

# RAYONNEMENTS IONISANTS ET EFFETS SUR LA SANTE

---

**Dr Irène Sari-Minodier**

Maitre de conférences des Universités . Praticien Hospitalier  
Médecine et Santé au Travail

Aix-Marseille Université/Faculté de médecine de Marseille  
Assistance Publique des Hôpitaux de Marseille



Colloque « Radioprotection ». Giphise. Martigues, le 22 octobre 2015

# PLAN

---



1. Introduction
2. Grandeurs et unités en radioP : notions de dose
3. Les effets des RI : molécule, cellule, individu
4. La dosimétrie des radiologues industriels et les évènements significatifs recensés (bilan IRSN 2014)
5. Le suivi médical
6. Conclusion

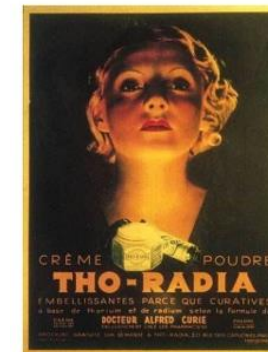
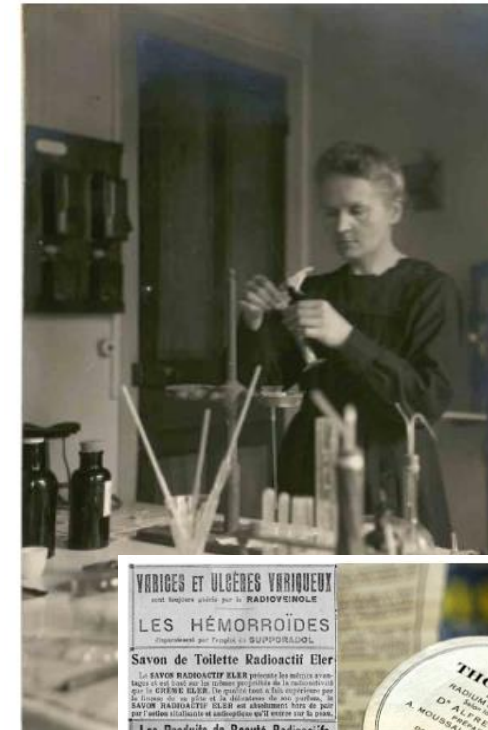
# Introduction

## De la découverte de la radioactivité à l'observation des 1<sup>ers</sup> cancers radio-induits

- “ 1895 Wilhelm **Roentgen** : découverte des rayons X
- “ 1896 Henri **Becquerel** : découverte de la radioactivité
- “ 1902 **Frieben** : description cancer de la peau sur radiodermite
- “ 1903 Henri **Becquerel**, Pierre et Marie **Curie** : prix Nobel de physique
- “ 1911 1<sup>ers</sup> cas de leucémies chez travailleurs
- “ 1928 **CIPR** (issue de la Société Internationale de Radiologie) : recommandations relatives aux 1<sup>ères</sup> limites professionnelles d'exposition devant la fréquence des leucémies chez les radiologues

## Aujourd'hui

- “ Des avancées dans la connaissance des effets
- “ Problématique des faibles doses
- “ Question de la radiosensibilité individuelle



# Grandeurs et unités utilisées en radioprotection

## “ Activité d'une source radioactive

“ nombre de désintégrations en 1 seconde

“ unités : le Becquerel (1 Bq = 1 dés/sec)

ancienne : le Curie 1Ci =  $37 \cdot 10^9$  Bq/sec (nbre de dés/sec de 1 gr de radium)

“ décroît avec le temps suivant une loi exponentielle

## Notions de doses

### “ Dose absorbée (D) ”

- “ quantité d'énergie communiquée à la matière par unité de masse ”
- “ unité : gray (Gy) ”

### “ Dose équivalente ( $H_T$ ) ”

- “ dose absorbée par le tissu ou l'organe T, pondérée suivant le type et la qualité du rayonnement R ”
- “ unité : sievert (Sv) ”

$$H_T = D \cdot W_R$$

$W_R$  = facteur de pondération radiologique  
ou lié à la nature du rayonnement

## Facteurs de pondération pour les rayonnements ( $W_R$ )

Extrait des recommandations 2007 de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR)-  
publication 103

Type de rayonnement	Facteur de pondération pour les rayonnements, $w_R$
Photons	1
Électrons et muons	1
Protons et pions chargés	2
Particules alpha, fragments de fission, ions lourds	20
Neutrons	Une courbe continue en fonction de l'énergie des neutrons (voir la figure B.4 et l'équation B.3.16)

1 : toutes les valeurs concernent les rayonnements incidents sur le corps ou, pour les sources internes, émis à partir de la source.

## Notions de doses

### “ Dose absorbée (D) ”

- “ quantité d'énergie communiquée à la matière par unité de masse ”
- “ unité : gray (Gy) ”

### “ Dose équivalente (H<sub>T</sub>) ”

- “ dose absorbée par le tissu ou l'organe T, pondérée suivant le type et la qualité du rayonnement R ”
- “ unité : sievert (Sv) ”

$$H_T = D \cdot W_R \quad W_R = \text{facteur de pondération radiologique ou lié à la nature du rayonnement}$$

### “ Dose efficace (E) : risque d'effets tardifs sur l'organisme ”

- “ somme des doses équivalentes pondérées délivrées aux différents tissus et organes par l'irradiation interne et externe ”
- “ unité : sievert (Sv) ”

$$E = \sum H_T W_T \quad W_T = \text{facteur de pondération tissulaire}$$

## Facteurs de pondération pour les tissus ( $w_T$ )

Extrait des recommandations 2007 de la CIPR (publication 103)

Organe/tissu	Nombre de tissus	$w_T$	Contribution totale
Poumon, estomac, côlon, moelle osseuse, sein, reste	6	0,12	0,72
Gonades	1	0,08	0,08
Thyroïde, œsophage, vessie, foie	4	0,04	0,16
Surface de l'os, peau, cerveau, glandes salivaires	4	0,01	0,04

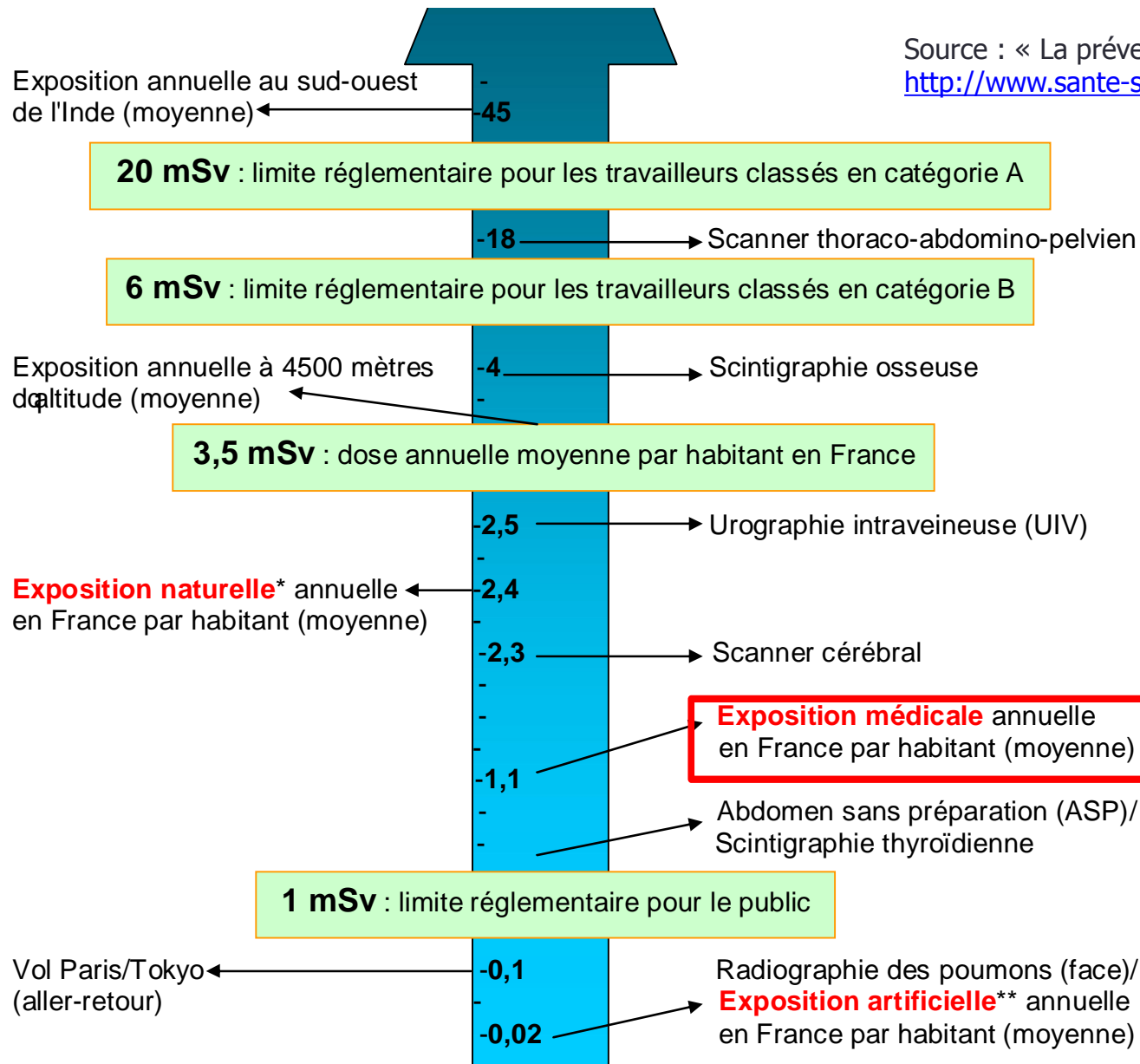
1 : la valeur de  $w_T$  pour les gonades s'applique à la moyenne des doses aux testicules et aux ovaires.

2 : la dose au côlon est considérée comme la moyenne pondérée par la masse des doses au gros intestin et à l'intestin grêle, comme dans la formulation de la *Publication 60*.

Les tissus restants spécifiés (14 au total, 13 dans chaque sexe) sont les suivants : la glande surrénale, le tissu extrathoracique (ET), la vésicule biliaire, le cœur, les reins, les ganglions lymphatiques, le muscle, la muqueuse buccale, le pancréas, la prostate (♂), l'intestin grêle (SI), la rate, le thymus, l'utérus/le col de l'utérus (♀).



Source : « La prévention en action. La radioprotection »  
<http://www.sante-securitepaca.org/>



**IRSN-InVS  
2010**  
 Augmentation de 57% des expositions médicales entre 2002 et 2007 (1,3 mSv)

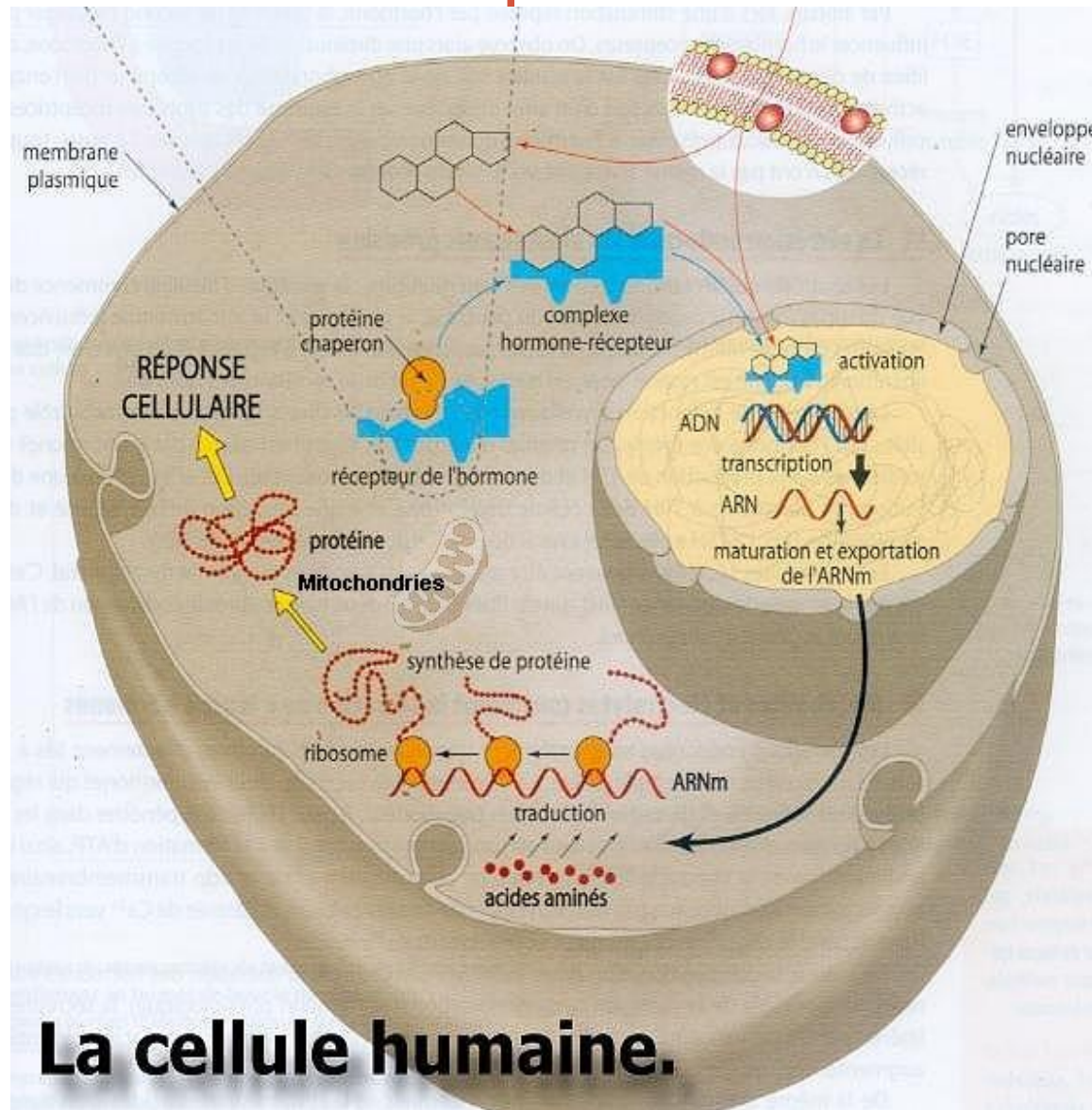
\* : exposition naturelle = radon, rayonnement tellurique, rayonnement cosmique, radionucléides de l'organisme (ingestion entre autres de potassium 40 et de carbone 14 présents dans l'eau et les aliments).

\*\* : exposition artificielle = essais nucléaires atmosphériques (années 50 à 70), industrie nucléaire, accidents (Tchernobyl) )

# EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS IONISANTS

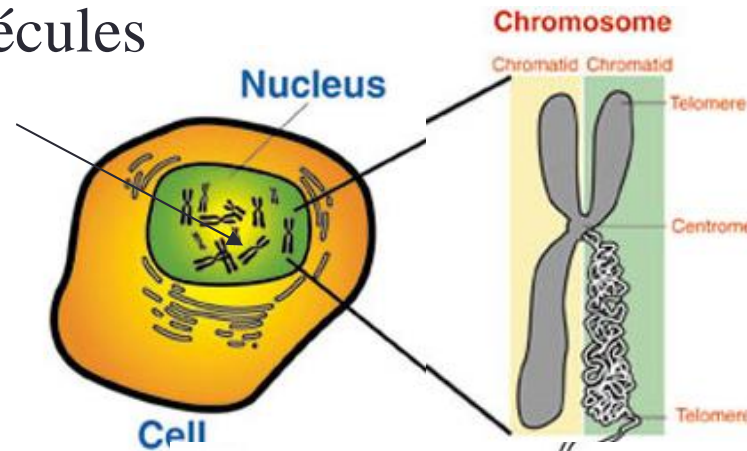
---

# La cellule : Unité structurale et fonctionnelle constituant tout ou partie d'un être vivant



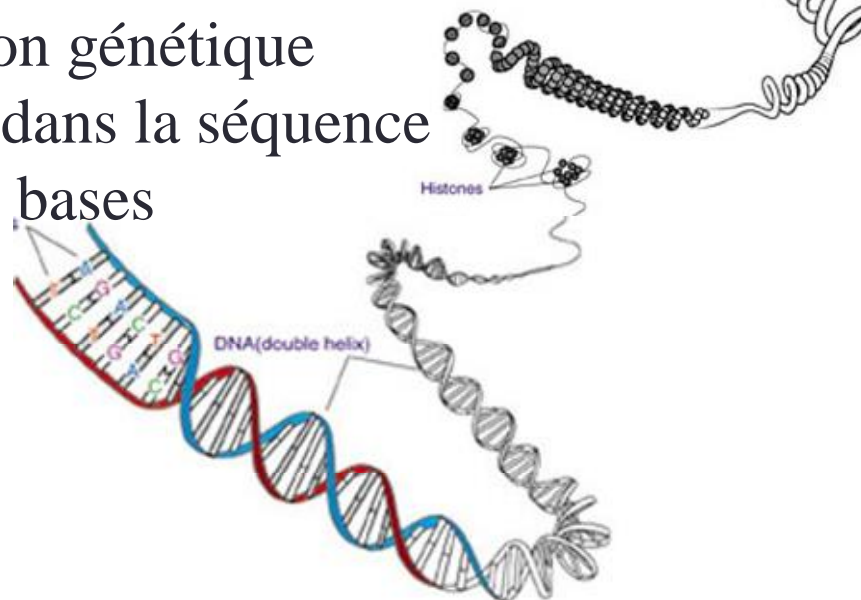
# Le patrimoine génétique, c'est

Un ensemble de 46 molécules d'ADN contenues au niveau du noyau cellulaire



chacune de ces molécules d'ADN se condense sous la forme d'un chromosome à la mitose

L'information génétique est contenue dans la séquence de paires de bases



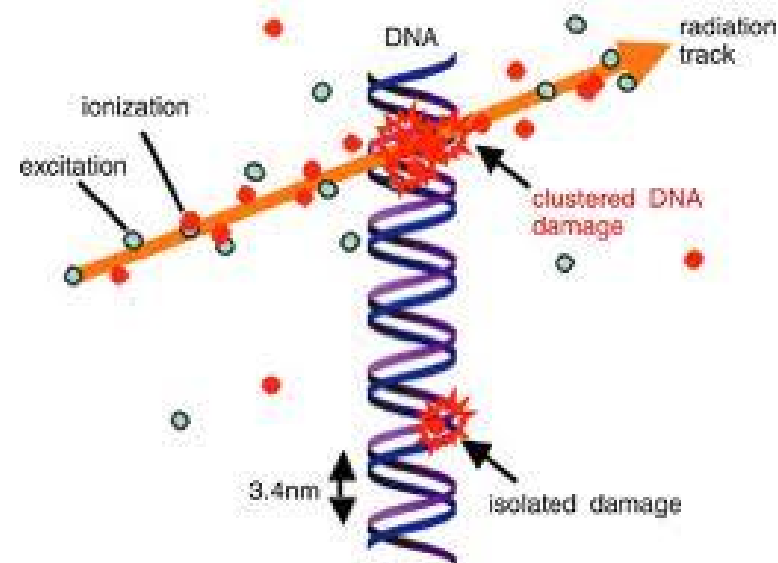
# Action des RI au niveau moléculaire

## 2 types d'effet

- “ **effet direct** : énergie directement transférée à la molécule
  - “ dépôt d'énergie très localisé sur région sensible de la molécule → rupture
- “ **effet indirect** par radiolyse de l'eau → espèces réactives de l'oxygène (telles que OH.)
  - stress oxydant susceptible de créer des lésions moléculaires

Lésions de l'ADN dues au métabolisme cellulaire normal  
 (stress oxydant naturel, moyenne des altérations par cellule et par jour)  
 et à une irradiation de 1 Gy

Types de lésions	Naturel	+1Gy	Rapport 1Gy/naturel
Cassures simple brin	20 000 à 40 000	1 000	1/30
<b>Cassures double brin</b>	<b>très faible</b>	<b>40</b>	<b>très fort &gt;40</b>
Lésions de bases	20 000	2 000	1/10
Autres lésions	5 000	200	1/25
Total	" 50 000	" 3 000	" 1/20



# Les lésions de l'ADN radio-induites

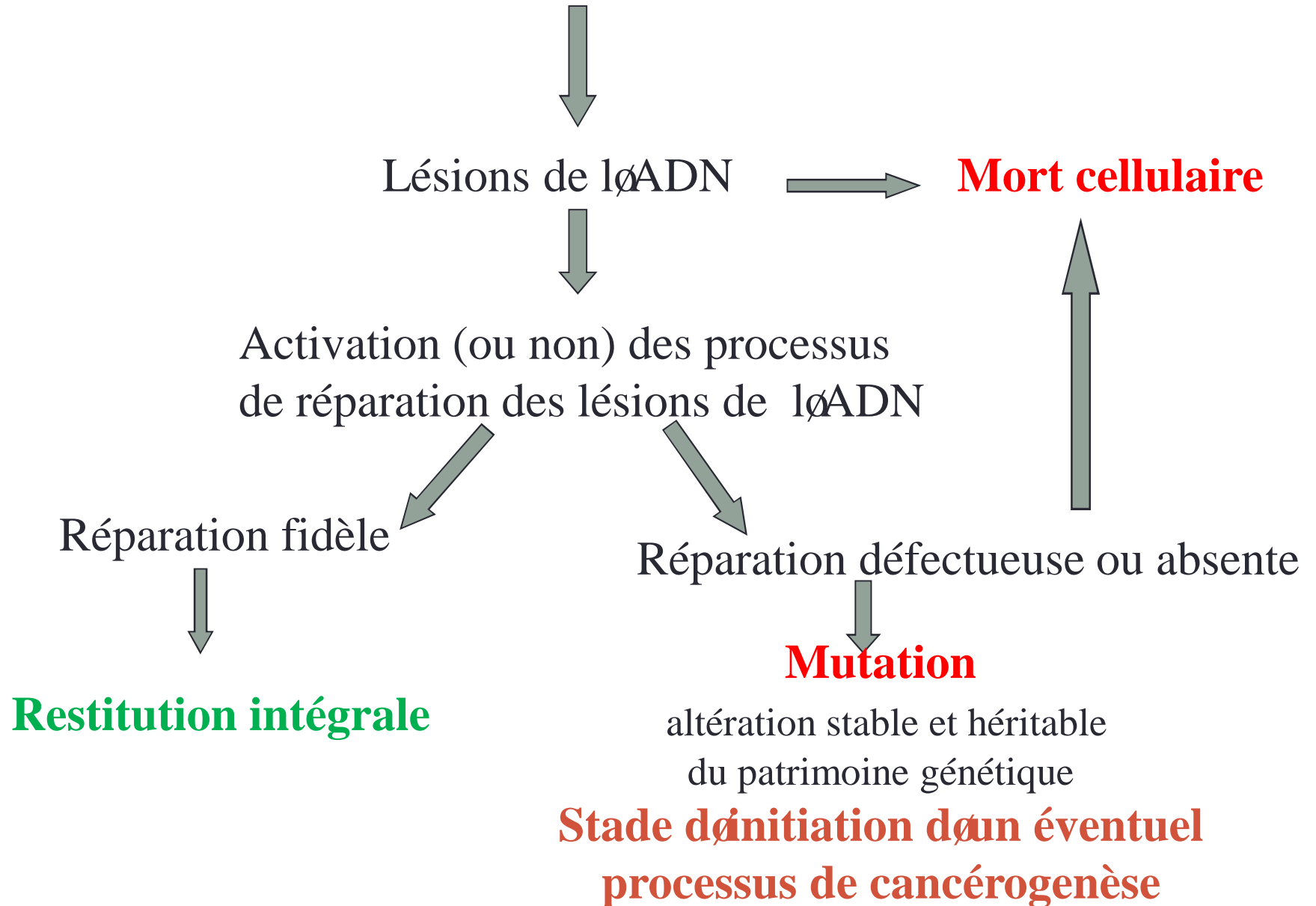
- “ Effet initial proportionnel à la dose
- “ Distribution au hasard sur tout le génome
- “ Mais les conséquences des lésions sont variables selon :
  - “ le type des lésions
  - “ le site des lésions (cibles critiques sur l'ADN)
  - “ **les réponses de la cellule** :

- “ arrêt du cycle cellulaire
- “ réparation des lésions de l'ADN
- “ mort cellulaire

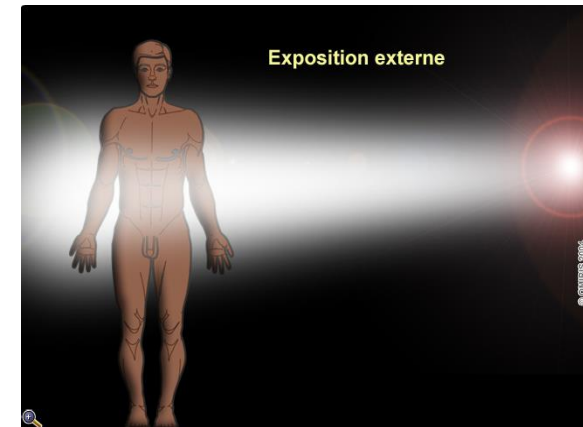
La cellule réagit à l'agression dans les minutes qui suivent l'irradiation



# Effets des RI sur le génome (génétoxicité)







# EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LA SANTE

---

Déterministes ou stochastiques ?

## Effets déterministes

- “ liés à la **mort cellulaire**
- “ effets précoces ou à moyen terme (quelques heures à quelques mois)
- “ **effet à seuil**
- “ caractère **obligatoire** : apparaissent chez tous les sujets ayant reçu une dose suffisante
- “ généralement réversibles
- “ gravité proportionnelle à la dose

## Exemples

- “ Atteinte de la moelle **OSSEUSE** (diminution des globules blancs, globules rouges, plaquettes dans le sang)
- “ Brûlures cutanées
- “ Stérilité
- “ Cataracte (opacification du cristallin)

Le respect des doses limites permet d'**éviter** les effets déterministes

## Exemples de seuils pour les effets déterministes

### ” Suite à une irradiation globale aigue

- ” Pas de signe clinique (troubles digestifs, maux de tête, fatigue, fièvre) en dessous de **1 Gy**
- ” Pas de modification de la formule numération sanguine (notamment baisse des lymphocytes) en dessous de **0,25 Gy** (*d'où peu d'intérêt de la prise de sang en urgence après une sur-exposition de quelques mSv*)

### ” Suite à une irradiation localisée : peau

- ” Rougeur : à partir de 3-5 Gy
- ” Brûlure : à partir de 10 Gy

### ” Suite à une irradiation localisée : cristallin

- ” Pour prévenir la cataracte radio-induite, la CIPR (avril 2011) préconise 20 mSv par an en moyenne sur des périodes de 5 ans sans dépasser 50 mSv au cours d'une même année (limite actuelle : 150 mSv)

**Tableau I**Exemples de dose reçue par minute d'exposition à une source d'<sup>192</sup>Ir de 1 TBq (27 Ci)

Distance source/opérateur	Dose reçue par minute d'exposition	Commentaires
10 m	0,022 mSv	Ce cas peut se présenter si la zone de tir est mal balisée et qu'une personne y pénètre par inadvertance.
1 m	2,2 mSv	C'est l'ordre de grandeur de dose reçue par des opérateurs en cas d'erreur de manipulation.
1 cm	22 Gy <sup>a</sup>	C'est l'ordre de grandeur de dose reçue au niveau de la main (la dose sur le reste du corps serait alors de 10 à 30 mSv par minute).

<sup>a</sup> Au-delà de 1 Gy, le facteur de pondération lié au rayonnement ( $W_R$ ), qui permet de passer de la dose absorbée (Gy) à la dose équivalente (Sv), ne s'applique plus ; ce facteur de pondération a en effet été établi par rapport aux effets stochastiques.

### Sources :

Plé J, Charrier D, Sajous L, Coletti F, Paul D, Sari-Minodier I. Le poste de radiologue industriel : contraintes, risques et surveillance. *Arch Mal Prof Env*, 2008, 69 : 40-47.

Plé J, Charrier D, Sari-Minodier I. Surexposition aux rayonnements ionisants dans la pratique de la radiographie industrielle. *Arch Mal Prof Env*, 2008, 69 : 48-53.

# Accidents d'irradiation en radiographie industrielle

Source nue d'Ir-192 de 3,7 TBq (100 Ci) :

à 5 mm (dans la main) : 16 000 Gy/h

à 10 cm : 40 Gy/h

à 1 m : 0,4 Gy/h



Nécrose 30 jours après exposition à une source de <sup>192</sup>Ir.

Nécrose donc dose supérieure à 25 Gy



Photo 15. Very large necrotic lesion extended in the upper third of the right thigh. The depth of the defect is significant. The bottom is covered by a crust and is superinfected. The lesion edges are well defined, blistered and are above the surface of the surrounding tissue. They are surrounded by a depigmented halo (3 May 1999).

1<sup>1/2</sup> mois après une exposition d'environ 10 heures à une source de 1,37 TBq (37 Ci) d'Ir-192 (Yanango – Pérou)

## Effets stochastiques

- “ liés à la **transformation cellulaire (mutation)**
- “ effets tardifs (plusieurs années ou dizaines d'années)
- “ **sans seuil**
- “ caractère **aléatoire** :  
n'apparaissent que chez quelques sujets, même pour doses élevées
- “ le plus souvent irréversibles spontanément
- “ gravité indépendante de la dose
- “ fréquence d'apparition dans la population exposée proportionnelle à la dose

Si mutation de cellules  
somatiques  
⇒ **cancers**

Si mutation de cellules  
germinales  
⇒ **effets génétiques ou héréditaires**  
(*transmission de mutations à la descendance. Données humaines?* )

Le respect des doses limites permet de **diminuer le risque** de cancers, mais ne permet pas de le supprimer (car absence de dose seuil)

# Données épidémiologiques sur les effets stochastiques

## Cancers radio-induits

**Aucune enquête épidémiologique n'a révélé d'effet cancérogène pour des doses < 100 mSv**

*" Pas de démonstration d'excès de cancer : le risque est très faible mais ne peut être exclu*

## Effets génétiques ou héréditaires ?

**CIPR 103 : absence de preuve directe humaine**

qu'une exposition des parents aux RI entraîne un excès de affections héréditaires chez les enfants (absence d'effets observables chez descendants des survivants Hiroshima et Nagasaki et d'individus traités par radiothérapie dans l'enfance)

*" D'après abaissement du WT gonades*

## Facteurs de pondération pour les tissus ( $W_T$ )

Extrait des recommandations 2007 de la CIPR (publication 103)

Organe/tissu	Nombre de tissus	$w_T$	Contribution totale
Poumon, estomac, côlon, moelle osseuse, sein, reste	6	0,12	0,72
Gonades	1	0,08	0,08
Thyroïde, œsophage, vessie, foie	4	0,04	0,16
Surface de l'os, peau, cerveau, glandes salivaires	4	0,01	0,04

1 : la valeur de  $w_T$  pour les gonades s'applique à la moyenne des doses aux testicules et aux ovaires.

2 : la dose au côlon est considérée comme la moyenne pondérée par la masse des doses au gros intestin et à l'intestin grêle, comme dans la formulation de la *Publication 60*.

Les tissus restants spécifiés (14 au total, 13 dans chaque sexe) sont les suivants : la glande surrénale, le tissu extrathoracique (ET), la vésicule biliaire, le cœur, les reins, les ganglions lymphatiques, le muscle, la muqueuse buccale, le pancréas, la prostate (♂), l'intestin grêle (SI), la rate, le thymus, l'utérus/le col de l'utérus (♀).

Importante baisse depuis la publication 60 (1991) :  $W_T$  gonades = 0,20



# Aspects médico-légaux

## RÉGIME GÉNÉRAL Tableau 6

Affections provoquées par les rayonnements ionisants

Date de création : 4 janvier 1931

Dernière mise à jour : 26 juin 1984

(décret du 22 juin 1984)

Désignation des maladies	Délai de prise en charge	Liste indicative des principaux travaux susceptibles de provoquer ces maladies
Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation aiguë.	30 jours	Tous travaux exposant à l'action des rayons X ou des substances radioactives naturelles ou artificielles, ou à toute autre source d'émission corpusculaire, notamment : Extraction et traitement des minerais radioactifs ; Préparation des substances radioactives ; Préparation de produits chimiques et pharmaceutiques radioactifs ; Préparation et application de produits luminescents radifères ; Recherches ou mesures sur les substances radioactives et les rayons X dans les laboratoires ; Fabrication d'appareils pour radiothérapie et d'appareils à rayons X ; Travaux exposant les travailleurs au rayonnement dans les hôpitaux, les sanatoriums, les cliniques, les dispensaires, les cabinets médicaux, les cabinets dentaires et radiologiques, dans les maisons de santé et les centres anticancéreux ; Travaux dans toutes les industries ou commerces utilisant les rayons X, les substances radioactives, les substances ou dispositifs émettant les rayonnements indiqués ci-dessus.
Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation chronique.	1 an	
Blépharite ou conjonctivite.	7 jours	
Kératite.	1 an	
Cataracte.	10 ans	
Radiodermites aiguës.	60 jours	
Radiodermites chroniques.	10 ans	
Radio-épithélite aiguë des muqueuses.	60 jours	
Radiolésions chroniques des muqueuses.	5 ans	
Radionécrose osseuse.	30 ans	
Leucémies.	30 ans	
Cancer broncho-pulmonaire primitif par inhalation.	30 ans	
Sarcome osseux.	50 ans	

Effets déterministes

Effets stochastiques : cancers

# Bilan 2014 des expositions professionnelles aux RI en France : ZOOM sur la GAMMAGRAPHIE

Source : IRSN rapport PRP-HOM/2015-00004

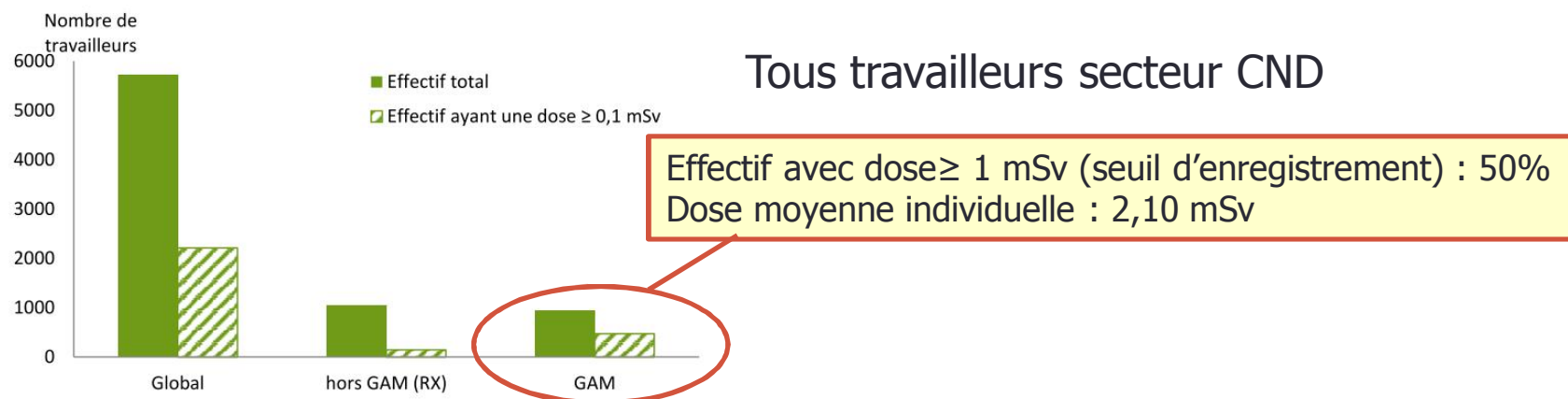


Figure 31 - Proportion de travailleurs ayant une dose supérieure au seuil d'enregistrement dans les entreprises du secteur du contrôle non destructif, en fonction du type de source utilisé

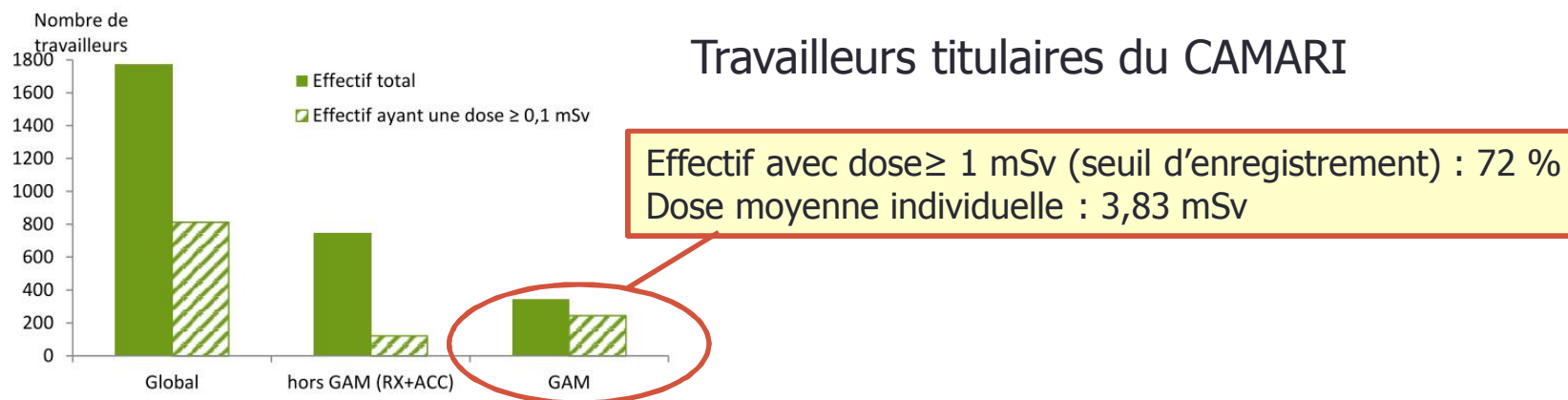


Figure 32 - Proportion de travailleurs ayant une dose supérieure au seuil d'enregistrement parmi les titulaires du CAMARI, en fonction de l'option validée

## ZOOM sur la GAMMAGRAPHIE : les évènements recensés en 2014 (1/2)

Source : IRSN rapport PRP-HOM/2015-00004

- “ En 2014, l'IRSN a eu connaissance de **17 évènements** significatifs en radioP (13 de niveau 0 ; 2 de niveau 1 ; 2 de niveau 2) dans le cadre de activités de gammagraphie (Ir192 ; 0,4-2,62 TBq)
- “ Conséquences dosimétriques significatives pour 2 évènements :
  - “ 1 dépassement de dose limite annuelle 20 mSv
  - “ 1 intégration, en 1 seule opération, du quart de la dose limite annuelle

## ZOOM sur la GAMMAGRAPHIE : les évènements recensés en 2014 (2/2))

Source : IRSN rapport PRP-HOM/2015-00004

### 2 principales causes



#### 1. Perte du contrôle de la source

- “ Blocage de la source (n=3)
  - “ dont 1 évènement ayant entraîné une dose efficace (DP)  $1\ 22\text{mSv}$  (opération manuelle visant à repousser la source dans l'appareil, réalisée sans analyse préalable du risque)
  - “ Rupture du doigt du obturateur lors de la réintégration de la source dans le projecteur (n=6)

#### 2. Défaut d'application des dispositions opérationnelles réglementaires

- “ Défaut de mise en place du balisage (n=6)
- “ Non respect des règles relatives à l'entrée en zone d'opération (n=2)
  - “ dont 1 expo de environ 1 min, lors du retrait du film radio, alors source encore en position de irradiation (pas de radiamètre ; alarme du dosi opérationnel + ) : dose (DO)  $1\ 5\ \text{mSv}$

# Surveillance médicale (1)

- “ **Surveillance médicale renforcée des travailleurs de catégorie A et B** par le médecin du travail
  - “ Périodicité maintenue à 1 an pour les catégories A (art. R.4451-84)
- “ **Le médecin du travail adapte le suivi médical** (nature des examens et fréquence) en fonction de l'évaluation du risque fait au poste de travail, de la fiche de exposition établie par l'employeur, des résultats dosimétriques et de l'état de santé du travailleur.
- “ **Fiche d'aptitude**, attestant l'absence de contre-indication médicale (1<sup>er</sup> examen avant l'affectation), mentionnant dates étude poste de travail et mise à jour fiche entreprise

## Surveillance médicale (2)

- “ **Dossier médical** : double fiche exposition, dates et résultats du suivi dosimétrique, dates et résultats des examens complémentaires. Conservé au moins 50 ans après la fin de la période d'exposition.
  - “ Dans l'entreprise, seul le médecin du travail reçoit les résultats individuels de **dosimétrie passive**
- “ **Carte individuelle de suivi médical** mentionnant la catégorie de classement A ou B, délivrée par le médecin du travail
  - “ arrêté du 17 juillet 2013 (entrée en vigueur en juillet 2014) : carte de suivi médical dématérialisée dans SISERI, désignation par l'employeur d'un CSE (Correspondant SISERI de l'Employeur) qui renseigne les infos administratives requises sur SISERI
- “ **Bilan dosimétrique et sanitaire après toutes situations anormales d'exposition ainsi qu'en cas de dépassement des valeurs limites.**
  - “ Les conditions ultérieures d'exposition sont subordonnées à l'accord du médecin du travail
- “ **Surveillance post-professionnelle**

# Conclusion : 3 principes fondamentaux de radioprotection (CIPR)

*inscrits au code de la santé publique (L. 1333-1)*

- “ **Justification** de l'utilisation des RI par rapport au détriment radiologique qu'elle est susceptible de apporter : supprimer toute exposition inutile
- “ **Optimisation de la protection** basée sur le **principe ALARA** (*As Low As Reasonably Achievable*) : maintenir les doses à un niveau aussi faible qu'il est raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociétaux
- “ **Limitation (application des limites de dose)** : respect des limites doses individuelles fixées par voie réglementaire
  - “ *limiter le risque des effets stochastiques et prévenir les effets déterministes*