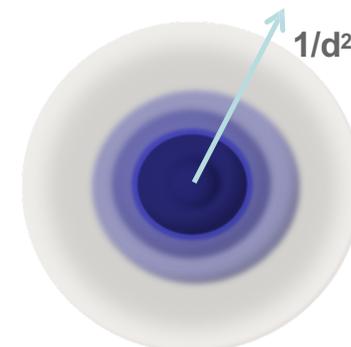
## Moyens de radioprotections contre l'irradiation

- 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 %)

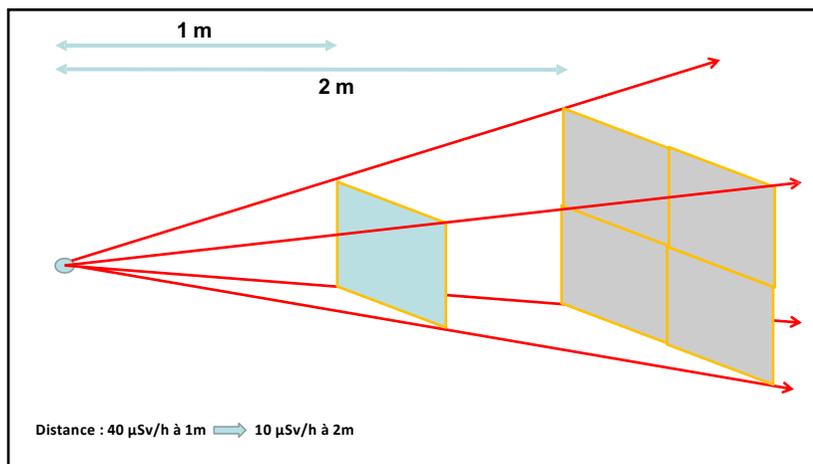
70

## 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



71



72

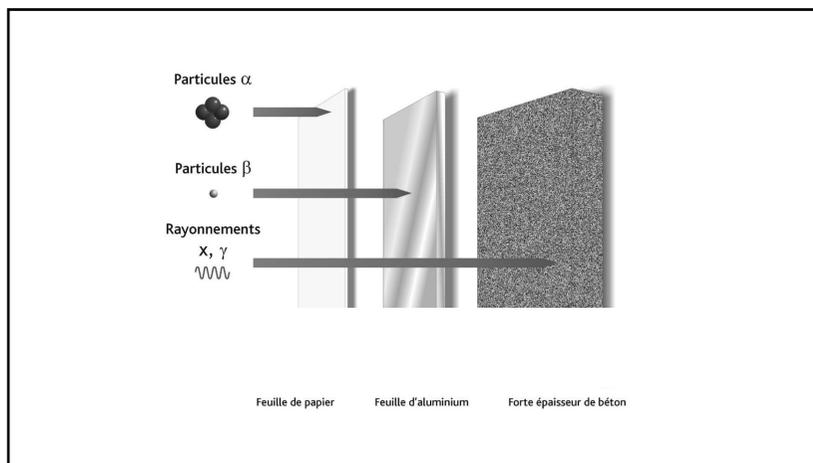
### Ecrans (plombés)

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

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

1 CDA → - 50 %  
 2 CDA → - 75 %  
 3 CDA → - 87,5 %  
 Etc.

73



74

### 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)

75

## 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

76

## 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)

77



78

## 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

79

- 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**

80

## Partie 3: Radioprotection

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

81

## Radioprotection des patients

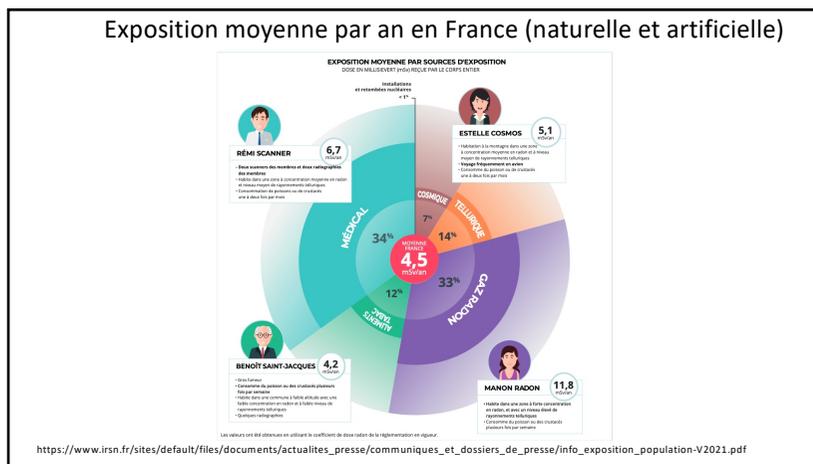
- Notion essentielle : **balance bénéfice risque**
- Justification
- Optimisation : Minimiser les doses tout en maintenant la **meilleure qualité diagnostique** (*prévention des effets stochastiques*)
- **Pas de limitation !**
- **Prevention des effets déterministes**
  - Examens diagnostiques ne délivrent 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
  - Raisonement très différent par rapport à la radioprotection des travailleurs

82

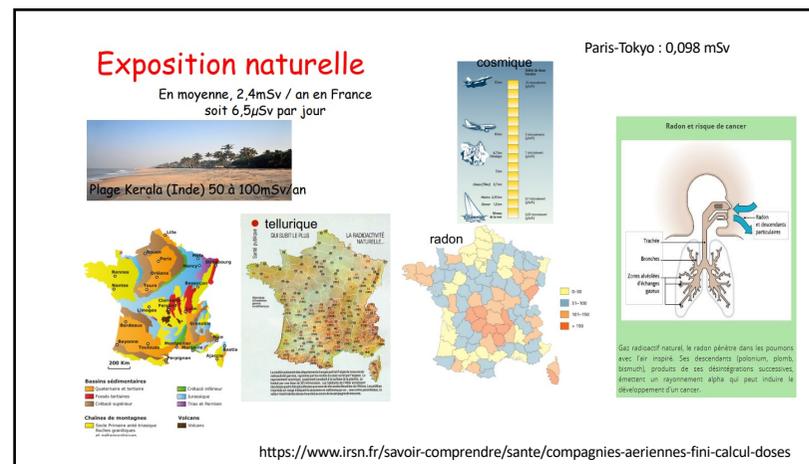
## Partie 3: Radioprotection

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

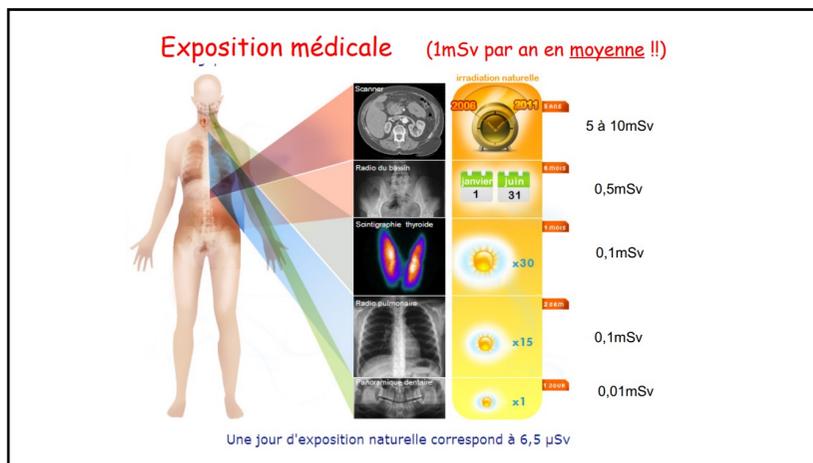
83



84



85



86

### Résumé

- La radioprotection doit être ADAPTEE :
  - À la réalité des risques
  - À la dangerosité des rayonnements
  - Aux conditions de l'irradiation : dose, débit de dose, organes exposés...
- La radioprotection a pour but de supprimer les effets déterministes (prévention des accidents +++), et de limiter raisonnablement les risques stochastiques
- ...la radioprotection (Justification, Optimisation, Limitation) n'a pas les mêmes objectifs pour les travailleurs, pour le public, et pour les patients

87