



# FORMATION INITIALE 6 et 7 JUIN 2017

Sophie DOUCHIN *PCR*

## Rappels de physique et de biologie des rayonnements ionisants

- 1) Définitions et principes : radioactivité, période, décroissance, mode de désintégration, propriétés des rayonnements.
- 2) Interaction Rayonnement et matière : classification, mode d'interaction, dose absorbée.
- 3) Effets biologiques des rayonnements.
- 4) La nature des effets sur l'homme.
- 5) la radioprotection, les grandeurs utiles (dose efficace).

**1) Définitions et principes :**  
**radioactivité, période, décroissance,**  
**mode de désintégration, propriétés des**  
**rayonnements**

**L'atome:**  
**un noyau + un cortège**  
**électronique**

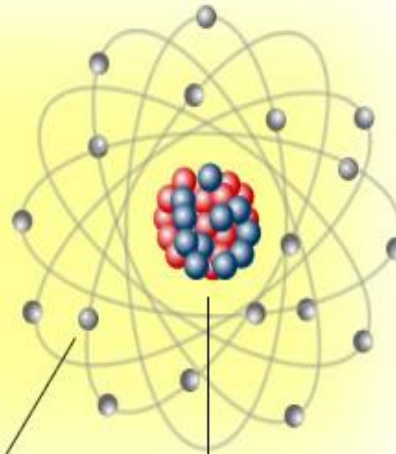
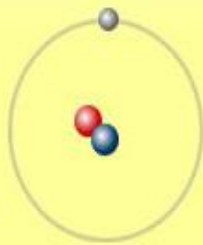
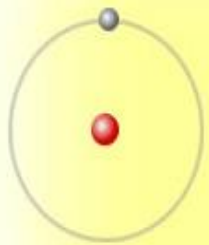


Hydrogène 1

Deutérium 2

Hélium 4

Uranium 235



- Proton
- Neutron
- Electron

92 électrons

Noyau :  
92 protons  
143 neutrons

**L'atome:**  
**un noyau + un cortège électronique**

**Le noyau est composé de nucléons:**  
**Protons (chargés +) et neutrons**

**Symbole d'un atome X:  ${}^A_Z\text{X}$**

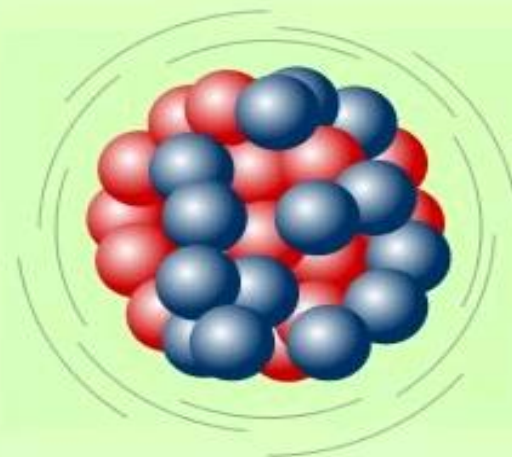
**où A = nb de nucléons et Z = nb. de protons**

Le physicien français  
**Henri Becquerel** (1852 - 1908)  
a découvert la radioactivité  
naturelle de l'uranium



# Le noyau radioactif

## La radioactivité : un phénomène spontané



Noyau instable



Noyau d'hélium =  
émission  $\alpha$



Electron =  
émission  $\beta$



Rayonnement  
électromagnétique =  
émission  $\gamma$



# La radioactivité

Propriété d'un noyau instable:

- se *transformer* spontanément en noyau d'une autre espèce chimique,
- avec émission de rayonnements porteurs de l'énergie libérée.

On caractérise une source radioactive par son **activité**

- l'unité d'activité est le *\*becquerel*

La **transformation** d'un seul noyau est imprévisible à un instant donné ( phénomène *aléatoire*).

La probabilité de transformation par seconde est définie à partir d'un grand nombre d'atome → la **Loi quantitative**

# Propriétés physiques des principaux rayonnements

	$\alpha$ Noyau d'Hélium	$\beta^-$ électron	$\gamma, X$ photon
Masse	élevée, 7000 fois $> e^-$	faible (1 $e^-$ )	# zéro
Charge électrique	2 (protons)	1 (1 $e^-$ )	0
vitesse	petite (7 000 à 20 000 km/s) Comparée à vitesse lumière	# vitesse lumière pour $\beta \ll \text{dur} \gg$ ( $E > 1 \text{ MeV}$ )	vitesse de la lumière

# Activité

On caractérise une source radioactive par  
-son activité l'activité A d'une quantité de  
radionucléide à un instant donné est le quotient

$$A = \Delta N / \Delta t$$

giga

$\Delta N$  correspond au nombre probable de transformations spontanées dans  
l'intervalle de temps  $\Delta t$

-l'unité d'activité est le \*becquerel, 1 Bq = 1 transformation par seconde,

\*multiples du becquerel :

$$\text{kBq} = 10^3 \text{ Bq} \quad \text{MBq} = 10^6 \text{ Bq}$$

kilo méga

$$\text{GBq} = 10^9 \text{ Bq}$$

giga

$$\text{TBq} = 10^{12} \text{ Bq}$$

téra

# Loi quantitative

- La transformation d'un seul noyau est imprévisible à un instant donné ( phénomène aléatoire).
- la probabilité de transformation par seconde est définie, constante radioactive  $\lambda$  ( $s^{-1}$ ), à partir d'un grand nombre d'atome.
- Loi quantitative  $\Delta N / \Delta t = \lambda N$  où  $N$  nombre d'atome présents à l'instant  $t$ .  
 $\lambda$  est caractéristique de chaque radioisotope,

$$A = \lambda \cdot N$$

# Décroissance des transformations radioactives et période

- Activité résiduelle d'une source au temps t

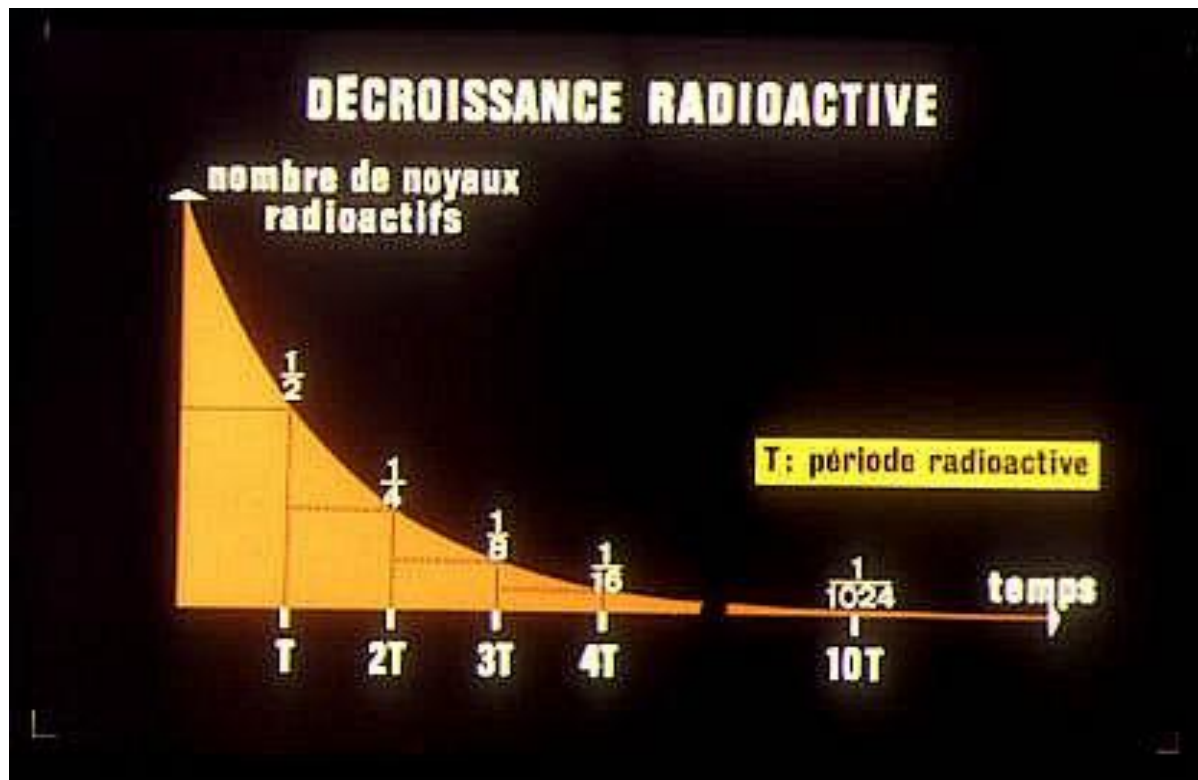
$$A = A_1 e^{-\lambda t}$$

- La période (T) durée nécessaire pour que, statistiquement, la moitié des noyaux radioactifs présents dans l'échantillon se transforment.

$$T = 0,693/\lambda$$

- Repère pratique au bout d'un temps t égal à 10 T, l'activité initiale est réduite d'un millième.

# Décroissance radioactive



# Ordre de grandeur en énergie (eV)

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$$

joules

- Atomes Energie liaison  
e « libres », qqs dizaines eV, e  
« liés », qqs keV

- Molécules

Liaison chimiques qqs eV • Domaine  $\gamma$

H OH 5 eV 60 keV < E < 3 MeV

[<sup>241</sup>Am, E = 60 keV, <sup>60</sup>Co, E = 1,3 MeV]

- Energie thermique 0,025 eV

- Rayonnement

Lumière visible eV

- Domaine  $\alpha$

4 MeV < E < 9 MeV

[<sup>239</sup>Pu, E = 5,2 MeV]

- Domaine  $\beta$

10 keV < E<sub>max</sub> < 3 MeV

[<sup>3</sup>H, E = 18 keV, <sup>32</sup>P, E = 1,7 MeV]

- Domaine X

10 keV < E < 100 keV

[<sup>55</sup>Fe, E = 6 keV, <sup>125</sup>I, E = 27 keV]

# Propriétés physiques des principaux rayonnements

	$\alpha$ Noyau d'Hélium	$\beta^-$ électron	$\gamma, X$ photon
Masse	élevée, 7000 fois $> e^-$	faible (1 $e^-$ )	# zéro
Charge électrique	2 (protons)	1 (1 $e^-$ )	0
vitesse	petite (7 000 à 20 000 km/s) Comparée à vitesse lumière	# vitesse lumière pour $\beta$ « dur » ( $E > 1$ MeV)	vitesse de la lumière

## 2) *Interaction, Rayonnement et matière :*

**classification, mode d'interaction, dose  
absorbée...**

## Rappels de physique et de biologie des rayonnements ionisants

**1) Définitions et principes : radioactivité, période, décroissance, mode de désintégration, propriétés des rayonnements.**

**2) Interaction Rayonnement et matière : classification, mode d'interaction, dose absorbée.**

**3) Effets biologiques des rayonnements.**

**4) La nature des effets sur l'homme.**

**5) la radioprotection, les grandeurs utiles (dose efficace).**



# *Interaction - rayonnement - matière*

Les rayonnements communiquent leur énergie au milieu qu'ils traversent,

Conséquences importantes : **ionisations** et **excitations** des atomes et des molécules du milieu.

Les ionisations et les excitations sont à l'origine des effets utilisés pour la détection des rayonnements et des effets biologiques dans le milieu vivant.

# *Classification des rayonnements*

les particules chargées ( $\beta$ ,  $\alpha$ ) ont la faculté d'arracher des électrons appartenant aux atomes de la matière traversée. Ces rayonnements sont dits **directement ionisants**.

les particules neutres ( $\gamma$ , X, neutrons) produisent des ionisations *par l'intermédiaire des particules chargées qu'elles mettent en mouvement*. Ces rayonnements sont dits **indirectement ionisants**.

## Mode d'interaction des rayonnements avec la matière

- La particule chargée ( $\alpha$ ,  $e$ ) interagit à coup sûr avec la matière traversée. Elle perd progressivement son énergie, créant des ionisations et des excitations, et se ralentit.

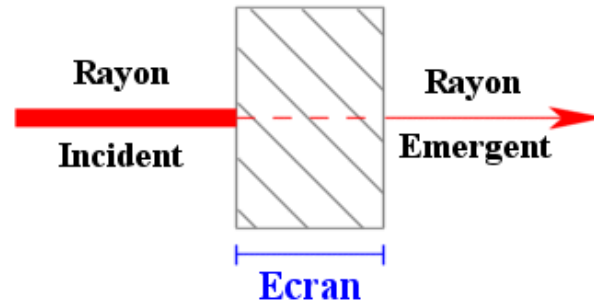
Les particules  $\alpha$  ont un fort pouvoir ionisant.

- Les particules non chargées ( $\gamma$ ,  $X$ ) interagissent avec la matière en deux temps

1- de manière aléatoire. Elles traversent la matière sans interagir ou disparaissent brutalement à la suite d'une interaction entraînant une atténuation en nombre.

2- Puis, à coup sûr en émettant des particules chargées ( $e$ ).

# Atténuation des rayonnements électromagnétiques X



- Le nombre de rayons émergent ( $N$ ) n'ayant subi aucune interaction dans la traversée d'un écran d'épaisseur  $x$  (cm) est lié au nombre de rayons incidents ( $N_1$ ) par la relation :

$$N = N_1 \cdot e^{-\mu x}$$

- Grandeur utile :  $X_{1/2}$ , épaisseur de matériau nécessaire pour atténuer d'un facteur 2 le nombre initial de photon.

$\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) est le coefficient linéaire d'atténuation qui dépend de la *nature du milieu traversé* et de *l'énergie des photons*.



## Transferts(pertes) d'énergie à l'origine des ionisations

- particules  $\alpha$  : transferts d'énergie **denses** et **localisés**. Trajectoire courte et linéaire.
- électrons transferts **diffus** comparés aux  $\alpha$ . Trajectoire longue et sinueuse.
- rayonnements gamma : transferts d'énergie **délocalisés** comparés aux électrons, diffus comparés aux  $\alpha$ . Trajectoire très longue.

## Les rayonnements et leurs principales caractéristiques

	Trajectoire	Pouvoir pénétrant	Pouvoir d'arrêt ou d'atténuation	Risque externe
Rayons X	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Air : plusieurs centaines de mètres</li> <li>■ Fortement dépendante de son énergie et du milieu absorbant</li> </ul>	élevé	<i>Loi d'atténuation</i> Matériau Z élevé : épaisseur acier, Pb $X_{1/2}$ en cm	+++ Tissus Organes, organisme entier
		<i>Eau</i> $(\rho = 1)$  <i>Pb</i> ( $\rho = 10,8$ )	$X_{1/2}$ en cm  <i>E</i> (0,1 MEV) $X_{1/2} = 4,1$ <i>E</i> (1 MEV) $X_{1/2} = 10$ <i>E</i> (2 MEV) $X_{1/2} = 14$ <i>E</i> (0,1 MEV) $X_{1/2} = 0,12$ <i>E</i> (1 MEV) $X_{1/2} = 0,85$ <i>E</i> (2 MEV) $X_{1/2} = 1,4$	

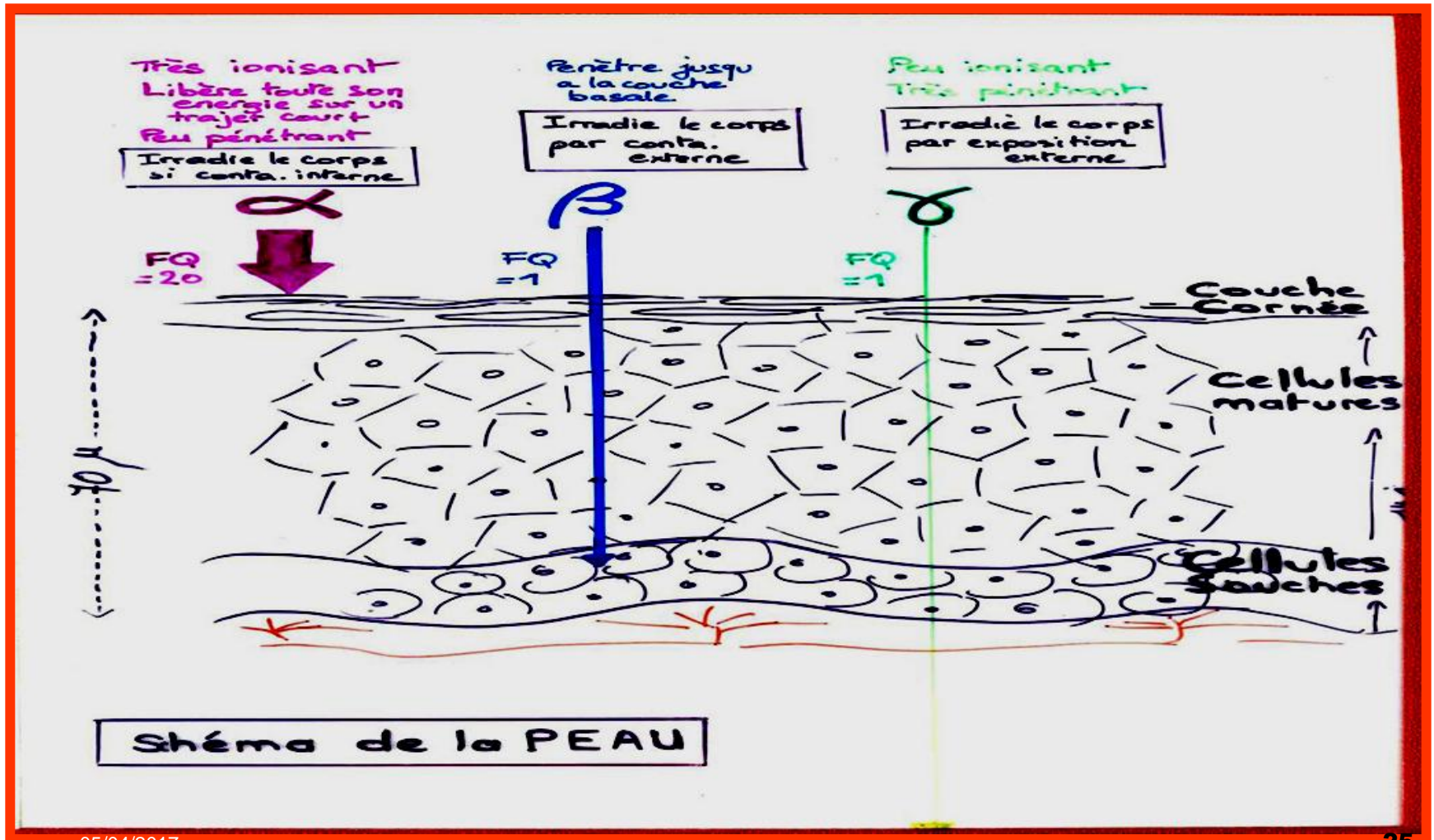
## Les rayonnements et leurs principales caractéristiques

	Trajectoire maximum	Pouvoir pénétrant	Pouvoir d'arrêt ou d'atténuation	Risque externe
alpha	Air : qqes cm $^{239}\text{Pu}$ : 5 cm Eau : qqes $\mu\text{m}$ $^{239}\text{Pu}$ : 40 $\mu\text{m}$	Très faible	Absorption totale. Feuille de papier Écran mince: Al, Cu	Limité à la couche morte de la peau
bêta	Air : qqes m $^3\text{H}$ : 5 mm $^{32}\text{P}$ : 6 m Eau : qqes mm $^3\text{H}$ : 6 $\mu\text{m}$ $^{32}\text{P}$ : 0,8 cm	Limité	Absorption totale. Matériau Z faible, épaisseur faible : $^{32}\text{P}$ : 0,6 cm plexi $^{32}\text{P}$ : 0,3 cm d'Al	+/- Organes superficiels peau, oeil

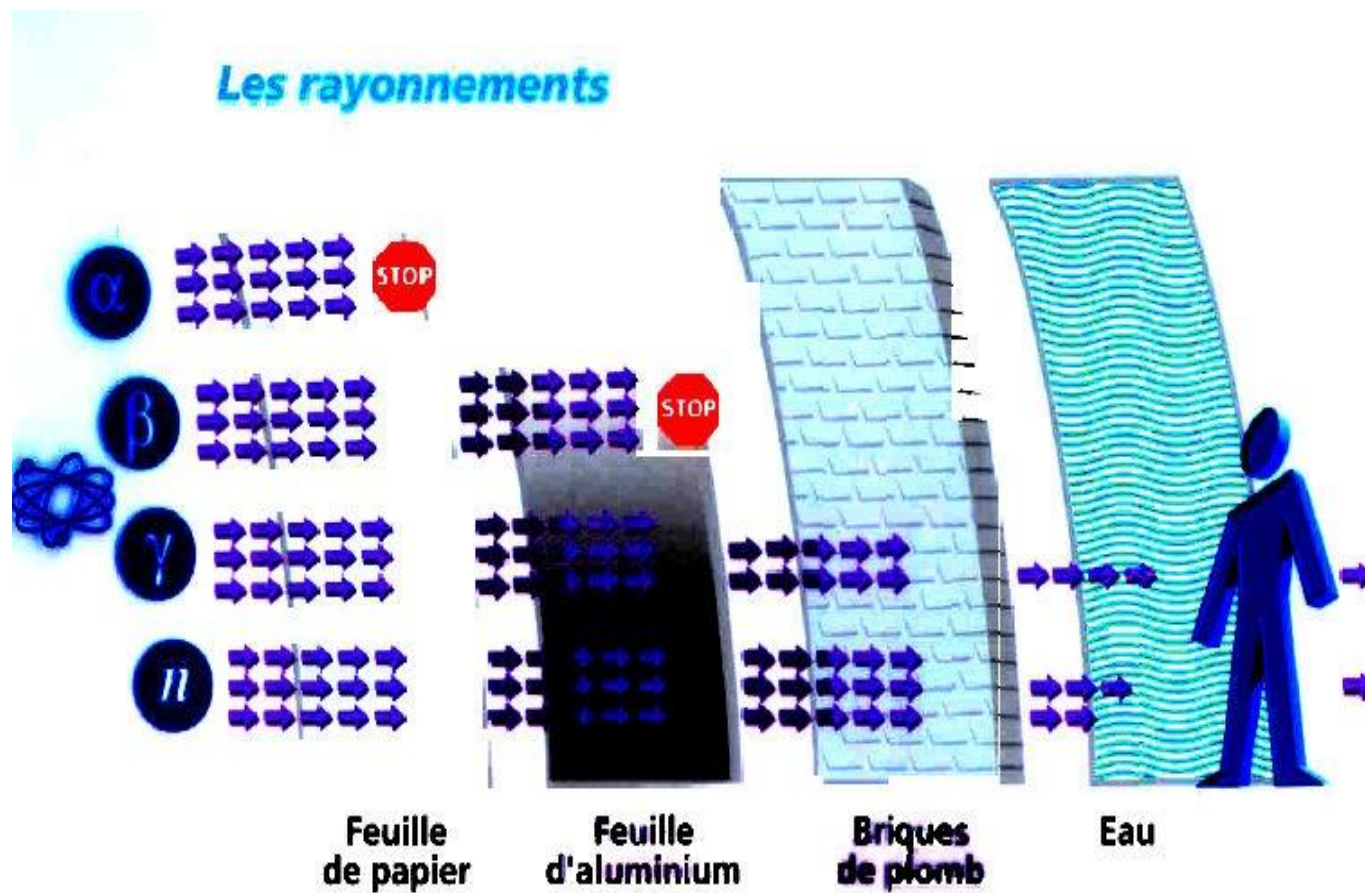
## Les rayonnements et leurs principales caractéristiques

	Trajectoire	Pouvoir pénétrant	Pouvoir d'arrêt ou d'atténuation	Risque externe	
gamma	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Air : plusieurs centaines de mètres</li> <li>•Fortement dépendante de son énergie et du milieu absorbant</li> </ul>	élevé	Loi d'atténuation	+++	
			Matériau Z élevé : épaisseur acier, Pb	Tissus Organes, organisme entier	
			X ½ en cm		
			Eau (ρ = 1)	E (0,1 MEV)	X ½ en cm X ½ = 4,1
				E (1 MEV)	X ½ = 10
				E (2 MEV)	X ½ = 14
			Pb (ρ = 10,8)	E (0,1 MEV)	X ½ = 0,12
	E (1 MEV)	X ½ = 0,85			
	E (2 MEV)	X ½ = 1,4			

# Exposition de la peau aux différents types de rayonnements



# La protection par les écrans



## Quantification de l'énergie déposée dans un milieu.

Grandeur physique qui permet de quantifier l'interaction des rayonnements avec la matière (mesurable).

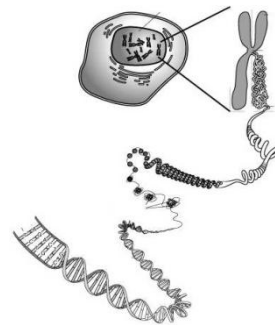
**Dose absorbée (D)** quantité d'énergie déposée par les rayonnements dans un échantillon de matière par unité de masse

$$D = (E_{\text{entrée}} - E_{\text{sortie}}) / \text{volume de masse.}$$

L'unité est le **gray** dépôt d'énergie d'un joule / kg de matière.

**Le débit de dose** est la dose cédée à la matière par unité de temps  
Souvent exprimé en Gy/heure.

### 3) Effets biologiques des rayonnements ionisants





## Rappels de physique et de biologie des rayonnements ionisants

**1) Définitions et principes : radioactivité, période, décroissance, mode de désintégration, propriétés des rayonnements.**

**2) Interaction Rayonnement et matière : classification, mode d'interaction, dose absorbée.**

**3) Effets biologiques des rayonnements.**

**4) La nature des effets sur l'homme.**

**5) la radioprotection, les grandeurs utiles (dose efficace).**

## Origine des lésions radioinduites :

*Ionisations*, créant des espèces chimiques très réactives  
(espèces radicalaires de l'eau, peroxydes, hydroxyle etc., des  
constituants de l'ADN et de toute autre molécule)

## Cibles sensibles principales :

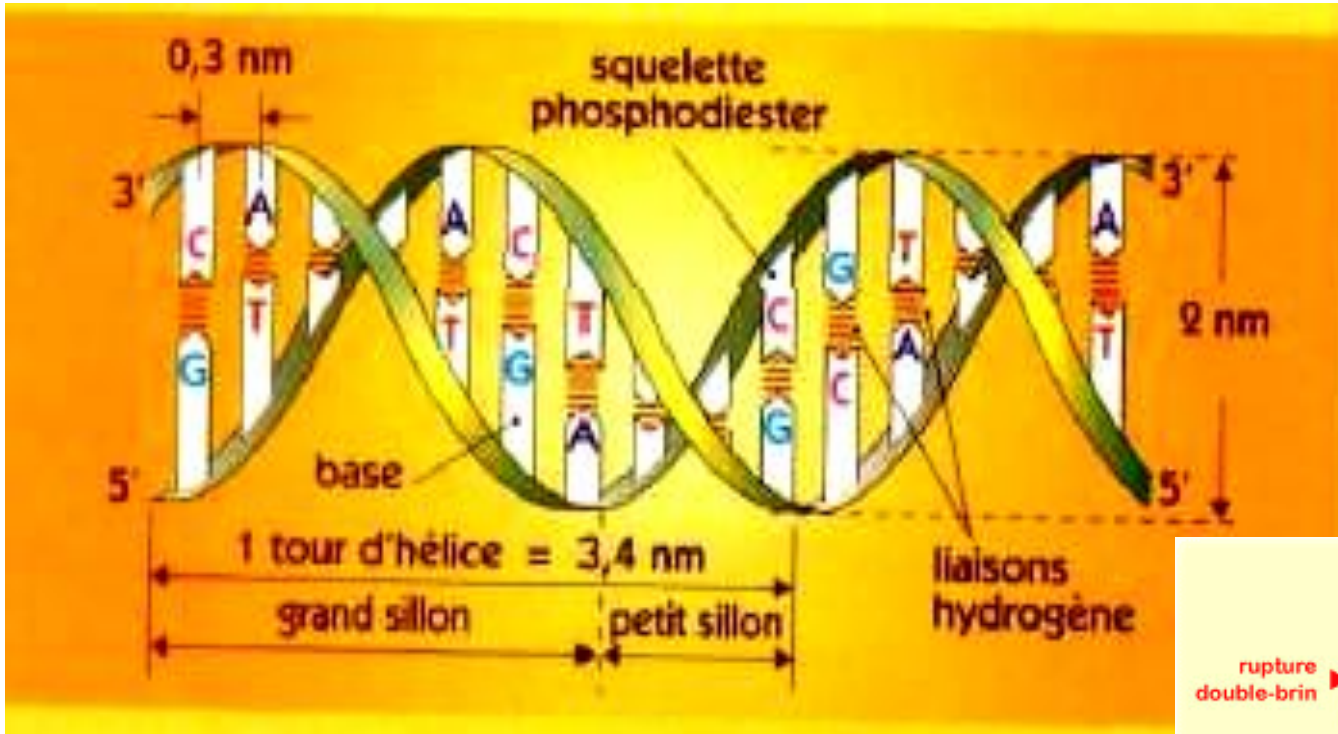
*ADN* fonction cruciale dans la cellule

*Acides gras insaturés* constitutifs des membranes des cellules ,  
*Acides aminés* des protéines etc.

## Conséquences :

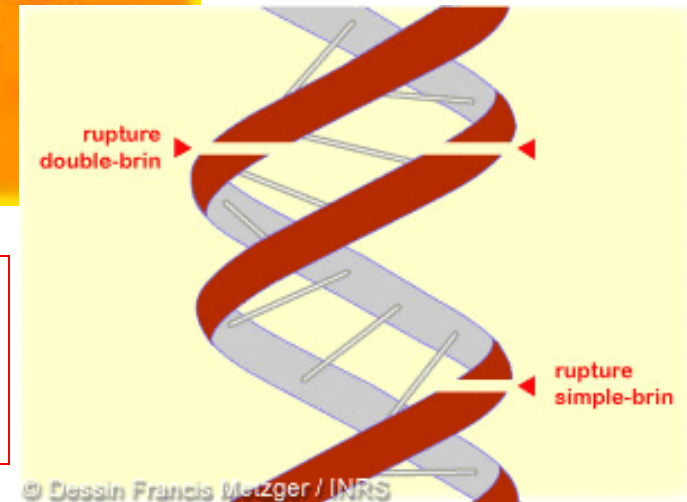
*Mortalité, mutation* cellulaires non spécifiques de l'action des  
RI.

# Molécule d'ADN



A: Adénine  
T: Thymin  
C: Cytosine  
G: Guanine

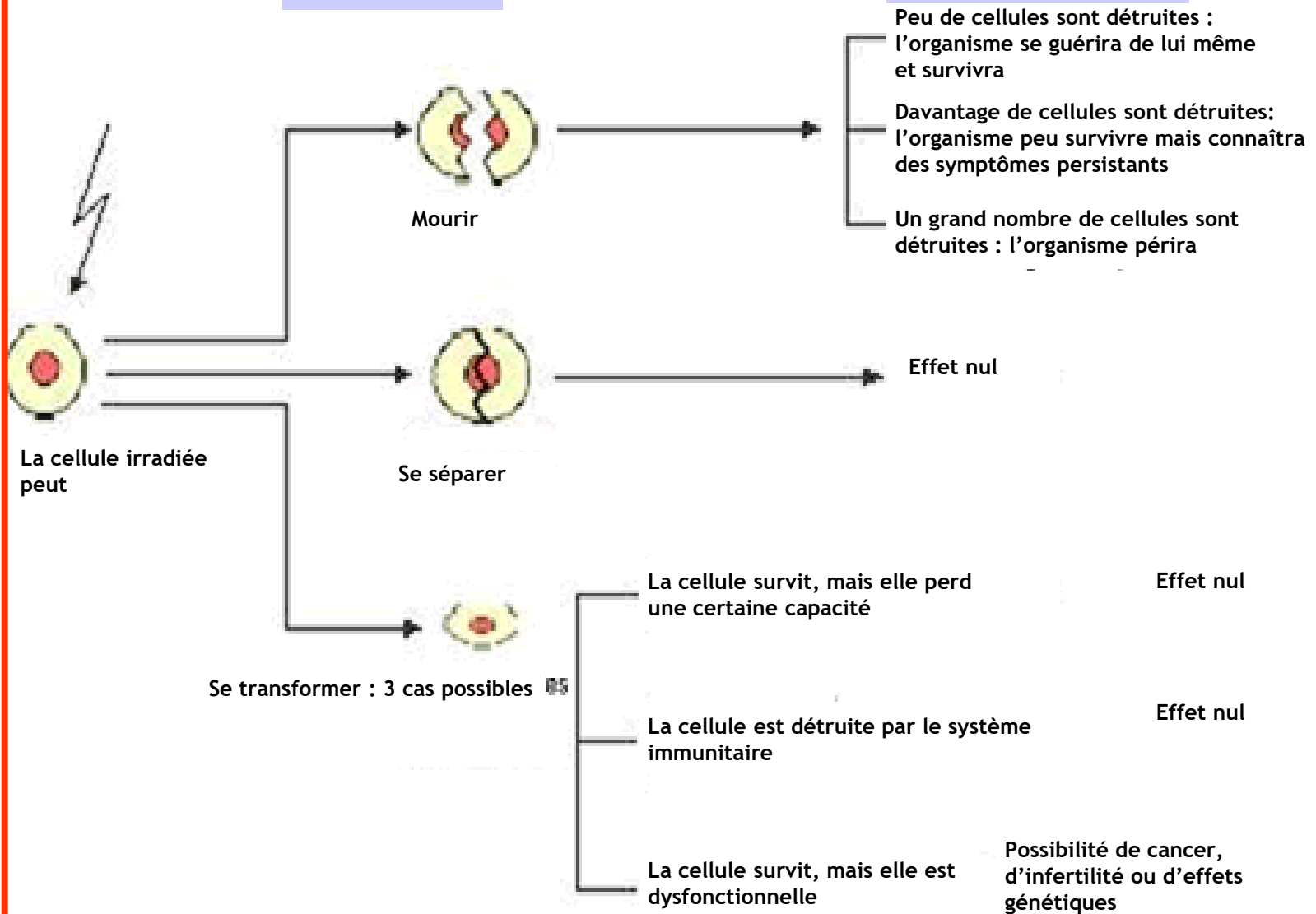
**Altérations possibles de l'ADN consécutives à une exposition à des rayonnements ionisants (non spécifiques).  
Rupture double brin, réparation incomplète.**



© Dessin Francis Metzger / INRS

Dans la cellule

Dans l'organisme



## Importance et nature des lésions cellulaires

A dose absorbée égale, importance des lésions tient à :

- nature des rayonnements
- débit de la dose reçue

*une même dose reçue en peu de temps est bien plus nocive que si elle est étalée dans le temps*

- certains facteurs chimiques ou physiques influant sur la sensibilité cellulaire

*température, présence de certaines substances chimiques tels l'oxygène*

- type des cellules exposées : les cellules qui ont un potentiel de multiplication important sont d'autant plus « radiosensibles ».

*les cellules dites « indifférenciées », telles les cellules de la moelle osseuse*

05/04/2017

## 4) *La nature des effets sur l'homme...*





## Rappels de physique et de biologie des rayonnements ionisants

- 1) Définitions et principes : radioactivité, période, décroissance, mode de désintégration, propriétés des rayonnements.**
- 2) Interaction Rayonnement et matière : classification, mode d'interaction, dose absorbée.**
- 3) Effets biologiques des rayonnements.**
- 4) La nature des effets sur l'homme.**
- 5) la radioprotection, les grandeurs utiles (dose efficace).**



## Expérience des radiothérapeutes, accidents graves, Hiroshima-Nagasaki

On distingue :

les effets d'une mort cellulaire massive non compensée, entraînant des lésions tissulaires, entraînant à leur tour l'altération de la fonction de l'organe.

Ces effets s'expriment de manière « *déterministe* »

Les manifestations de l'altération de l'ADN cellulaire, les cancers et les effets héréditaires.

Ces effets s'expriment de manière « *aléatoire* »

## Les effets déterministes

- *Systematiques* au-delà d'une *dose seuil*
- Apparaissent de façon *rapide* (*quelques heures à quelques mois*)
- Leur gravité augmente avec la dose absorbée
- Seuils propres à chaque tissus et pathologies diverses (décrites du point de vue symptomatique)

## Gravité d'une irradiation et paramètres déterminants

- La dose absorbée : gravité proportionnelle
- Le débit de dose absorbée :
  - 1,5 gray en 50 ans (30 mGy/an) , pas d'effets biologiques détectables
  - 1,5 gray en une minute (**irradiation aiguë**), désordres hématologiques
- Le type de cellules : radiosensibilité des cellules à métabolisme élevé (cellules du sang, sexuelles...)
- L'étendue de l'irradiation : à dose absorbée égale, *irradiation globale (organisme entier) plus dangereuse que irradiation localisée (partielle)*.
- Le facteur individuel

## Irradiation aiguë (unique) partielle

	Dose (Gy)	Dose (Gy)
Gonades Stérilité transitoire Stérilité définitive	Homme 0,1 0,5 6	Femme 3 (<30ans) 3 (40 ans), 7 (<30ans)
Cristallin cataracte	5 10	idem
Peau		idem
Épilation simple et transitoire	4 5	
Érythème (rougeur)	6 12	
Radiodermite sèche	12 15	
Radiodermite exsudative (mise à nu du derme)	15 20	
Radionécrose	> 25 30	

## Irradiation aiguë globale

Dose (Gy)	Signes d'irradiation
0,3	Anomalies minimales sur prélèvement sanguin
1	Premiers symptômes : nausées, vomissements
2	Atteinte de la moelle osseuse (anémie, infections, hémorragies) hospitalisation indispensable.
3	Premiers signes cutanés : rougeur de la peau, perte des cheveux.
4,5	Dose létale 50, 50 % de mortalité (lié à la destruction des cellules sanguines) en l'absence de traitement.
8	Syndrome intestinal (diarrhée) et respiratoire
12	Syndrome neurologique (obnubilation, coma)

## Effets aléatoires

- Effets *probabilistes*,

- d'apparition à long terme (quelques années pour les leucémies et les cancers de la thyroïde de l'enfant, 40 ans pour d'autres cancers),

- sans spécificité/cancers apparaissant spontanément,

- de fréquence augmentant avec la dose,

- de gravité indépendante de la dose.

# Généralités sur le risque cancérigène des rayonnements ionisants

## 1/identification du danger,

les faits marquants du début du XX siècle

- Cancers cutanés radioinduits et leucémies chez les physiciens et médecins pratiquant des examens radiologiques,
- Cancers des sinus induits par le radium 226 chez les miniaturistes,...

## 2/ Quantification du risque,

deuxième moitié du XX siècle

- Victimes d'Hiroshima et de Nagasaki (début de l'étude « Life Span Study » 1950). Étude épidémiologique la plus robuste, statistiquement, pour évaluer le risque aux faibles doses.
- Victimes de Tchernobyl,...

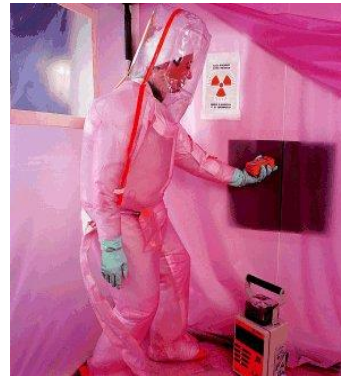
## Principaux risques encourus lors de la grossesse

Période Durée	Pré-implantation 0 au 9e jours	Organogenèse 9e au 60e jour	Fœtale 60e -270e jour
Effets	Mort intra utérine  ou développement normal	Mort intra utérine,  malformations mal développement du système nerveux central	mal développement  et retard mental (60e au 120 e jour), défaut de croissance  cancers
<p>Recommandations CIPR (84):</p> <p>Dose à l'enfant à naître &lt; 100 mGy aucune action Dose &gt; 200 mGy 1TG recommandée.</p> <p>Dose &gt; 500 mGy -(3ème 16ème semaine) risque significatif. 100 mGy &lt; Dose &lt; 200 mGy réflexion</p> <p style="text-align: right;"><small>Embryon humain de 6 semaines</small></p>			

## Bilan : dose d'irradiation aiguë et effets sur les individus

- **Doses moyennes et fortes** (quelques centaines de mGy au Gy)  
un excès de risque de cancers **réel** (certain au delà de 0,5 Gy délivré à fort débit), des effets déterministes
  
- **Faibles et très faibles doses** (< à la centaine de mGy)  
une augmentation du risque de cancers radio induits **non avérée**, un taux d'incidence indiscernable du taux « spontané » d'apparition de cancers mortels dans la population.

## 5) La radioprotection, les grandeurs utiles (dose efficace)...



## Rappels de physique et de biologie des rayonnements ionisants

- 1) Définitions et principes : radioactivité, période, décroissance, mode de désintégration, propriétés des rayonnements.**
- 2) Interaction Rayonnement et matière : classification, mode d'interaction, dose absorbée.**
- 3) Effets biologiques des rayonnements.**
- 4) La nature des effets sur l'homme.**
- 5) la radioprotection, les grandeurs utiles (dose efficace).**

## Radioprotection

*« Ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes directement ou indirectement, y compris par les atteintes portées à l'environnement »*

Article 1 er -I de la loi n°2006-686 du 13 juin 2006

## Les grandeurs en radioprotection

- *Objectif* : apprécier les effets nocifs tardifs des irradiations, avec une grandeur qui exprime les effets biologiques et recouvre toutes les modalités d'exposition.

Cette grandeur devra permettre de comparer tous les rayonnements, et les expositions de toutes sortes (externe, interne, globale ou partielle).

« *La dose efficace exprimée en Sv* »

# Objectifs de la réglementation

■ Fondée sur « l'hypothèse de gestion » qu'une dose infime peut produire un effet, la législation et la réglementation visent à :

- soustraire l'ensemble des personnes aux effets déterministes;
- réduire les effets stochastiques (sans seuil) à un niveau « acceptable »

□ La stratégie réglementaire est fondée sur trois principes fondamentaux :

- la justification des activités,
- l'optimisation des expositions,
- la limitation des doses reçues.

□ Ces principes sont énoncés dans le code la santé (Article L 1333-1). Deux d'entre eux (justification et optimisation) s'appliquent à toutes les situations d'exposition.

# *Les trois principes de radioprotection*

- La justification

Toute utilisation de rayonnements ionisants doit être justifiée au regard des avantages qu'elle comporte par rapport à d'autres techniques. Dans l'analyse « coût-avantage », la dose n'intervient pas: toute dose induite est injustifiée;

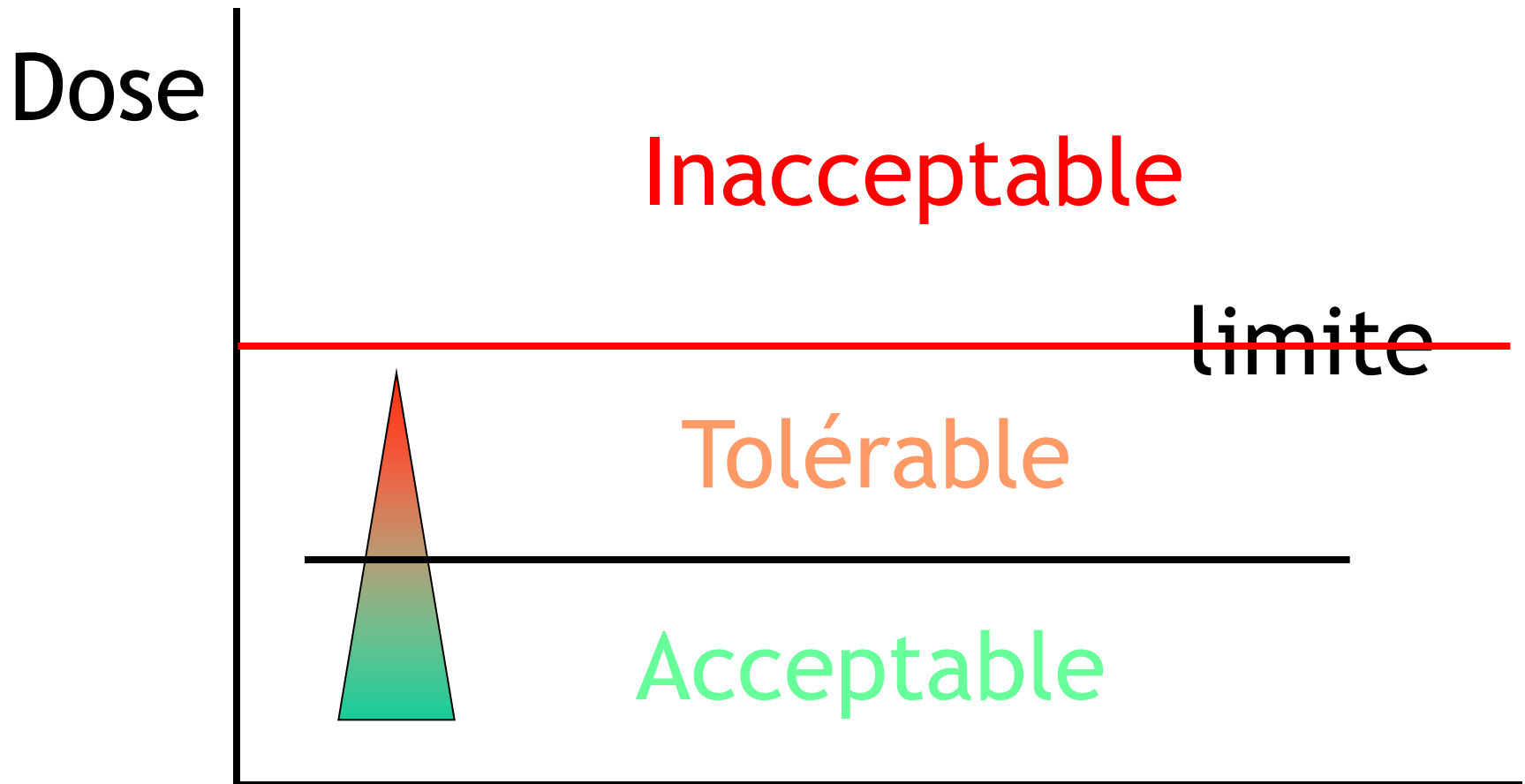
- La limitation des doses

Elle vise à éviter les effets déterministes et à réduire la fréquence des effets aléatoires;

- L'optimisation

Elle prend en compte prise la double incertitude. Pas de seuil d'innocuité a priori, survenue aléatoire des effets radio-induits à caractère stochastique.

# PRINCIPES DE LA RADIOPROTECTION





# *Le droit de la radioprotection*

- Il résulte pour l'essentiel de la transposition des directives européennes
- Il regroupe la plupart des règlements antérieurs sous le timbre du code de la santé et du code du travail ...
- Il inscrit clairement le droit de la radioprotection dans le droit commun.
- Il étend explicitement la notion d'activités visées à celles où l'exposition résulte de rayonnements naturels et aux interventions en cas d'urgence;
- Il aborde le champ nouveau des expositions médicales;
- Il rend plus opérationnel le principe d'optimisation;
- Il abaisse des limites « population et travailleurs ».

## Protection des embryons vis à vis des rayonnements ionisants (sous-section1)

### ■ Décret du 31 mars 2003 – Article R 231-77 (I) (nouvelle réglementation):

« En cas de grossesse, les dispositions sont prises pour que l'exposition, dans son emploi, de la femme enceinte soit telle que **l'exposition de l'enfant à naître**, pendant le temps qui s'écoule entre la déclaration de grossesse et le moment de l'accouchement, soit aussi faible que raisonnablement possible, et en tout état de cause **en dessous de 1 mSv.** »



# *Règles d'aménagement des locaux de travail*

- Après avoir évalué les risques, l'employeur doit délimiter des zones surveillées (à partir de 1 mSv/an) ou contrôlées (à partir de 6 mSv/an); cf. arrêté du 15 mai 2006;
- Il doit (faire) procéder à divers contrôles techniques sur les sources ou les appareils émetteurs de RI et des appareils de mesures (cf. arrêté du 25 octobre 2005) ;
- Il définit les mesures de protection collective ou individuelle ;
- Il doit évaluer les risques d'exposition externe ou interne par des contrôles d'ambiance.

# *Le zonage autour des sources de rayonnements ionisants\**

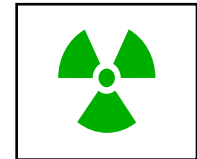
- Si, dans les conditions normales de travail, les travailleurs exposés sont susceptibles de recevoir:
  - une dose efficace  $> 1\text{mSv/an}$  ou une dose équivalente  $> 1/10$  des valeurs limites pour les différentes parties du corps\*

Mise en place d'une zone surveillée



- une dose efficace  $> 6\text{mSv/an}$  ou une dose équivalente  $> 3/10$  des valeurs limite\*

Mise en place d'une zone contrôlée

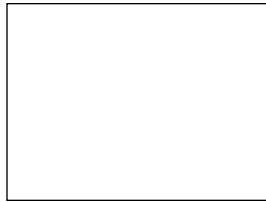


- A l'intérieur des zones surveillées, contrôlées et des zones attenantes, le chef d'établissement définit des points de mesure ou de prélèvements représentatifs de l'exposition des travailleurs qui constituent des références pour les contrôles d'ambiance

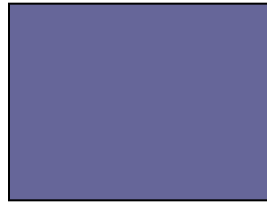
## Zonage destiné aux installations fixes

Dose équivalente  
aux extrémités

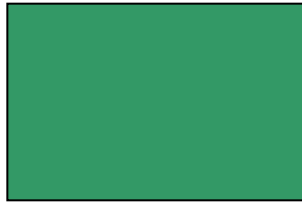
Z. Public



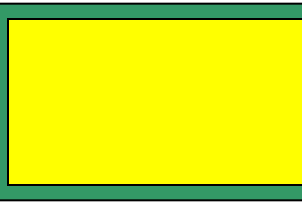
Z. Surveillée



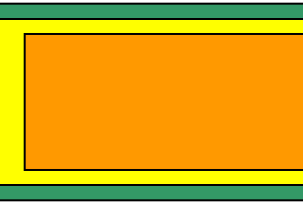
Z. Contrôlée



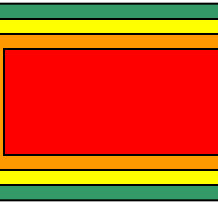
Z. Jaune



Z. orange



Z. Rouge



0,2 mSv/h

0,65 mSv/h

50 mSv/h

2,5 Sv/h

Dose  
efficace

[5  $\mu$ Sv/j]  
80  $\mu$ Sv/m

7,5  
 $\mu$ Sv/h

25  
 $\mu$ Sv/h

2  
mSv/h

100  
mSv/h

Débit de dose  
Exposition Externe seule

2 mSv/h

100 mSv/h

Attention : Les valeurs limites pour les Doses équivalentes et la Dose efficace correspondent à des « **doses susceptibles d'être reçues en 1 heure** » (et non à des « débits de doses » au sens propre...)

05/04/2017

## Estimation du risque aux faibles doses.

- Extrapolation aux faibles doses (jusqu'à la dose zéro) des données obtenues à fortes doses et fort débit de dose (essentiellement les données d'Hiroshima Nagasaki ),
- Relation dose effet linéaire sans seuil, toute dose comporte un risque de cancer accru, ce risque est proportionnel à la dose reçue.

« évaluation du risque de cancer mortel pour la population,  $5 \cdot 10^{-2}$  ISv sur la vie entière »

Risque entre 0 et 500 cancers mortels pour 10 000 personnes qui auraient reçu 1 Sv

## Règles pour les travailleurs exposés

- Les travailleurs sont exposés à partir de 1 mSv/an.
- Ils sont classés en catégorie A si la dose susceptible d'être reçue est supérieure à 6 mSv/an. Sinon en catégorie B;
- L'employeur doit former les salariés et les informer des risques ;
- Il doit établir une fiche de poste pour tous ceux qui sont exposés ;
- Chaque travailleur exposé bénéficie d'un suivi dosimétrique adapté (passif - et opérationnel en Zone Contrôlée);
- En cas de dépassement, tous les travailleurs sont suivis médicalement comme des travailleurs de catégorie A : en outre, les CDD et les intérim bénéficient d'une prolongation du contrat.

## Rappels

### Modes d'expositions aux rayonnement ionisants

L'exposition externe

L'exposition interne

### Exposition interne : mode de pénétration dans l'organisme

Par inhalation

Par ingestion

Par blessure

Par voie transcutanée

### Moyens de protection et de prévention contre l'exposition interne

Protections collectives

Protections individuelles

# EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

**20 mSv** : Limite annuelle de dose pour les travailleurs

**2,3 mSv** : Exposition naturelle moyenne en France

**1 mSv** : Limite de dose annuelle pour la population

**0,1 mSv** : (sur 0.1 s) Radiographie pulmonaire

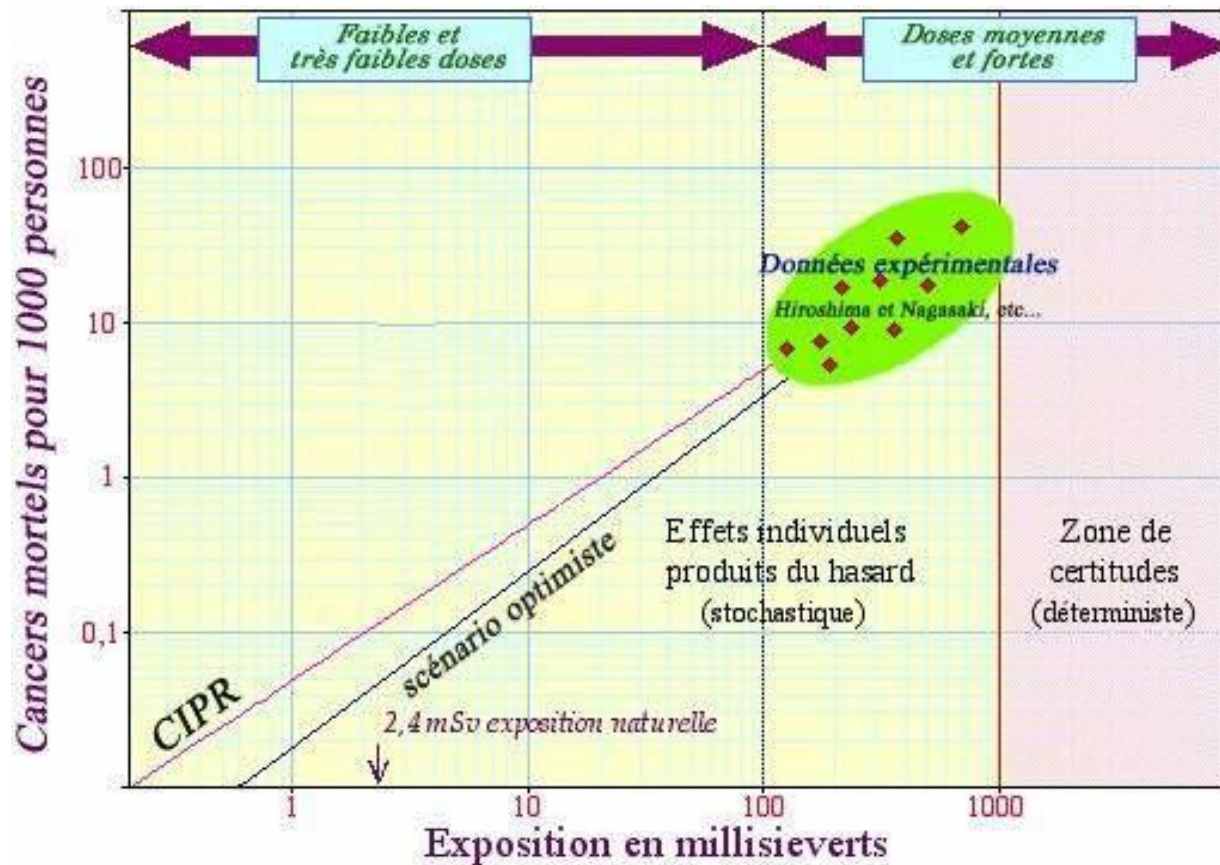
**0,03 mSv** : (Sur 8 h) Vol long courrier sur Airbus (rayons cosmiques)

**0,01 mSv** : Une semaine à la montagne à 1500 m (rayons cosmiques)

**0,001 mSv** : Dose moyenne évaluée due aux rejets réels de l'activité nucléaire

**0,00003 mSv** : (sur 0,1 s à 1 m) Radiographie dentaire

la CIPR fait l'hypothèse que l'effet reste en proportion de la dose. La relation se réduit à une droite issue de l'origine et passant au plus près de données expérimentales.  
Source IN2P3



## La dose équivalente ( $H_T$ )

« La dose absorbée ( $D_{T,R}$  en Gray), moyennée au tissu ou à l'organe, ne rend pas compte des différences d'effets selon le type et l'énergie des rayonnements »

On définit la dose équivalente, en Sievert

$$H_T = \sum W_R \cdot D_{TR}$$

$W_R$  facteur de pondération lié à la nature du rayonnement, égal à 1 pour  $\beta$ ,  $\gamma$ , 20 pour  $\alpha$ .

## La Dose efficace (E)

« La dose équivalente au tissu ou à l'organe ne rend pas compte des différences de sensibilité du tissu ou de l'organe, ni du dommage subit par l'ensemble de l'organisme »

On exprime la dose efficace (non mesurable), en Sievert

$$E = \sum W_T \cdot H_T$$

$W_T$  facteur de pondération tissulaire, égal à 0,2 pour les gonades, 0,12 pour la moelle osseuse, 0,05 pour la thyroïde,..., avec somme des  $W_T = 1$

## Les équivalents de dose $H^*$ et $H_p$

- Les grandeurs dosimétriques de protection définies dans la C1PR 60 ne sont pas directement mesurables.

-+ La C1UR introduit les grandeurs opérationnelles

Estimateurs (majorants) de la dose efficace E

- Surveillance de zone de travail et de l'environnement

Equivalent de dose ambiant  $H^*(10)$  E  
 $H^*(0,07)$   $H_{\text{peau}}$

- Surveillance individuelle

Equivalent de dose personnel  $H_p(10)$  E  
 $H_p(0,07)$   $H_{\text{peau}}$



# **SOURCES ET VOIES** **D'EXPOSITION DES** **TRAVAILLEURS**

## Les sources d'exposition aux rayonnements ionisants

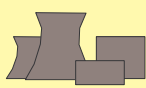


./ Sources naturelles (terrestres, cosmiques)

./ Sources artificielles (radionucléides, accélérateurs / générateurs de rayonnements)

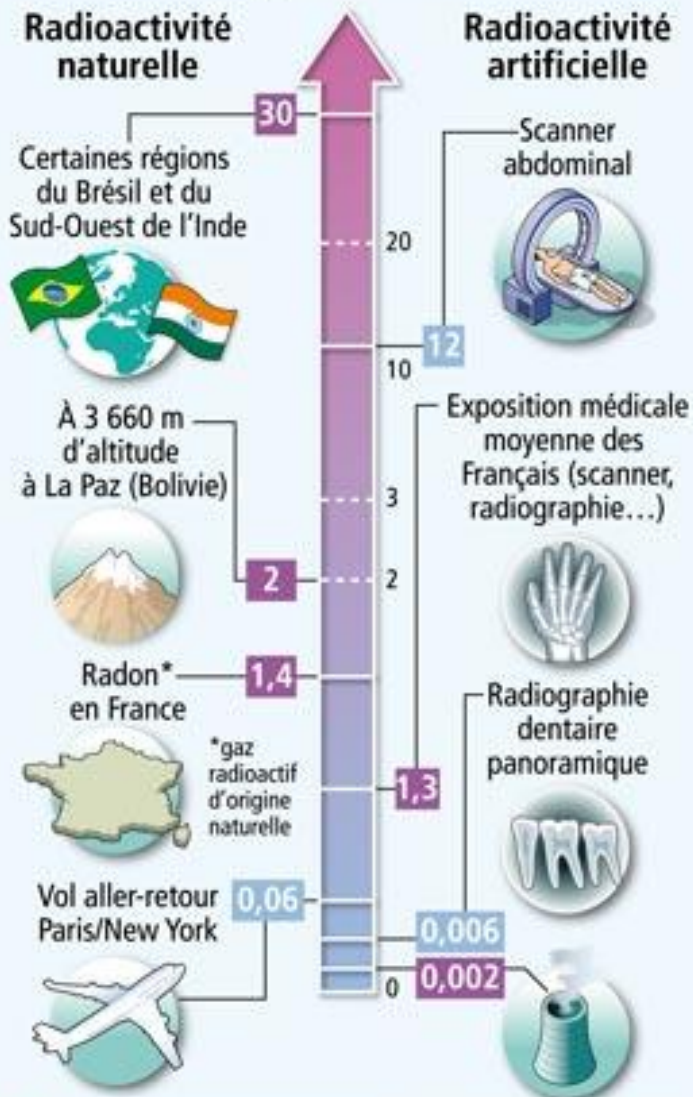
Caractérisées par :

- la nature et l'énergie des rayonnements émis :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , X, et n
- leur conditionnement (sources scellées / non scellées)
- leur géométrie (sources ponctuelles, surfaciques ou volumiques de plus ou moins grande dimensions)
- l'activité et la période (sources isotopiques) ou la fluence (irradiateurs)
- le débit de dose

# Les sources de rayonnement en France

	INDUSTRIE NUCLEAIRE	56 REACTEURS DE PUISSANCE
		USINES D'ENRICHISSEMENT ET RETRAITEMENT
	UTILISATEURS DE RADIOISOTOPES ET DE SOURCES DE RAYONNEMENT	INDUSTRIE
		CENTRES MEDICAUX
		CENTRES DE RECHERCHE
	TRANSPORT	300 000 COLIS PAR AN DONT 500 POUR LES COMBUSTIBLES IRRADIES
	AUTRES	12 REACTEURS PROPULSION NAVALE SATELLITES NUCLEAIRES.

## Quelques exemples de sources d'exposition sur l'homme



Source : IRSN

Pour les estimations en vol : <https://www.sievert-system.org/>

05/04/2017

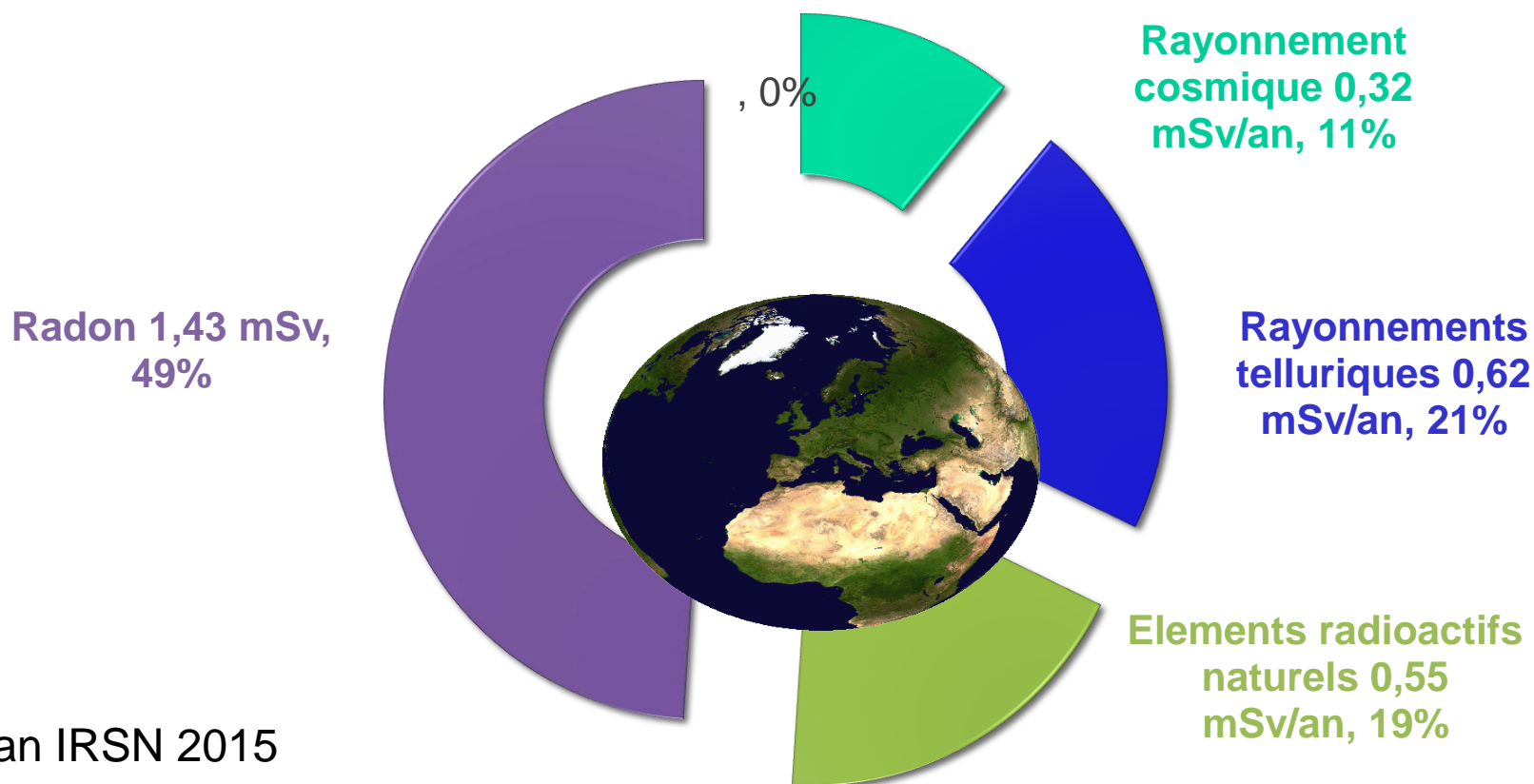
■ Dose moyenne en mSv par an  
■ Dose "ponctuelle" en mSv

Rejet des centrales nucléaires dans l'environnement



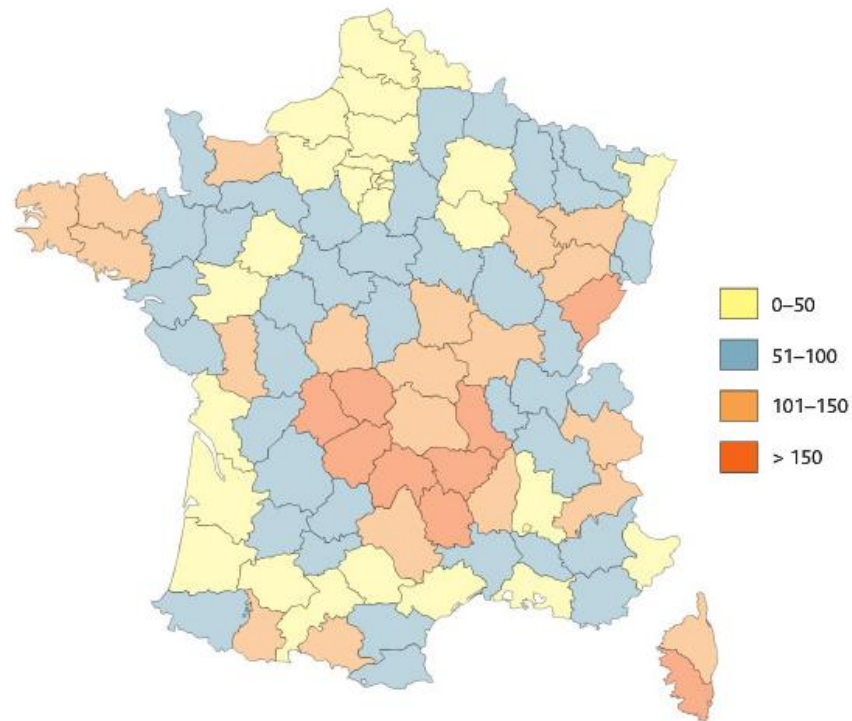
# Exposition naturelle :

Exposition naturelle moyenne : 2,9 mSv/an



Bilan IRSN 2015

# I Le radon



Moyenne par département des concentrations en radon dans l'air des habitations  
(en becquerel par mètre-cube, Bq/m<sup>3</sup>)

Source : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire



# Exposition artificielle :

Industrie et Recherche

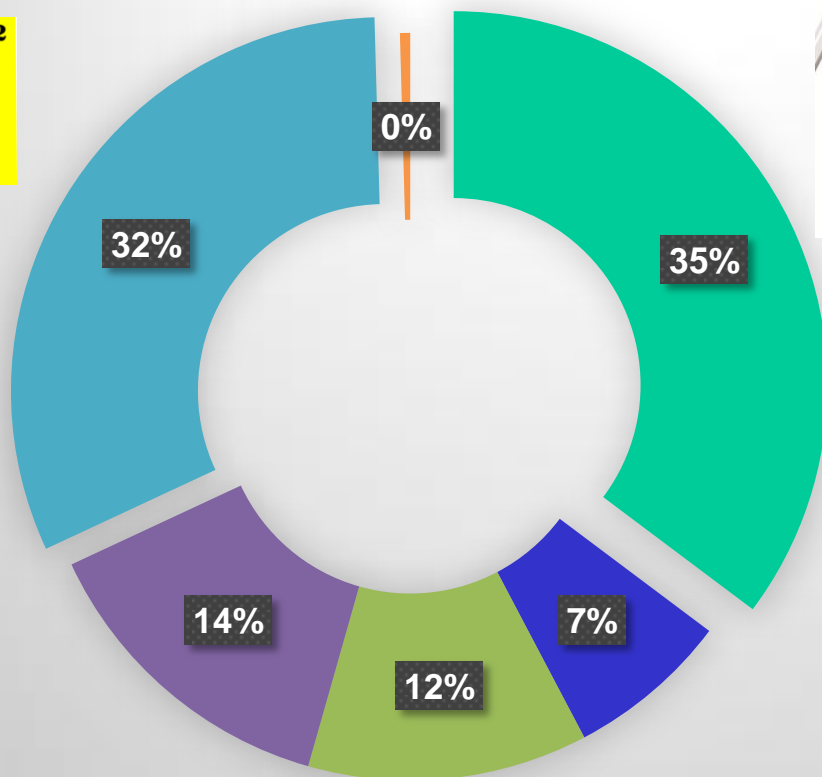
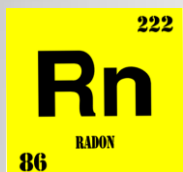
Vétérinaire

Médical

Radiothérapie, imagerie à visée diagnostique utilisant des radioéléments, diagnostic (y compris radiologie interventionnelle), recherche biomédicale

# I Exposition totale :

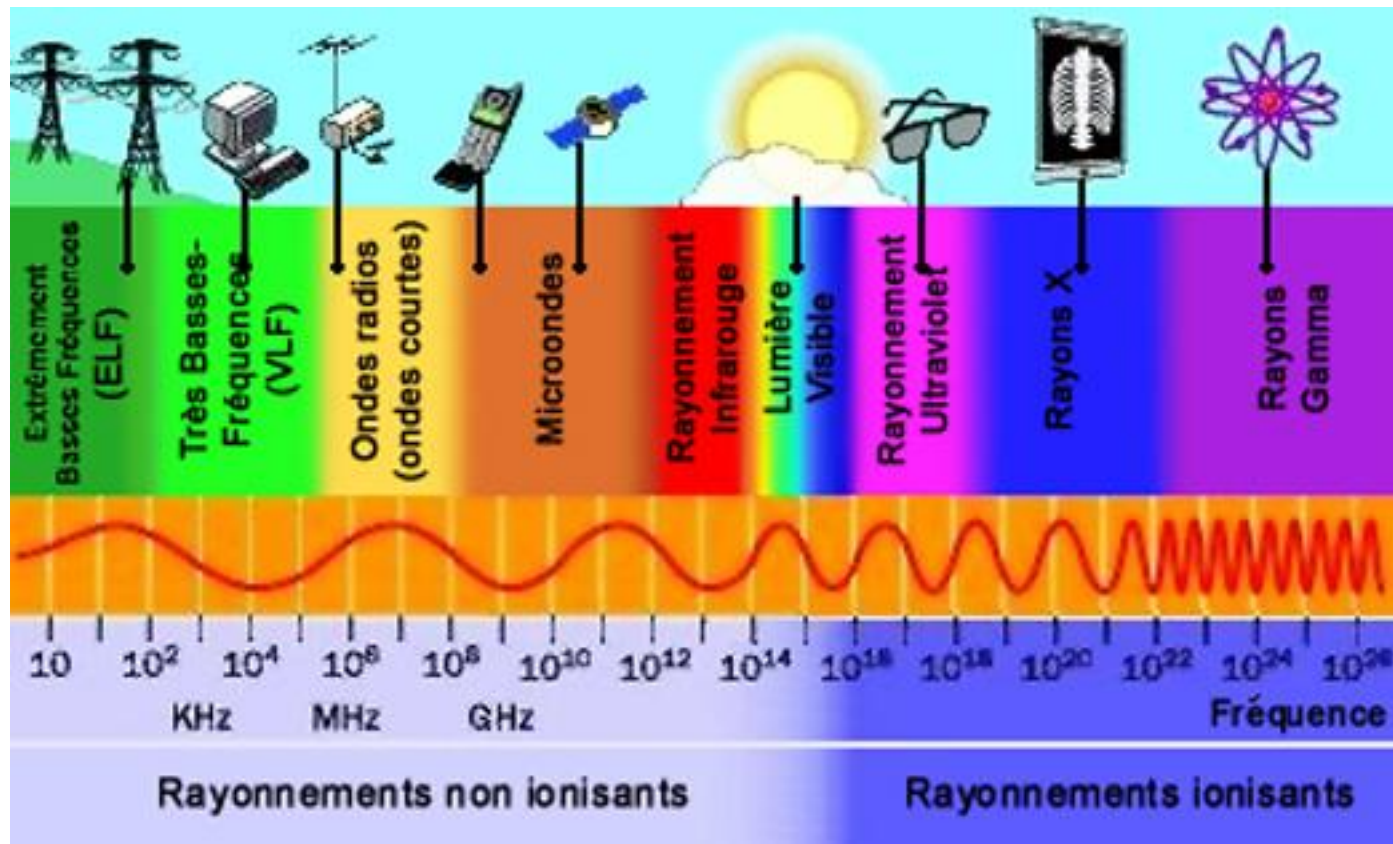
Exposition moyenne: 4,5 mSv/an



- Médical
- Rayonnements cosmiques
- Eaux et aliments
- Rayonnements telluriques
- Radon
- Autre (industrie)

Bilan IRSN 2015

# P1 Rayonnements ionisants





En pratique, les travailleurs peuvent être exposés par plusieurs sources à la fois :

- avec des rayonnements multiples
- avec des débits de dose pouvant couvrir plusieurs ordres de grandeur (du fonctionnement normal au cas d'accident)
- de façon plus ou moins homogène (au niveau de l'organisme entier ou de façon extrêmement localisée)
- par différentes voies d'atteinte (interne, externe)

## LES VOIES D'EXPOSITION

### Exposition externe

- exposition à distance et au contact d'une source (scellée ou non scellée)  
 $\text{Sv/Bq}$
- exposition par immersion dans un panache (contamination atmosphérique par un gaz/vapeur ou un aérosol)  $\text{Sv/Bq.m}^{-3}$
- exposition due à une contamination surfacique (dépôts de particules sur les murs, sols,.)  $\text{Sv/Bq.m}^{-2}$
- exposition due à un sol contaminé  $\text{Sv/Bq.kg}^{-1}$
- exposition due à une contamination corporelle externe (peau ou vêtement)  
 $\text{Sv/Bq.cm}^{-2}$



Rayonnements pénétrants

risque = dommages au niveau de l'organisme entier

Rayonnements peu pénétrants

risque = dommages aux extrémités

Les doses d'exposition externe sont, en général, facilement mesurables. Les incertitudes associées sont faibles.

## Exposition externe à distance

Doses externes à distance essentiellement dues aux rayonnements X,  $\gamma$

Radionucléide	Energie (keV)	Période	Débit de dose dans l'air (mGy/h) à 1 m
$^{60}\text{Co}$	1250	5,3 ans	11
$^{137}\text{Cs}$	662	30 ans	3
$^{192}\text{Ir}$	316	74 j	4
$^{241}\text{Am}$	60	433 a	0,5
$^{244}\text{Cm}$	17	18,1 ans	0,1

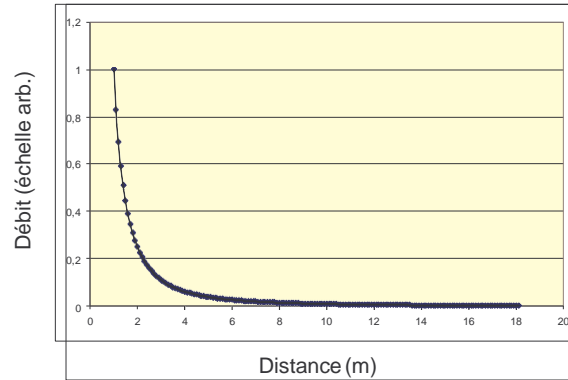
Débit de dose absorbée dans l'air (mGy/h) à 1 m pour des sources ponctuelles gamma ou X de 37 GBq (1 Ci)

-+ Fortes variations en fonction du type de source

## Exposition externe à distance

Le débit de dose décroît approximativement en fonction du carré  
de la distance:


$$\frac{D}{D_0} \approx \frac{d_0^2}{d^2}$$



## Exposition externe à distance

radionucléides	rayonnement	Débit de dose (mSv/h) à 30 cm
<sup>14</sup> C	β (max = 157 keV)	0
<sup>32</sup> P	β (max = 1710 keV)	4,4
<sup>60</sup> Co	β (max = 318 keV ) γ	0,47 0,14
<sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y	β (max = 2284 keV)	7,5
<sup>99m</sup> Tc- <sup>99</sup> Mo	β (max = 1214 keV) γ	4 0,017
<sup>131</sup> I	β (606 keV) γ	3,2 0,029

Débit d'équivalent de dose ambiant (mSv/h) à 30 cm d'une source ponctuelle de 37 MBq émettrice de rayonnements bêta

 Rayonnements de freinage produits par les sources β de forte activité enfermées dans une enveloppe de protection à Z élevé

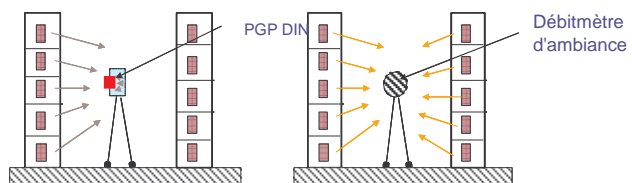
## Exposition externe à distance

Radionucléide	E $\beta$ max (keV)	Période	Débit de dose dans l'air (mGy/h)			
			contact	1 cm	10 cm	30 cm
<sup>85</sup> Kr	1250	10,7 ans	6.10 <sup>7</sup>	3.10 <sup>6</sup>	4.10 <sup>4</sup>	4.10 <sup>3</sup>
<sup>90</sup> Sr <sup>90</sup> Y	2280	28,8 ans	12.10 <sup>7</sup>	6.10 <sup>6</sup>	7.10 <sup>4</sup>	6.10 <sup>3</sup>

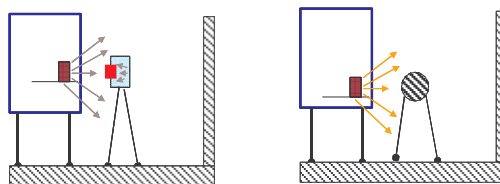
Débit de dose absorbée (mGy/h) pour  
différentes sources  $\beta$   
ponctuelles de 37 GBq

## Exposition externe à distance

Entreposage : champ neutronique multi-directionnel



Boîtes à gants : champ neutronique mono directionnel



## Exposition externe par immersion

### Risque pour des sources gazeuses de périodes courtes

	Radionucléide	Période	Débit d'équivalent de dose (mSv/h)
Emetteurs $\beta^+$	$^{11}\text{C}$	20,5 min	6
	$^{15}\text{O}$	2 min	6
	$^{18}\text{F}$	109,7 min	6
Emetteur X, e	$^{123}\text{I}$	13,1 h	1
Emetteur X, $\beta^-$	$^{133}\text{Xe}$	5,2 j	0,2

Débit de dose équivalente (mSv/h) pour une immersion dans un nuage semi-infini d'activité volumique de 37 MBq/m<sup>3</sup>

## Atténuation des rayonnements par des écrans

( $X$  = nb. de part. par  $\text{cm}^2$  de matière,  
prop. à  $x$ , l'épaisseur traversée)

$$\varphi_X = \frac{\varphi_0}{4\pi d^2} \times B \times e^{-\Sigma x}$$

$\Sigma$  est la section efficace totale d'interaction dans la matière

$\varphi_0$  est le flux incident

$\varphi_X$  est le flux derrière l'écran d'épaisseur  $x$   $B$  est un facteur de correction (« build-up »)


$$\text{Facteur d'atténuation} = \varphi_0 / \varphi_X$$

$$\text{Facteur de transmission} = \varphi_X / \varphi_0$$

## Atténuation des rayonnements $\gamma$

Matériaux	Épaisseur $\times 1/2$ cm	Épaisseur $\times 1/10$ cm
Air	90	270
Eau	10	32
Béton ordinaire	5,1	17
Aluminium	5	15
Fer	1,5	5,1
Plomb	0,85	2,8

Atténuation 1/2 et 1/10 des photons incidents  $E_\gamma=1$  MeV par différents matériaux




La dose reçue par une victime en cas d'accident de criticité est difficile à évaluer. Elle dépend :

- du type de source
- de la distance par rapport à la source
- de la présence possible d'écrans
- de la position de la personne irradiée
- de l'atténuation des rayonnements dans l'organisme

Cette évaluation est difficile en raison de :

- la nature du champ mixte ( $n, \gamma$ )
- De l'hétérogénéité de la distribution de la dose dans l'organisme



• Contrairement aux autres sources d'exposition externe qui n'existent que pendant le temps de travail, l'exposition externe due à une contamination corporelle (peau, cheveux ou vêtements) dure aussi longtemps que cette contamination n'est pas découverte et éliminée.

• Le risque indirect associé à une contamination corporelle externe est l'induction d'une exposition interne dans certaines conditions :

./ port de doigts contaminés au nez ou à la bouche

./ remise en suspension d'une contamination non fixée dans la sphère respiratoire

./ diffusion du contaminant à travers la peau



En cas de contamination superficielle de la peau, la dose dépend de :

- L'activité déposée et du temps de contact avec la peau
- La distance entre la source et les tissus les plus radiosensibles (=couche basale de l'épiderme)
  - la contamination peut être totalement superficielle
  - la contamination peut avoir diffusé plus ou moins en profondeur
- La nature et l'énergie des rayonnements

Les effets cutanés déterministes sont le résultat d'exposition à des rayonnements  $\beta$  de diverses énergies et  $\gamma$  et X de faibles énergies




L'incident peut être décomposé en 2 phases :

- **Phase initiale** : depuis l'instant où la contamination s'est produite jusqu'à l'opération de décontamination par le SST
- **Phase résiduelle** : qui existe si une contamination résiduelle persiste après la décontamination (correspond à une contamination en profondeur)

La contamination externe peut être ramenée à 2 cas extrêmes :

- La contamination est limitée à la couche cornée superficielle. L'activité n'est présente qu'à la phase initiale et disparaît complètement avec l'opération de décontamination
- Toute la contamination a immédiatement pénétré de façon homogène dans l'épiderme jusqu'à la couche basale. La décontamination n'a eu aucun effet : les activités mesurées pendant la phase initiale et la phase résiduelle sont identiques.



Du point de vue dosimétrique, seules les émissions bêtas sont importantes (radionucléides  $\beta$  purs ou  $\beta\gamma$ )

- Les émetteurs  $\gamma$  purs ne contribuent que faiblement à la dose à la peau en raison de leur faible transfert linéique d'énergie .

- Les émetteurs  $\alpha$  ont un parcours trop faible dans la matière pour traverser la couche cornée de peau non lésée et atteindre les couches basales critiques

-+ **Mesure** = quantification des radionucléides émetteurs  $\beta$  purs ou  $\beta\gamma$

- La spectrométrie  $\gamma$  permet de quantifier facilement l'activité des émetteurs  $\beta\gamma$

- La détection des radionucléides émetteurs  $\beta$  purs à l'intérieur d'un mélange d'émetteurs  $\beta\gamma$  ou d'émetteurs  $\beta$  purs est beaucoup plus délicate

## Exposition externe par contamination cutanée

Du point de vue dosimétrique, seules les émissions bêtas sont importantes (radionucléides  $\beta$  purs ou  $\beta\gamma$ )

Radionucléide	E $\beta$ max (keV)	Dose équivalente (mSv/h)	Parcours ( $\mu$ m)
$^3\text{H}$	19	0	4
$^{14}\text{C}$	157	12	200
$^{90}\text{Sr}$ $^{90}\text{Y}$	2284	130	8200
$^{99}\text{Mo}$ $^{99\text{m}}\text{Tc}$	1214	70	5500
$^{131}\text{I}$	606	60	2220

Débit de dose équivalente (mSv/h) pour une contamination surfacique de la peau de 37 kBq/cm<sup>2</sup>

## Exposition interne

- inhalation (air contaminé par un gaz / vapeur ou un aérosol)  
 $\text{Sv/Bq.m}^{-3}$
- ingestion (substance radioactive : liquide ou solide)  
 $\text{Sv/Bq.cm}^{-2}$  ou  $\text{Sv/Bq}$
- transfert transcutané à travers la peau lésée (blessure) ou non (substance radioactive : liquide ou solide)  $\text{Sv/Bq}$

## Contamination surfacique

Bq.m<sup>-2</sup>

2 types :

- contamination fixée : difficile à éliminer, risque de contamination interne nul

--> seul risque = exposition externe

- contamination non fixée (ou labile) : possibilité de remise en suspension totale ou partielle de la contamination dans l'air --> risque d'exposition interne et externe

Dans la pratique, une contamination est rarement complètement fixée. Le risque de remise en suspension est plus ou moins important selon :

- les caractéristiques physico-chimiques du contaminant

- l'état de surface du support de la contamination

- les conditions ambiantes (température, humidité, ventilation, effets mécaniques tels que vibrations.)

## Contamination volumique de l'air

Bq.cm<sup>-3</sup>

2 formes de contaminants :

### 1) Particules / aérosols :

./ particules de diamètres variables ( $10^{-3}$  à plus de  $10 \mu\text{m}$ )  
produites à partir de substances solides ou de solutions. Les  
origines de leur production sont extrêmement nombreuses :  
procédés industriels, manipulations, remise en suspension,  
incendie.

./ la dimension moyenne de l'aérosol en milieu industriel est de  
 $5 \mu\text{m}$  (à comparer à  $1 \mu\text{m}$  dans les atmosphères  
domestiques)

./ pratiquement tous les radioéléments peuvent exister sous  
cette forme

## Contamination volumique de l'air

### 2) gaz et vapeurs :

./ gaz de fission : Xénon, krypton, brome, iode. en général de périodes assez courtes, libérés lors des ruptures de gaines dans les réacteurs ou dans les usines de retraitement de combustibles irradiés

./ gaz de produits d'activation provenant des fluides de refroidissement des réacteurs :  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{190}\text{Po}$ ,  $^{16}\text{N}$  et  $^{17}\text{N}$ ,  $^{17}\text{F}$  et  $^{18}\text{F}$  , tritium

./ sources diverses : accélérateurs (tritium), fabrication du combustible ( $\text{UF}_6$ ), molécules marquées

!

# Les moyens de protection :

Temps  
Distance  
Ecrans



## Détection des rayonnements

Analyse des interactions du rayonnement ionisant avec un milieu.

Détecteur : capteur, amplificateur de signal, système de traitement du signal et un système d'affichage des données.

# Détection des rayonnements :



## Détection des rayonnements :

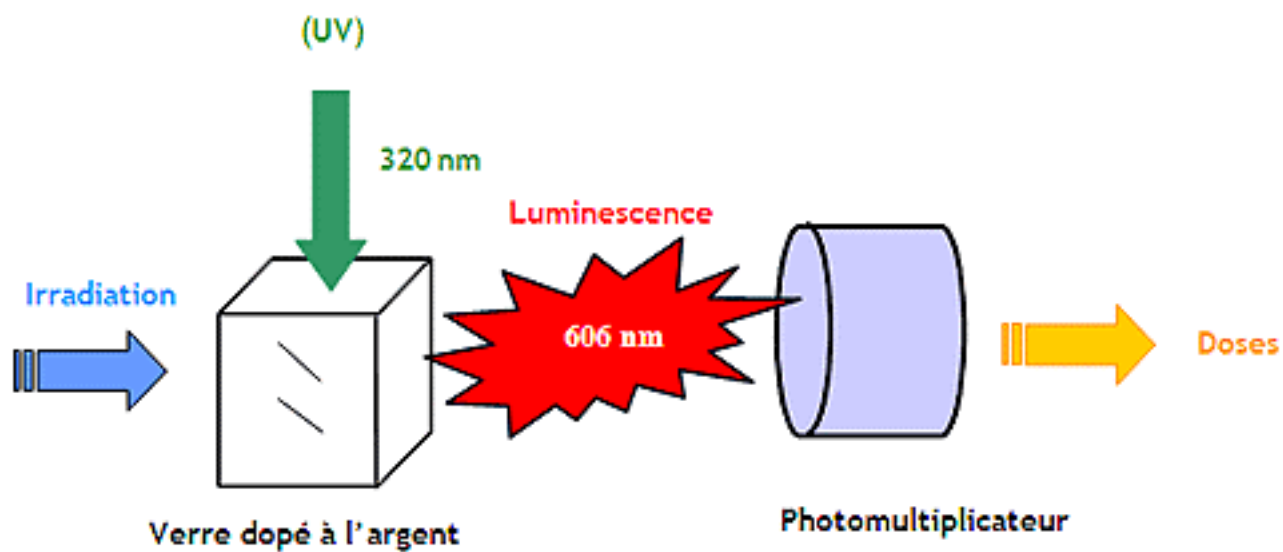


Schéma IRSN

## Le dosimètre :



Seul moyen de connaître la dose

Élément personnel (numéro de Sécurité Sociale)

Port trimestriel ou mensuel

Obligatoire en zone réglementée

A ranger en période de repos avec le dosimètre témoin

**Dosimétrie et suivi des résultats :**  
**(Arrêté de Juillet 2013)**



Accès aux résultats par la PCR et le Médecin du Travail  
via SISERI

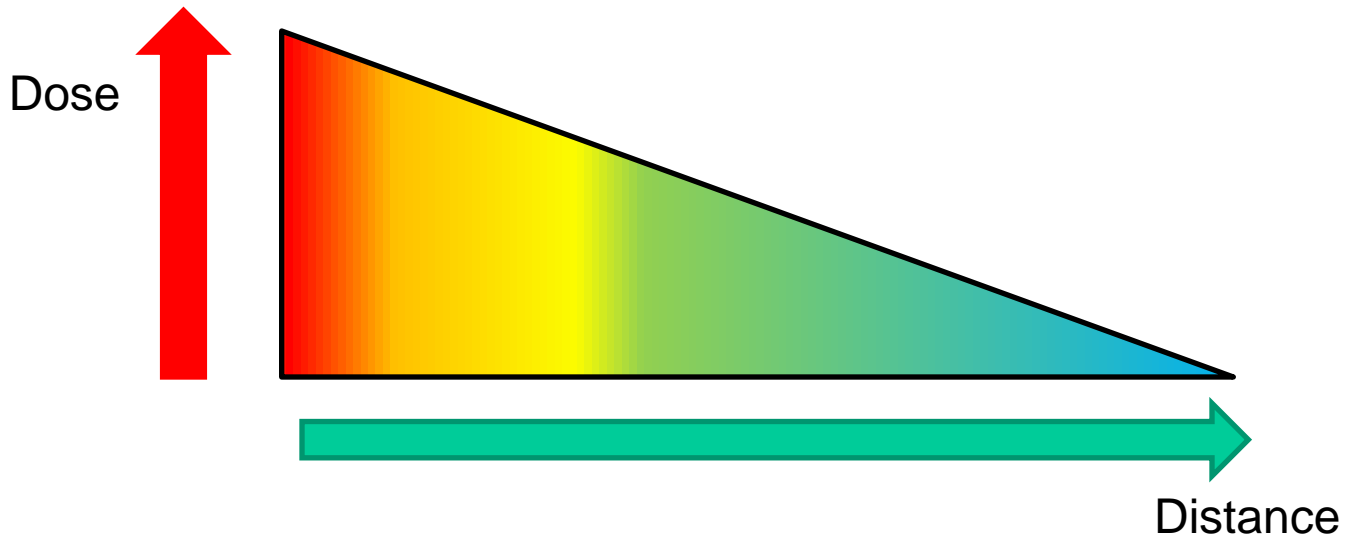
Liste mise à jour par le Correspondant SISERI  
Entreprise

Carte de suivi médical via SISERI créé par le médecin  
du travail pour les personnes exposées

Le travailleur ou le médecin désigné par ce dernier peut  
avoir accès à ses résultats sur demande au laboratoire,

## La distance :

En augmentant la distance au patient, on diminue la dose reçue.




## Les écrans :

Plomb : parois plombées et tabliers


Autres matières denses : maçonnerie,  
plomb



The slide features a dark blue horizontal bar across the top. On the left side, there is a decorative graphic consisting of several overlapping squares in various shades of blue and purple, creating a stepped effect. The main text is centered on a dark blue rectangular background.

Merci pour votre  
attention





05/04/2017