



**RONEO N°10 : DOSIMÉTRIE,
RADIOBIOLOGIE, RADIOPROTECTION
ET EXPOSITIONS**



Corporation des Carabins Niçois

UFR Médecine
28, av. de Valombrose
06107 Nice Cedex 2

[http://carabinsnicois.fr/
roneo.c2n@gmail.com](http://carabinsnicois.fr/roneo.c2n@gmail.com)

Date et heure : 8-10h Mardi 3 Octobre 2023

Professeur : Darcourt

Nombre de pages : 17 + 1 pour les QCMs

Ronéiste : Agrati Romuald

SOMMAIRE

I – DOSIMÉTRIE

- 1) Énergie d'un rayonnement et effet de la distance
- 2) Dose absorbée
- 3) Facteur de qualité d'un rayonnement
- 4) Doses en radioprotection

II – RADIOBIOLOGIE

- 1) Effets moléculaires des rayonnements ionisants
- 2) Effets cellulaires des rayonnements ionisants
- 3) Mêmes effets en physiologie
- 4) Effets tissulaires des rayonnements ionisants
- 5) Relation dose-effet

III – RADIOPROTECTION

- 1) Les deux types d'exposition
- 2) Protection contre l'exposition externe
- 3) Protection contre la radio-contamination (exposition interne)
- 4) Règles de radioprotection

IV – EXPOSITIONS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

- 1) Exposition du public
- 2) Expositions des patients
- 3) Expositions accidentelles

Le prof commence son cours en faisant un petit sondage/QCM interactif sur Socrative

⇒ Quel est le nombre de décès liés à la radioactivité émise lors de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl ?

- A) 50 B) 500 C) 5 000 D) 50 000 E) 500 000

Réponse : A

Le cours va porter sur les phénomènes physiques, des effets chimiques, des effets sur l'ADN qui se traduisent sur les cellules puis par conséquent sur les tissus, ce qui aura un effet sur la santé de l'organisme.

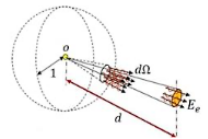
Les effets biologiques des radiations ionisantes ne sont **pas spécifiques**, c'est-à-dire qu'il n'y a pas que la radioactivité ou les rayonnements ionisants (RI) qui produisent les effets biologiques dont on va parler. Ces effets sont très bien connus scientifiquement et qu'ils dépendent de l'énergie qui a été déposée par les RI dans les tissus biologiques.

I. DOSIMÉTRIE

La dosimétrie c'est **déterminer la dose**, c'est-à-dire **l'énergie déposée**, pour prévoir ses effets biologiques.

1) Énergie d'un rayonnement et effet de la distance

L'énergie E_e correspond à l'énergie qui est déposée dans une surface qui se trouve à une certaine distance d'une source radioactive. La surface va recevoir tous les rayonnements qui sont émis dans ce qu'on appelle **l'angle solide $d\Omega$** (un cône dont le sommet est la source), et tous les rayonnements extérieurs à ce cône ne toucheront pas cette surface. Ce cône contient plus ou moins de RI selon la distance, plus elle augmente, moins il y a RI qui touchent la surface.



La **distance** est **au carré** et se trouve au dénominateur.

Au numérateur **$d\Psi$** c'est la **fluence énergétique**, c'est-à-dire la quantité d'énergie qui est transportée par un RI (= Nombre de particules x Énergie moyenne) $\Psi = \frac{E \times dN}{ds} = E \times \varphi \quad [J \cdot m^{-2}]$

$$E_e = \frac{d\Psi}{dS} = \frac{d\Psi}{d\Omega \cdot d^2}$$

Ce qui va atteindre une cible dépend de la **quantité de rayonnement** émis et de **l'inverse du carré de la distance**

2) Dose absorbée

Quand un RI traverse la matière, il dépose une partie de son énergie via les interactions avec la matière (excitations ou ionisations)

La dose absorbée (D) correspond à une **énergie absorbée (E_a)** sur une **unité de masse (dm)**

$$D = \frac{E_a}{dm}$$

E_a = énergie rayonnée absorbée [J]

dm = unité de masse [kg]

$D [joules \cdot kg^{-1}] = [Gy]$

Si notre échantillon de matière est une sphère, certains des RI vont traverser sans déposer d'énergie, d'autres qui vont déposer la totalité de leur énergie et d'autre qu'une partie de leur énergie
Donc **l'énergie absorbée** par la sphère correspond à la **somme des énergies** quelles soient déposées totalement ou partiellement.

$$E_a = \sum E_{ai} = E_{a1} + E_{a2} + E_{a3}$$

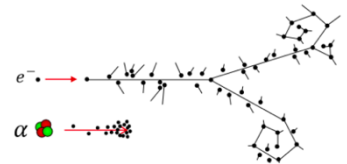
Une énergie se mesure en Joules et comme on mesure une énergie par unité de masse ça devrait être exprimé en J.kg⁻¹ mais ici l'unité est le **Gray (Gy)** pour montrer que ce sont des radiations ionisantes.

3) Facteur de qualité

Cette dose déposée est fonction du nombre de rayonnements qui vont traverser mais elle est aussi dépendante d'un **facteur de qualité de rayonnement**. Si vous avez un même nombre de rayonnements qui traverse la matière mais que ceux-ci sont de nature différente et bien ils seront d'une efficacité/dangerosité différente. Ceci est mesuré par ce qu'on appelle le **transfert d'énergie linéique (TEL)**, qui mesure le pouvoir d'ionisation d'un rayonnement donné, c'est-à-dire la quantité d'énergie déposée par unité de longueur (ex : KeV.μm)

Exemple :

- Une particule α dépose son énergie sur un parcours assez court et de manière assez dense
- Un électron ou une particule β- va déposer son énergie sur une longue distance



Si elles déposent la même énergie totale, la particule α va déposer de manière plus concentrée son énergie donc elle a un transfert d'énergie linéique (TEL) qui est beaucoup plus important.

$$\text{TEL}(\alpha) > \text{TEL}(e^-; \beta^-) > \text{TEL}(\text{rayons } \gamma \text{ et } X)$$

On traduit ce TEL par un **facteur de qualité/dangerosité (W_R)**, c'est un chiffre dérivé du TEL avec des valeurs assez simples :

- W_R (X ; γ ; e⁻) = 1
- W_R (neutrons) = 5 ou 20
- W_R (protons ; α) = 20

	X, γ, e ⁻	n rapides	n thermiques	α et p
W _R	1	5	20	20

Donc à énergie égale une particule α a un facteur de qualité/dangerosité qui est 20 fois supérieur à un électron ou un REM.

Ceci nous permet de calculer plus exactement les doses qui sont déposées dans la matière.

4) Doses en radioprotection

a) Dose équivalente H

Cette dose va tenir compte de **l'énergie déposée** Gray mais aussi de la **dangerosité du rayonnement**.

Autrement dit la **dose équivalente (H)** correspond à la **dose absorbée (D)** en Gray pondérée par le **facteur de qualité/dangerosité (W_R)**.

Pour cette dose, on utilise une nouvelle énergie qui est le **Sievert (Sv)**.

$$H = D \times W_R$$

b) Dose efficace E

Ici on va tenir compte d'un autre paramètre qui est : la sensibilité des différents tissus. Car dans l'organisme certains tissus/organes vont être plus radiosensible que d'autres

La dose efficace (E) correspond à la dose équivalente (H) pondérée par un **facteur de sensibilité des tissus (W_T)**.

Dans ce tableau qu'il ne faut pas retenir, il y a un certain nombre de tissus (gonades, seins, poumons, vessie, ...) et 2 colonnes, une avec des valeurs de 1990 et une avec des valeurs de 2007. Ces facteurs de sensibilité des tissus ne sont pas gravés dans le marbre car ils ne sont pas parfaitement maîtrisés. Par exemple les gonades qui étaient considérées comme relativement radiosensibles mais que finalement cette radiosensibilité n'est pas si élevée et inversement pour le sein.

Organe	W _{T1}	W _{T2}
	CIPR 1990	CIPR 2007
Gonades	0,20	0,08
Sein	0,05	0,12
Moelle osseuse - Colon	0,12	0,12
Poumons - Estomac	0,12	0,12
Vessie - Foie	0,05	0,04
Œsophage - Thyroïde	0,05	0,04
Peau, surface des os	0,01	0,01

Donc la **dose efficace (E)**, c'est la somme de la **dose déposée (D)** en Gray, multiplié par le **facteur de dangerosité (W_R)** et le **facteur de sensibilité des tissus (W_T)**.

On somme à la fois les W_T si on a plusieurs tissus et les W_R si on a plusieurs rayonnements qui vont interagir avec la matière.

$$E = (\sum W_T) \times H$$

$$\Leftrightarrow E = D \times W_R \times (\sum W_T)$$

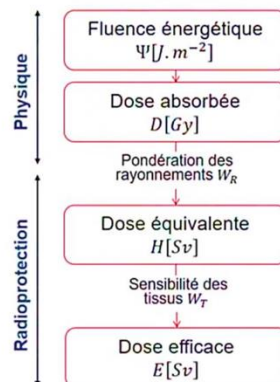
L'unité utilisée est le **Sievert (Sv)**

Conclusion dosimétrie

Schéma récapitulatif :

On peut mesurer la dose de différentes façons :

Purement **physique** avec la fluence énergétique, c'est ce qu'utilise les physiciens (J.m⁻²) et la dose absorbée (Gy). Ça a le mérite d'être objectif mais ne permet pas de préjuger des effets biologiques.



Ψ Fluence énergétique [J.m⁻²]
 D dose délivrée [Gy]
 E dose efficace [Sv]
 (conséquences)



Ce qui nous intéresse plus, c'est ce qui va nous permettre d'évaluer les effets biologiques pour la **radioprotection**. On va pondérer par la nature du rayonnement W_R (\rightarrow dose équivalente en Sv) et par la sensibilité des tissus W_T (\rightarrow dose efficace en Sv).

On peut imaginer cela comme un pommier ayant des pommes qui vont tomber et un bonhomme qui va les recevoir. Le nombre de pommes qui va tomber sera la fluence énergétique. La partie de cette fluence énergétique qui va heurter l'individu sera la dose absorbée, la sensibilité du crâne de l'individu aux pommes sera la dose équivalente et la dose efficace sera les conséquences sur l'individu (une bosse sur le crâne par exemple).

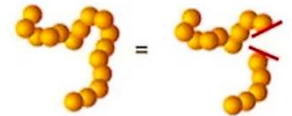
II. RADIOBIOLOGIE

1) Effets moléculaires des rayonnements ionisants

Le dépôt d'énergie des RI se fait par ionisation dans la matière et dans la matière biologique en particulier. Mais évidemment dans la matière biologique les rayonnements vont rencontrer d'avantages de **molécules** que d'atomes isolés.

Ce sont surtout les **effets moléculaires** qui vont être le résultat des interactions mais n'est en moins ce sont les mêmes mécanismes, il y aura des effets sur les électrons qui vont être soit excités soit expulsés et créer des ionisations.

Sous l'effet d'une radiation ionisante un ou plusieurs électrons vont être ionisés, ce qui aboutit à plusieurs choses, notamment la production de **radicaux libres**, c'est-à-dire des morceaux de molécule qui ont un électron célibataire ou au contraire à qui il manque un électron.



Ces radicaux libres sont des espèces chimiques **extrêmement réactive** car elles sont dans une situation qui ne peut pas durer et la molécule doit absolument trouver une autre molécule qui vient la compléter et la rendre stable.

Le RI peut **détruire la molécule** et surtout produire des **radicaux libres** toxiques chimiquement

Le principal effet moléculaire est la **radiolyse de l'eau**, il est important puisque l'organisme est composé à 70% d'eau, donc les interactions des RI se feront beaucoup avec les molécules d'eau.

La molécule d'eau va subir ce phénomène d'ionisation moléculaire, il y a plusieurs possibilités d'interactions :

- Excitation $H_2O + RI \rightarrow H_2O^*$
- Ionisation $H_2O + RI \rightarrow H_2O^{\bullet+} + e^-$
- Radiolyse $H_2O + RI \rightarrow \text{HO}^\bullet + e^- + H^+$



Radical hydroxyle (très oxydant)

Une **excitation** d'une molécule d'eau sous l'effet d'un RI

Une **ionisation**, c'est-à-dire qu'on se retrouve avec H_2O qui a perdu un électron

Une **radiolyse** de l'eau, c'est-à-dire que le RI va **casser** cette molécule en créant un radical hydroxyle HO^\bullet qui est chimiquement très oxydant/agressif et un H^+

Ces produits de la radiolyse de l'eau peuvent produire un certain nombre d'effets chimiques :

- Se **recombina** pour reformer une molécule d'eau (à moindre mal)
- **Diffuser** et produire d'autres oxydations moléculaires
- Aboutir à un **radical libre** particulièrement toxique **H₂O₂** (eau oxygénée ou peroxyde d'oxygène)

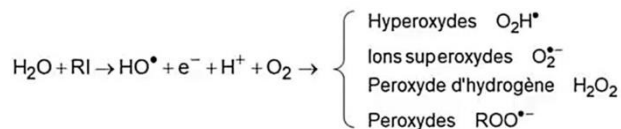
Ce sont tous des oxydants très puissants mais qui ont une durée de vie très brève, donc ils vont prolonger les effets de RI mais de manière limitée dans le temps.

On a cette cascade avec l'effet d'ionisation puis après les effets des radicaux libres.

Une autre molécule importante à considérer est l'oxygène qui permet l'**effet oxygène**, c'est le même principe mais c'est l'effet des radicaux libre de la radiolyse de l'eau sur l'oxygène.

Une molécule d'eau soumise à une radiation ionisante donne un radical libre hydroxyle et si ce radical libre vient en contact avec une molécule d'eau, il va fabriquer un certain nombre d'espèces moléculaires qu'on appelle les **espèces réactives de l'oxygène**.

Ce sont aussi des radicaux libres qui sont eux-mêmes **très oxydants** et vont avoir des effets chimiques importants et vont **prolonger dans le temps** les effets des radicaux libres issus de la radiolyse de l'eau.



C'est encore une autre étape qui permet de **poursuivre les effets** des radiations ionisantes initiales.

L'effet oxygène est **néfaste en radioprotection** car il augmente la toxicité des RI, au contraire en **radiothérapie il est favorable** car on veut détruire une tumeur et si cette tumeur a de l'oxygène c'est encore mieux car elle va être encore plus sensible aux RI. Le problème c'est que les tumeurs sont souvent hypoxiques (assez peu d'oxygène), donc c'est plutôt l'effet inverse que l'on va avoir : une radiorésistance faute d'une quantité suffisante d'oxygène.

2) Effets cellulaires des rayonnements ionisants

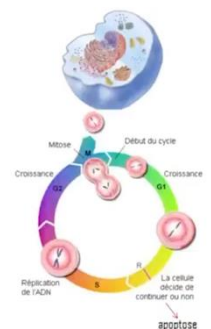
a) Cibles cellulaires

Quelles sont les cibles des effets biologiques des rayonnements et radicaux libres dans une cellule ?

Le cytoplasme est peu touché par les effets directs et indirects, de même pour la membrane. C'est le cycle cellulaire qui va être perturbé, d'autant plus lorsqu'elles sont en phases de **G2** ou de **mitose**.

Ça a permis d'énoncer la loi de Bergonié et Tribondeau (1906), ces deux médecins français ont montré que la radiosensibilité des tissus :

- **Augmente lors de leur division**
- **Diminue avec leur différenciation**

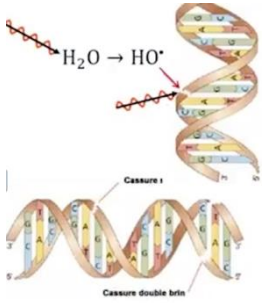


b) Effets sur l'ADN

La cible majeure des RI est l'**ADN** de la cellule.

Ces effets sur l'ADN peuvent être :

- **Directs** (30%) = la radiation ionisante va produire une ionisation de l'hélice d'ADN directement
- **Indirects** (70%) = l'ADN est affecté par des radicaux libres ou des espèces réactives de l'oxygène



Dans les 2 cas le résultat est le même, l'ADN est endommagé soit chimiquement soit directement par le rayonnement et ces dommages peuvent être de différentes natures :

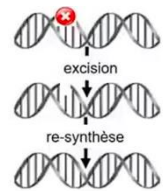
- Altération d'une base
- Cassure simple brin
- Cassure double brin
- Dommage au niveau chromosomique

Dans ce tableau qui n'est pas à retenir, on peut voir qu'une radiation ionisante délivrée artificiellement de 1Gy pendant 1 seconde, on a 2 000 bases endommagées, 1 000 cassures simple brin, 50 cassures double brin. Ce qui est intéressant c'est de voir ce qu'il se passe spontanément, on n'irradie rien mais on laisse simplement le système biologique se développer tout seul et on regarde ce qu'il se passe pendant 1 heure. On peut voir que c'est du même ordre de grandeur avec 3 000 altérations, 5 000 cassure simple brin, en revanche il y a très peu de cassures double brin.

Lésions	1 Gy 1s	Spontanées/h
Bases	2000	3000
ADN simple brin	1000	5000
ADN double brin	50	<1

Il y a donc des atteintes de l'ADN qui sont sous l'effet de **radiations ionisantes** mais il y en a aussi des **spontanées** qui se produisent en dehors de toutes radiations ionisantes.

L'ADN a développé des techniques de **réparations** qui sont particulièrement efficaces, puisque naturellement cet ADN est en permanence attaqué. Les cellules disposent d'un **système de réparation efficace et rapide**. Ces réparations sont relativement simples dans une molécule d'ADN puisque c'est une double hélice et que chaque brin est miroir de l'autre. Lorsqu'il y a un dommage, le morceau endommagé est **excisé** et **resynthétisé en miroir**.



Ce système fonctionne très bien, mais il peut y avoir des erreurs, c'est ce qu'on appelle des **réparations fautives**, qui sont d'autant plus probable qu'il y a une **cassure double brin** (car si les 2 brins sont endommagés, il n'y a plus l'image en miroir pour réparer les dommages).

Une réparation fautive veut dire que **l'ADN est modifié**, c'est donc ce qu'on appelle une **mutation** (qui peut être sans effet, bénigne, létale pour la cellule ou cancérogène).

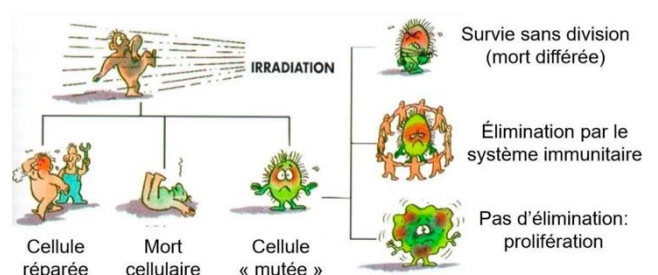


La bactérie *Deinococcus radiodurans* a un système de réparation hyper développé, puisqu'elle peut réparer les effets biologiques de 50 000 Gy (dose insupportable pour un être vivant normal).

c) Conséquences cellulaires

Une cellule subit une irradiation, donc son ADN va être endommagé et par la suite la cellule a plusieurs options :

- La **cellule est réparée** par le système de réparation donc tout va bien
- La **cellule meurt** à cause de dégâts trop importants impossibles à réparer
- La **cellule est mutée** à la suite d'une réparation fautive



Cette cellule avec mutation va passer une deuxième étape de protection à la suite de laquelle elle peut :

- Décider de **survivre mais sans se diviser**, c'est-à-dire avoir une mort différée (=apoptose)
- Être **éliminée par le système immunitaire**
- **Continuer de proliférer** car n'est pas éliminée et peut potentiellement être à l'origine de maladie

3) Mêmes effets en physiologie

Ces mêmes effets se produisent même en l'absence de radiations ionisantes.

a) Effets moléculaires

La production d'espèces réactives de l'oxygène est **normale, physiologique** chez tous les êtres vivants. Ces toxiques chimiques sont produits de toutes façons par le simple fait de vivre.

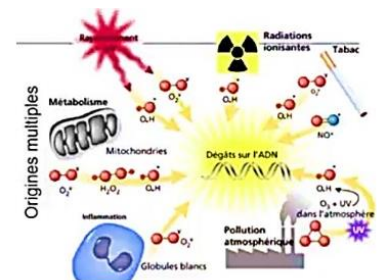
Les cellules n'ont pas attendues les rayonnements ionisants pour développer des systèmes de détoxification, comme les systèmes **enzymatiques** ou les molécules **anti-oxydantes** qui vont diminuer l'impact des radicaux libres, espèces réactives de l'oxygène

Le **stress oxydant**, c'est-à-dire les situations où ces **mécanismes sont dépassés**, va provoquer un certain nombre de maladies qui n'ont rien à voir avec les RI, comme les cancers qui peuvent se développer sans actions des RI mais simplement par le dépassement de ces effets anti-oxydants, les maladies cardio-vasculaires, neurodégénératives, le vieillissement.

b) Effets sur l'ADN

Ce schéma résume tout ce qui est susceptible d'altérer l'ADN :

- Les RI
- Le tabac
- La pollution notamment la pollution industrielle
- Les réactions inflammatoires
- Le métabolisme normal/physiologique
- Les ultraviolets



Tout ça attaque en permanence notre ADN et c'est pour ça que l'ADN s'est entraîné depuis la nuit des temps à se réparer.

Ce tableau qui n'est pas à retenir, vous donne une idée du nombre de lésions d'ADN par jour en fonction des différentes sources et du type de lésion

Source	Types de lésions	Nombre de lésions par jour
Métabolisme normal	Bases	10 000
	Ruptures simples	20 000 à 40 000
Pollution	Bases	10 000
	Ruptures simples ou doubles	?
Bronzage au soleil (1h)	Bases	60 000 à 80 000/h
Tabac (20 cigarettes/j)	ADN	100 à 2000
Radioactivité naturelle	Ruptures simples	2/an

Le **métabolisme normal** génère des lésions de l'ADN qui sont de 10 000 par jour en ce qui concerne les lésions des bases et de 20 000 à 40 000 cassures simple brin d'ADN. Donc juste le métabolisme, ce sont des dizaines de milliers d'impacts sur l'ADN, de même pour la **pollution**.

Mais c'est finalement le **bronzage** qui provoque des dizaines de milliers de lésions par heure (là ça fait vraiment beaucoup)

Le **tabac** provoque également des lésions de l'ADN

La **radioactivité naturelle** provoque des lésions ADN quasiment négligeable : 2 par an

Les **lésions de l'ADN** sont essentiellement dues à notre environnement et pas tellement aux radiations ionisantes en tout cas celles émises naturellement.

La ronéo est indépendante de la faculté de médecine, et ne peut en aucun cas servir de support officiel à l'examen de LAS. Toute reproduction ou vente est interdite sans l'accord de la C2N et du professeur.

Donc toutes ces lésions biologiques ne sont **pas spécifiques des RI** mais sont de même nature pour des agressions complètement différentes.

4) Effets tissulaires des rayonnements ionisants

Le tissu est un regroupement de cellules.

Les conséquences sur ces tissus sont directement la suite de ce qu'il se passe au niveau cellulaire. C'est donc depuis les effets cellulaires que l'on déduit les effets tissulaires.

- Si on se trouve avec un tissu dont toutes les cellules réparent, il n'y a donc aucun effet tissulaire.
- Si toutes les cellules du tissu meurent, il y a des effets tissulaires qu'on appelle effet obligatoire ou déterministe. *Par exemple au niveau cutané lors d'une brûlure, les cellules cutanées qui subissent l'exposition aux rayonnements vont mourir et créer l'équivalent d'une brûlure.* Cet effet tissulaire lié à une mort cellulaire importante est lié à de **fortes doses**. On appelle ça les effets **déterministes**.
- Si la cellule échappe à la réparation, apoptose, système immunitaire, elle va se développer. Et ça au niveau tissulaire c'est un **effet aléatoire**, c'est-à-dire que ce n'est pas fonction de la dose mais seulement des aléas du système de réparation qui n'a pas fonctionné. C'est ce qu'on appelle les effets **stochastiques** (=aléatoire). Si cette mutation concerne :
 - Une cellule somatique, elle peut se développer et aboutir à un cancer. Ces effets n'ont jamais pu être observés pour des **doses faibles (<100 mSv)**
 - Une cellule gonadique, la mutation peut théoriquement être transmise à la descendance. C'est possible mais ça reste de la pure théorie car ça n'a jamais pu être démontré.

5) Relation dose-effets

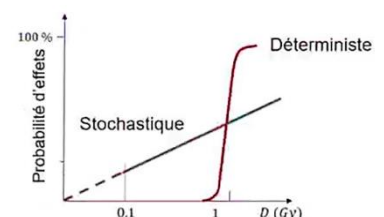
Il faut bien distinguer les effets déterministes des effets stochastiques.

Les **effets déterministes** sont relativement à de fortes doses, liés à la mort cellulaire. Par exemple si nous recevons tous la même **dose relativement élevée** de 7 à 8 Gray sur la peau, nous aurons tous une brûlure, plus ou moins fort en fonction de notre sensibilité individuelle mais nous aurons **tous la même conséquence**.

Les **effets stochastiques** sont des effets **aléatoires** où il y a une mutation qui **échappe et se développe**. Par exemple si nous sommes tous soumis à une **petite radiation** de 500 mSv, nous réparerons tous les dégâts produits sauf peut-être quelques personnes dont une cellule aura échappée et va aboutir à une mutation.

Lorsque l'on veut traduire la probabilité d'effets biologiques par rapport à la dose, on a des courbes très différentes :

- **L'effet déterministe** est un effet de **tout ou rien**, à partir d'un **seuil**, c'est-à-dire qu'il faut suffisamment de dose pour produire suffisamment de morts cellulaires, ce qui crée à tous les coups un effet sur le tissu.
Ce qui donne une courbe où on n'a rien comme effets déterministes jusqu'à une dose d'ordre de grandeur de **1 Gy**, où tout d'un coup il y aura un effet quel qu'il soit.

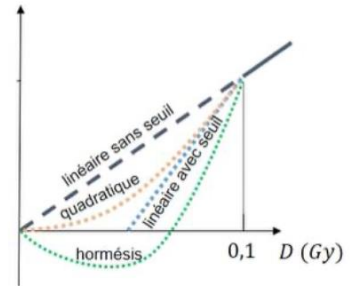


- **Les effets stochastiques aléatoires** sont difficiles à prévoir par définition, mais il est logique de penser que plus la dose augmente et plus la probabilité de produire un effet aléatoire augmente. C'est une **relation linéaire** entre la dose et la probabilité d'effets, mais cette ligne n'est pleine qu'à partir de 100 mGy, en-deçà elle est en pointillée (*on va y revenir*).

La question qui se pose c'est : qu'est-ce qu'il se passe à de faibles doses pour les effets stochastiques ?

La relation dose-effet à faible dose reste un débat, il y a plusieurs propositions :

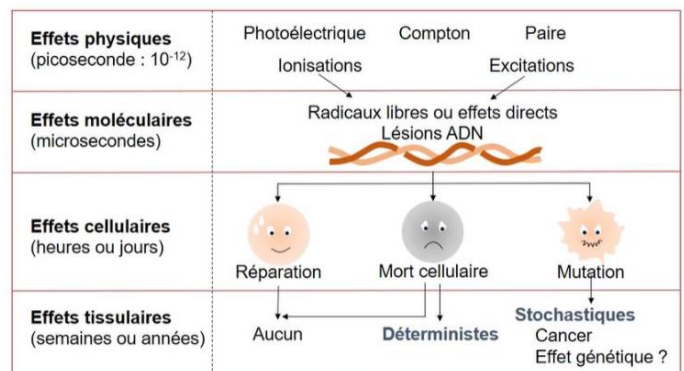
- Une courbe **quadratique**, certes plus la dose augmente plus la probabilité d'effet stochastiques augmente mais elle **n'est pas vraiment linéaire** car à de faibles doses la réparation est efficace.
- Une **relation linéaire avec seuil**, c'est proportionnel mais à partir d'un certain seuil, en deçà les réparations ne permettent pas de développer un effet stochastique.
- La courbe **hormésis**, qui a une **probabilité négative**, une faible dose de radiation stimule les systèmes de réparation, ce qui serait **favorable et renforcerait l'organisme** face aux agressions.



Ce n'est pas tranché car expérimentalement on n'arrive pas à reproduire des effets aléatoires à ces doses faibles. Donc on reste par principe de précaution à la relation linéaire sans seuil.

Conclusion radiobiologie

Les effets des **RI** se font par excitations ou ionisations, ce sont des **effets physiques** quasiment instantanés (picoseconde), puis ceci donne lieu à des **effets moléculaires**, comme les radicaux libres et les espèces réactives de l'oxygène qui vont léser l'**ADN**. Cet effet sur l'ADN va se traduire sur la **cellule** sur un temps plus long (heures/jours), soit par réparation, soit mort cellulaire, soit mutation. Et se répercute sur le tissu, avec aucun effet si toutes les cellules se sont réparées. Pour la mort cellulaire, soit cette mort cellulaire est en proportion faible ce qui ne fait rien au niveau du tissu, soit en proportion importante qui provoque des effets tissulaires **déterministes**. Et la cellule mutée peut provoquer des effets **stochastiques** aléatoires (cancer).



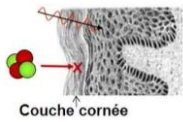
III. RADIOPROTECTION

1) Les deux types d'expositions

Il faut distinguer :

- L'exposition externe, c'est-à-dire que le rayonnement vient de l'extérieur et nous touche.
- L'exposition interne, c'est ce qu'on appelle la radio-contamination, et où la source de rayonnement est dans l'intérieur de notre organisme.





Par exemple le **radon-222** qui est assez important dans l'irradiation naturelle, c'est un **émetteur α** (particule lourde, directement ionisante, facteur de qualité élevé) qui produit beaucoup d'ionisation théoriquement mais finalement pas tellement en irradiation externe car les particules α sont arrêtées par une simple feuille de papier et donc par notre couche cornée. Cependant comme le radon est un **gaz**, on est susceptible de l'inhaler, donc la source de radon radioactif va venir dans les poumons et les alvéoles pulmonaires vont être soumises à une exposition de radio-contamination.



2) Protection contre l'irradiation externe

Il y a trois paramètres :

- La **distance** : plus on s'éloigne de la source mieux c'est. Car comme vu précédemment l'irradiation décroît avec la distance au carré.
- Le **temps** : moins on passe de temps exposé, moins on est irradié
- Les **écrans** : ces écrans on va les choisir selon le type de rayonnement. Pour les particules α une simple feuille suffit mais pour les **REM X et γ** qui sont indirectement ionisants, traversent facilement la matière et donc il faut des écrans fait de plomb par exemple ou du béton.

3) Protection contre la radio-contamination

Cette protection est beaucoup plus complexe car dépend de la situation.

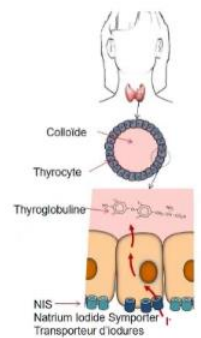
a) Exemple de l'iode

La thyroïde qui est une glande endocrine située à la base de notre cou, est le seul tissu de l'organisme qui utilise l'iode car elle fabrique des hormones thyroïdiennes chimiquement composées d'iode.

La thyroïde est composée d'une couche monocellulaire de thyrocytes, qui à leur pôle basal dispose d'un transporteur qu'on appelle le Natrium Iodide Symporter, c'est-à-dire un système de transporteur qui va prendre l'iode qui passe dans le sang et l'envoyer dans le thyrocyte pour la synthèse des hormones.

C'est un système extrêmement efficace pour capter l'iode, mais le problème, c'est lorsqu'il y a un accident nucléaire et qu'il y a un relargage important d'un isotope radioactif de l'iode :

l'iode 131 qui est un émetteur β^- .



Si quelqu'un se trouve dans un environnement avec de l'iode 131, il va être radio-contaminé par l'iode 131 qui va rentrer dans son organisme et les thyrocytes vont capter cet iode 131 (car pour les cellules, que ce soit de l'iode 131 ou 127 c'est pareil) et va provoquer des effets biologiques qui peuvent être néfastes.



Pour contrecarrer ce problème, il y a des pastilles d'iode 127 (stable) qui peuvent être prise lors d'un accident nucléaire et qui vont apporter une grande quantité d'iode stable à la thyroïde pour la saturer en iode, si bien que quand va arriver l'iode 131, il ne sera pas capté par la thyroïde déjà saturé et sera donc éliminé.

b) Durée d'une exposition interne

Pour la durée de la radio-contamination interne, il ne faut pas considérer uniquement la période radioactive mais plutôt la **période effective** qui tient compte en plus de la période biologique.

Par exemple l'iode qu'il soit stable ou radioactif, il rentre dans l'organisme, la thyroïde ... il va avoir un cycle et être éliminé, il a une durée de séjour dans l'organisme qui est biologique. Si on considère de l'iode radioactif, il a la même durée de vie biologique mais en plus il a sa durée de vie radioactive.

Donc ce qui est important c'est la combinaison des deux, c'est-à-dire la **période effective** (T_{eff}) :

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

Exemple de l'iode 131

$$T_{phys} = 8 \text{ j}$$

$$T_{bio} = 56 \text{ j}$$

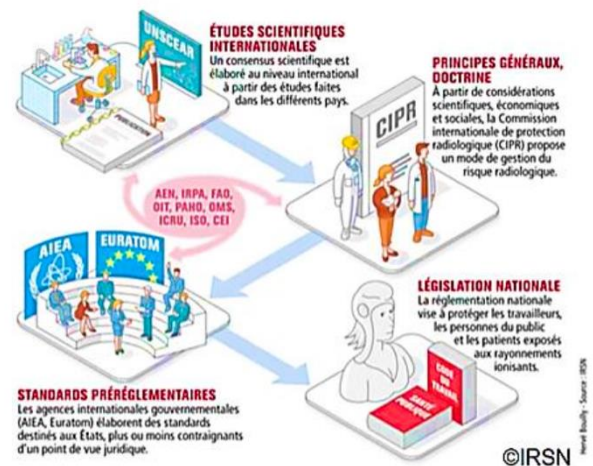
$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{phys}} + \frac{1}{T_{bio}} = \frac{1}{8} + \frac{1}{56} = 7 \text{ j}$$

La période effective est donc inférieure à la période physique car on ajoute l'élimination biologique.

4) Règles de radioprotectiona) Différents organismes impliqués

Il y a beaucoup d'organismes impliqués dans la radioprotection (il ne faut pas les retenir) :

- L'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) est un organisme international qui émane de l'ONU, il réalise les études scientifiques pour déterminer le niveau de dangerosité.
- La CIPR (Commission Internationale de Protection Radiologique) va établir grâce aux travaux de l'UNSCEAR les règles de protection des populations
- L'AIEA (Agence Internationale pour l'Énergie Atomique) ou EURATOM transforment ces règles en des propositions de lois qui seront intégrées dans chaque pays dans leur code de la santé ou code du travail.



Je cite : « Oubliez ça mais c'est pour vous montrer que les choses se passent largement au niveau **supra national** et son quand même très organisées »

Au niveau **national**, en France, il y a une agence qui est chargée de vérifier l'application des règles se fait bien, c'est : l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). C'est une autorité d'État mais indépendante de l'État, qui est chargée de contrôler tout ce qui est exposition aux RI, ça va depuis la sûreté des centrales nucléaires jusqu'au contrôle des services de médecine nucléaire.



La CRIIRAD (Commission de Recherche et d'Information Indépendante sur la RADioactivité) est une association créée par un groupe de lanceurs d'alertes qui n'ont pas confiance en les institutions.

b) Principes de la radioprotection

Les **règles de radioprotection** sont **réglementaires/arbitraire** comme un code de la route, la vitesse sur la route est un danger et on a décidé que la limite serait 130 sur les autoroutes mais c'est une décision arbitraire qui n'est pas basé particulièrement sur des analyses scientifiques.

Pour le **public** on considère qu'il faut limiter la dose reçue à **1mSv par an**.

Les **travailleurs** peuvent être soumis à des doses plus élevées car ils connaissent les risques et sont surveillés, ils peuvent donc recevoir jusqu'à **20 mSv par an**

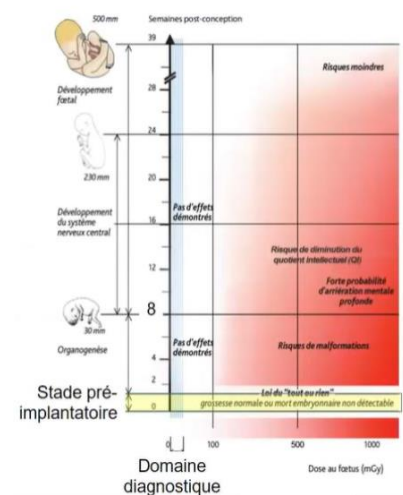
Les **patients n'ont pas de limite de dose**, si un malade a besoin d'être soumis à des RI à des fins de diagnostiques et de traitements, à partir du moment où il en a besoin, il peut les recevoir mais les médecins doivent prouver la justification et l'optimisation (dose la plus faible et efficace possible selon le principe ALARA : As Low As Reasonably Achievable).

c) Exemple de la radioprotection chez les femmes enceintes

Les risques sont déterministes pour le fœtus.

Il faut distinguer 3 stades :

- De la fécondation jusqu'au 8^{ème} jour : situation assez favorable car c'est un **effet tout ou rien**. S'il y a le moindre effet biologique anormal la grossesse s'arrête. Donc si jamais une femme est soumise à des RI à ce moment-là, il n'y a pas de danger parce que : ou ça passe et il n'y a aucuns effets sur le fœtus ou ça casse et la grossesse s'arrête.
- Du 8^{ème} jour à la 8^{ème} semaine : c'est la période d'**organogénèse**, donc assez sensible mais les risques liés à d'éventuelles malformations ne sont possibles **qu'au-delà de 100 mGy**, hors le diagnostic avec le scanner par exemple est bien en-dessous, donc les risques n'existent pas ou très peu.
- Après la 8^{ème} semaine : c'est essentiellement le moment où le système nerveux de l'enfant se développe, mais le tissu nerveux est relativement résistant donc on peut craindre des effets mais pour des doses assez élevées de 500 mGy.



Même si le domaine diagnostique ne provoque en théorie aucuns effets sur le fœtus, quoiqu'il en soit **on évite d'examen avec des RI chez une femme enceinte sauf urgence vitale.**

Conclusion radioprotection

La radioprotection contre les radiations externes est extrêmement facile, il faut utiliser la **distance**, le **temps** et les **écrans**.

La radioprotection contre une radiation interne est très variable selon le type de contamination.

La réglementation établit des limites pour le public et les travailleurs selon un principe de précautions, et on a vu qu'il n'y a **pas de limite pour les patients** mais qu'on doit justifier et optimiser l'utilisation des RI.
Le cas particulier de la femme enceinte, qui **ne doit pas bénéficier d'examen utilisant des RI sauf urgence vitale** +++

IV. EXPOSITIONS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

1) Exposition du public

a) Origines

Il existe deux grandes familles de radiations ionisantes :

○ Origine naturelle

- Tellurique : il y a des radioéléments toujours présents dans l'écorce terrestre et qui ont été créés il y a des milliards d'années lors de la formation de la Terre
- Cosmique : il y a des particules de hautes énergies et donc d'irradiation provenant du Soleil



○ Origine artificielle

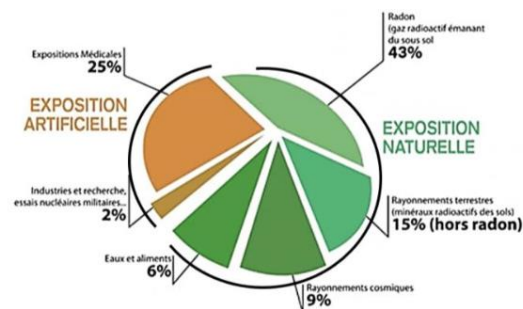
- Industrielle et militaire : les essais de bombes nucléaires et le nucléaire civil pour la production d'énergie
- Médicale : méthodes diagnostics (scanner), traitements (radiothérapie)



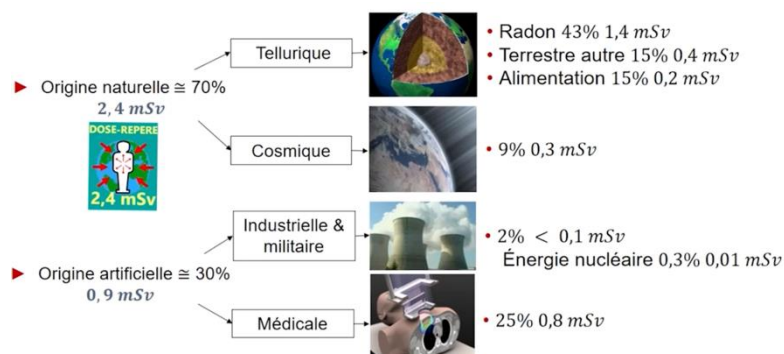
b) Répartitions des différentes expositions

Les radiations que nous recevons sont à **70-75% d'origines naturelles**. Dans ces irradiations naturelles, le plus gros contributeur est le **gaz Radon 222** qui est émis par des roches radioactives de l'écorce terrestre et comme c'est un élément radioactif naturel gazeux et bien il va provoquer une contamination interne.

En ce qui concerne l'**exposition artificielle**, la quasi-totalité de l'exposition artificielle est **médicale 25%**. L'exposition militaire et industrielle ne représente au pire que 2% de notre exposition.



En France, l'exposition moyenne d'un citoyen est de **3,3 mSv par an**.



L'origine naturelle correspond à environ 70%, ce qui représente **2,4 mSv par an** (c'est la dose repère).

L'origine artificielle correspond à environ 30%, ce qui représente 0,9 mSv par an.

c) Exposition naturelle tellurique

Elle est liée aux radioéléments présents dans l'écorce terrestre et vont agir essentiellement par contamination interne comme le Radon 222 (émetteur α). Cette exposition dépend beaucoup de la géographie car c'est en fonction de la nature des sols. En France ça varie un petit peu (en moyenne 1,4 mSv) mais dans le monde encore plus (jusqu'à 50 mSv en Inde, Brésil, Iran, ...).

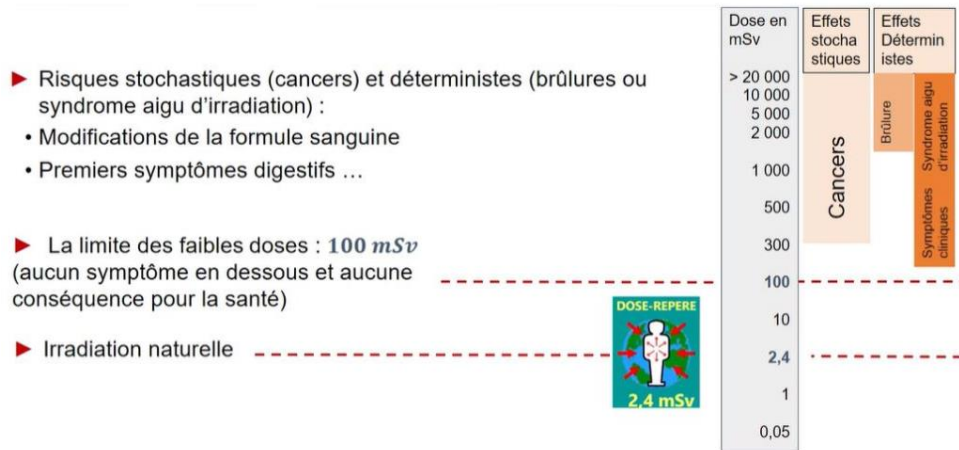


3) Expositions accidentelles

a) Les repères

On a comme repère :

- **L'irradiation naturelle 2,4 mSv par an**
- La limite des **faibles doses 100 mSv** (expérimentalement il n'y a jamais eu un effet néfaste des doses < 100 mSv)
- **Au-delà de 100 mSv**, il y a des risques stochastiques ou déterministes et vont provoquer des symptômes digestif, hématologique, ...



b) L'accident de Tchernobyl (26/04/1986)

La centrale nucléaire de Tchernobyl a pris feu, sur lequel 600 pompiers sont intervenus pour éteindre l'incendie. Ils ont été fortement exposés à des doses de plus de 1000 mSv (largement dans les doses d'effets déterministes). Parmi les 600 pompiers, 134 ont eu un syndrome aigu d'irradiations, sur lesquels il y a eu « **seulement** » **28 décès**. Ces pompiers ont été suivis de très près car on s'attendait à des tas de maladies/cancers, mais finalement sur 20 ans, ils n'ont **développé aucun cancer particulier**, ce qui est une bonne surprise, cependant 19 sont décédés mais ce n'est pas dû à leur irradiation.

Après il y a eu ce qu'on appelle les liquidateurs, les Russes ont fait intervenir 600 000 liquidateurs qui sont des personnes pas forcément consentantes pour nettoyer le site. Ces personnes venaient peu de temps sur les lieux, certes ils se faisaient irradier mais peu de temps et ont donc été soumis à une dose de 100 à 200 mSv, ce qui est proche des faibles doses. Ces personnes ont été suivies et ont eu beaucoup d'effets sur la santé mais plutôt lié au travail forcé et non pas à l'irradiation. On n'a **pas constaté de surmortalité** liée à l'irradiation, il y a eu des cataractes en plus et les leucémies n'ont pas pu être démontrées alors qu'on s'y attendait.

Il y a eu des effets déterministes que chez les pompiers.

Il y a aussi eu des effets stochastiques, c'est-à-dire des mutations qui ont données des cancers. Il n'y en a pas eu autant que ce qu'on pense mais il y en a eu indéniablement et ce sont des exclusivement des cancers de la thyroïde et exclusivement chez les enfants. C'est lié au dégagement dans l'atmosphère de radioéléments, notamment de l'iode 131 et le nuage radioactif est passé au-dessus de la Biélorussie où les enfants sont carencés en iode et comme la thyroïde est avide d'iode pour fabriquer des hormones thyroïdiennes, elle capte tout l'iode qui passe. Malheureusement il y a eu à peu près 7000 cancers de la thyroïde chez les enfants mais heureusement le cancer de la thyroïde est un cancer peu agressif et dont on guérit très souvent, cependant il y a quand même eu 20 décès.

Il n'y a eu aucuns effets tératogènes comme on pourrait le voir sur internet.

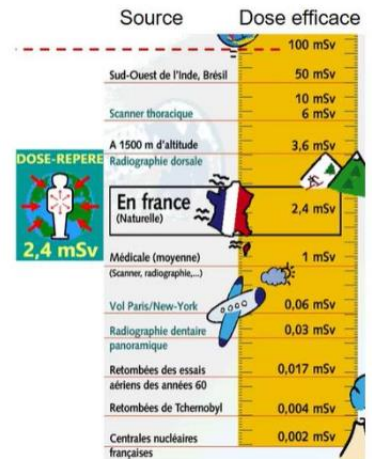
c) L'accident de Fukushima Daiichi (11/03/2011)

À la suite d'un tsunami les réacteurs sont entrés en fusion car le refroidissement n'était plus assuré. L'exposition concernait essentiellement les 170 travailleurs de la centrale, qui ont été soumis à des irradiations de 140 mSv en moyenne, ce qui est un peu au-delà des faibles doses mais reste assez peu heureusement. Les populations ont été très peu touchées et ont eu accès aux pastilles d'iode. Pour l'instant on ne déplore aucun décès ou effets stochastiques.

Conclusion expositions aux rayonnements ionisants

Les repères sont les suivants :

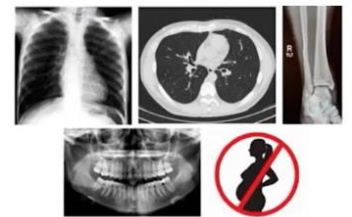
- **1 à 10 mSv** : ordre de grandeur des doses efficaces délivrées lors de diagnostics
- **2,4 mSv** : dose repère
- **100 mSv** : limite supérieure des faibles doses



CONCLUSION GÉNÉRALE

L'exposition au RI nous concerne tous en tant que professionnels de santé :

- Les médecins pour le diagnostic ou le traitement
- Les pharmaciens car utilise des médicaments radioactifs
- Dentistes avec les rayons X
- Les kinés qui prescrivent des radios
- Les sages femmes qui s'occupent des femmes enceintes.



Ça concerne les citoyens car nous sommes tous soumis aux radiations naturelles. Il est vrai que les RI sont dangereux mais la radiophobie l'est aussi. C'est un rapport bénéfice/risque.

Marie Curie disait « Dans la vie rien n'est à craindre, tout est à comprendre. ».

Il y a une loi que le professeur aime bien, c'est la loi de Brandolini : « La quantité d'énergie pour réfuter des idioties est supérieure d'au moins un ordre de grandeur à celle nécessaire pour les produire », en anglais c'est la Bullshit Law.

Dédi aux bonbons qui m'ont fait tenir jusqu'à la fin de cette ronéo

Dédi à Salma

Dédi à Gevorg, courage ne lâche rien

Dédi à Bilel, force à toi

PS : goutez le cappuccino noisette de la BU c'est un plaisir pour les papilles !! +++

QCMs

QCM 1 – Quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) exacte(s) concernant une dose absorbée de radiations ionisantes exprimée en gray ?

- A) Elle traduit l'énergie déposés localement par le rayonnement
- B) Elle tient compte de la dangerosité du rayonnement responsable de l'irradiation
- C) Elle tient compte de la radiosensibilité des tissus
- D) Elle tient compte des limites de radioprotection
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses.

QCM 2 – Soit un sujet qui a accidentellement été irradié au niveau d'une fesse par une source émettant des rayons gamma et alpha. Le calcul de la dose déposée donne 8 Gy pour le rayonnement gamma et de 0,5 Gy pour le rayonnement alpha au niveau de la peau et des muscles.

Il n'y a pas d'irradiation significative d'autres tissus. On donne les valeurs des W_R : 1 pour les rayons gamma et 20 pour les alpha.

Les facteurs de sensibilité des tissus W_T sont 0,01 pour la peau et 0,12 pour les muscles.

Quelle est, en Sv, la dose efficace liée à cette irradiation ?

- A) 0,78
- B) 1,64
- C) 2,34
- D) 8,5
- E) 21

QCM 3 – Concernant l'exposition aux radiations ionisantes en France, quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) exacte(s) ?

- A) Le radon-222 participe de manière importante à l'irradiation naturelle d'origine tellurique
- B) L'exposition d'origine médicale représente 5% de l'exposition totale de la population
- C) Un examen diagnostique de type tomодensitométrie produit une exposition de l'ordre de 100 à 500 mSv
- D) La dose repère de l'irradiation naturelle est égale à 100 mSv
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

3) A

= 2,34 Sv

= 0,08 + 0,96 + 0,1 + 1,2

= 0,01 × 1 × 8 + 0,12 × 1 × 8 + 0,01 × 20 × 0,5 + 0,12 × 20 × 0,5

$E = D \times W_R \times W_T$

2) C

1) A

Correction :