

# RAYONNEMENTS IONISANTS

## Les effets biologiques des rayonnements ionisants

# Rayonnements ionisants

## Les sources de l'exposition humaines

---

---

### Exposition naturelle

2/3 de l'exposition annuelle

Rayonnements cosmiques

Rayonnements telluriques

Le radon

2,4 mSv/an

Débits faibles : 0,27 $\mu$ Sv/Heure

### Exposition artificielle

Médicale

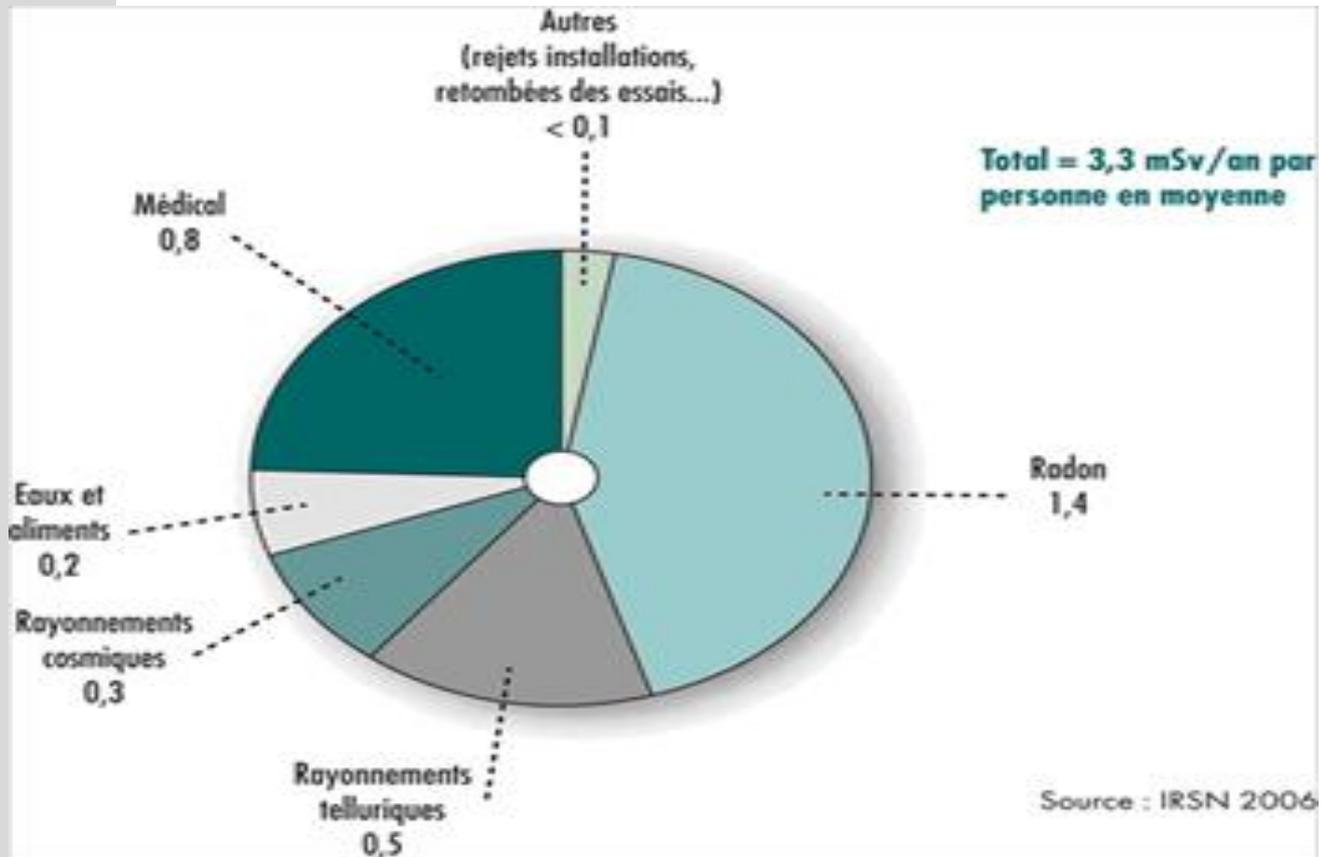
Industrielle

Domestique

Professionnelle

1 mSv/an en moyenne

Débits variables parfois élevés



# Généralités

## Activité

L'activité  $A$  d'une source radioactive est liée au nombre de noyaux susceptibles de se transformer

L'unité est le **becquerel** (Bq) : 1 Bq = 1 désintégration par seconde.

Cette unité étant très petite, l'activité s'exprime en multiples du becquerel :

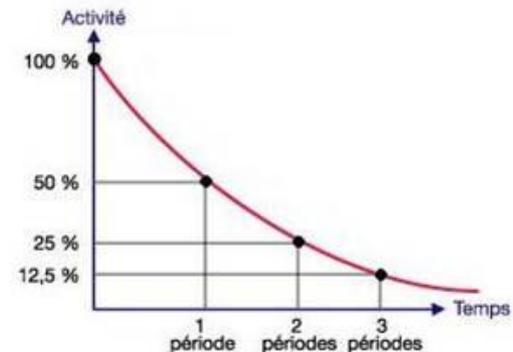
- kilobecquerel (kBq) =  $10^3$  Bq
- mégabecquerel (MBq) =  $10^6$  Bq
- gigabecquerel (GBq) =  $10^9$  Bq
- térabecquerel (TBq) =  $10^{12}$  Bq

## Période radioactive

La période radioactive ou **temps de demi-vie**  $T_{1/2}$  est le temps au bout duquel l'activité de la source a diminué de moitié. Elle est liée à la **constante radioactive**  $\lambda$  par la formule :

$$\text{Temps de demi-vie} = T_{1/2} = 0,693/\lambda$$

Après  $n$  périodes, l'activité  $A_0$  est divisée par  $2^n$ .



## Généralités

### Energie

Elle s'exprime en **électronvolts** (eV) ou ses multiples (keV, MeV, ou GeV)

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

### Dose absorbée

La pénétration des radiations ionisantes dans la matière se traduit par une cession d'énergie.

La dose absorbée D est le rapport :

Energie absorbée par la matière (Joule)/Masse de matière irradiée (kg)

L'unité de dose absorbée est le **Gray** (Gy)  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ .

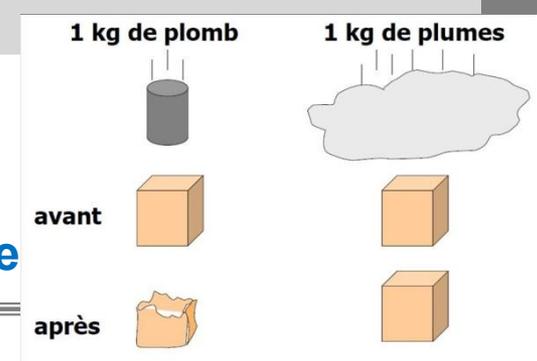
Le débit de dose absorbée s'exprime en  $\text{Gy.h}^{-1}$ .

En pratique, on utilise les sous-multiples  $\text{mGy.h}^{-1}$  et  $\text{Gy.h}^{-1}$ .



## Généralités

# Effets des rayonnements ionisants sur l'homme



## Dose équivalente

Pour quantifier les effets des rayonnements ionisants dans les tissus vivants, il faut déterminer une grandeur qui tienne compte de la qualité du rayonnement :

Exprimée en **sievert** (Sv) et est reliée à la dose absorbée par la relation :

$$\text{Dose équivalente} = \text{Dose absorbée} \cdot W_R$$

$W_R$  est le **facteur de pondération radiologique**

## Dose Efficace

La CIPR a défini, pour les principaux tissus de l'organisme, un **facteur de pondération tissulaire**  $W_T$ , qui introduit la notion de **dose efficace**

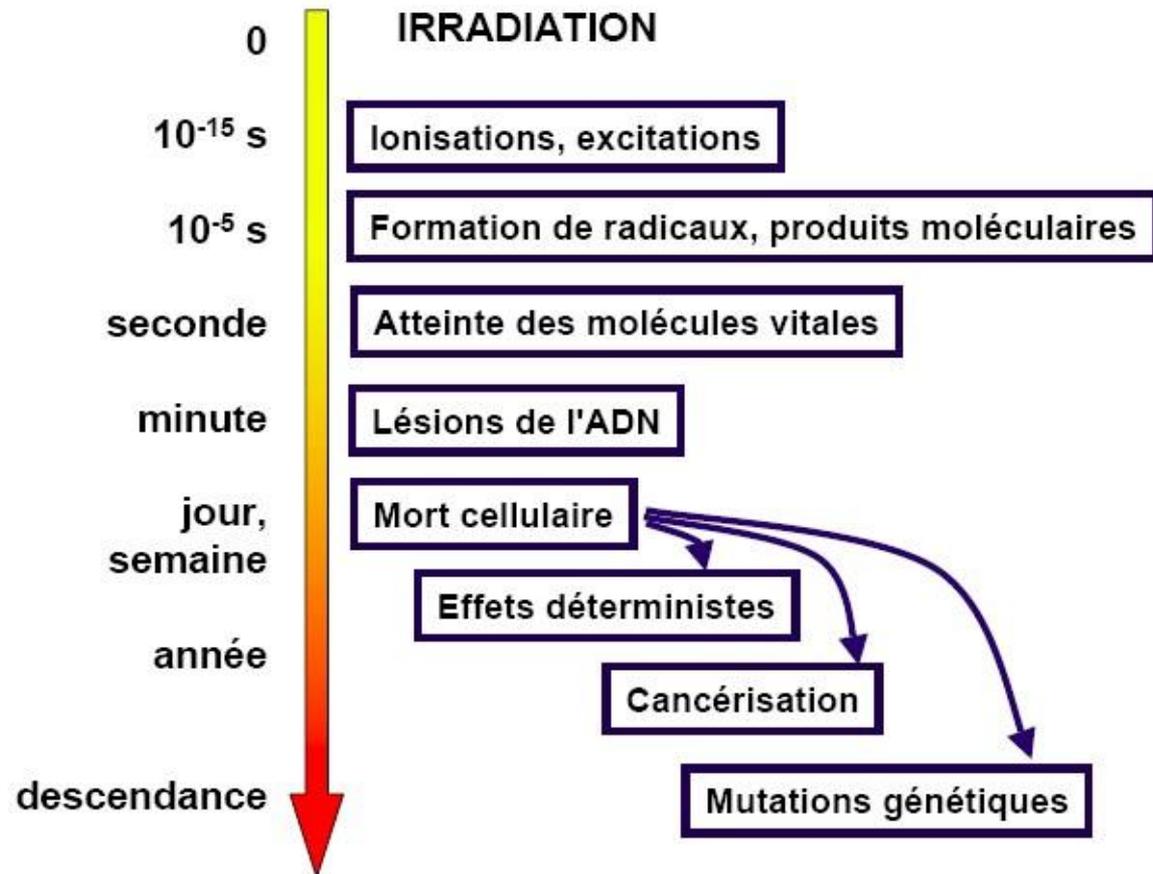
Exprimée en **sievert** (Sv) et est reliée à la dose équivalente par la relation :

$$\text{Dose efficace} = \text{Dose équivalente} \cdot W_T$$



# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## CHRONOLOGIE DES EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS IONISANTS



# Interaction des rayonnements avec la matière

- Lorsque les rayonnements pénètrent dans la matière, ils rentrent en interaction avec les atomes ou les molécules traversées et perdent de leur énergie
- Les conséquences de ces interactions sont l'ionisation et l'excitation des atomes et des molécules
- Au niveau biologique, les conséquences sont liées aux ruptures des molécules directement ou indirectement par interaction de ces molécules avec des radicaux libres qui le plus fréquemment proviennent de la radiolyse de l'eau :  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{OH}\cdot$  (substances oxydantes),  $\text{H}\cdot$  (substance réductrices)
- Lorsque la molécule biologique touchée est l'ADN, il est ensuite question de mort cellulaire, de mutagénicité ou de cancérogenèse

# Lésions initiales

Temps

Irradiation

$10^{-15}$ s

radiolyse de l'eau

ionisation directe

effets indirects

radicaux libres

$10^{-6}$ s

**LESIONS MOLECULAIRES: ADN, PROTEINES, LIPIDES**

# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Chimiques

---

---

Deux modes d'actions :

Effets directs par transfert d'énergie, entre une molécule (ADN ou autre constituant de la cellule) et un électron mis en mouvement par l'absorption d'un rayonnement

dominants pour rayonnements à TEL élevé

Effets indirects, secondaires à des réactions physicochimiques, interaction entre une molécule et un radical libre (qui possède un électron célibataire (radiolyse de l'eau)

Toutes les molécules présentes au sein des cellules vivantes peuvent être modifiées.

Deux ont une importance particulière :

La molécule d'eau (abondante - lésions fréquentes)

La molécule d'ADN (importance biologique et csq d'une modification de structure)

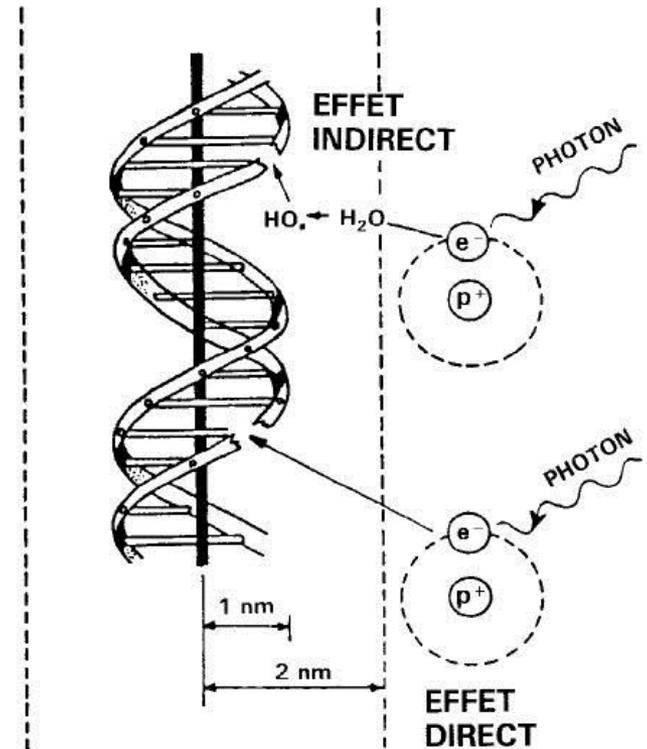
## Généralités

### Effets chimique – biologique – tissulaire

*Action directe* : rare, par **rupture de liaisons covalentes** et formation de radicaux libres. Il s'agit de l'ionisation ou de l'excitation directe de macromolécules, sans passer par l'intermédiaire de radiolyse de l'eau.

*Action indirecte* : prédominante par **radiolyse de l'eau** (l'eau présentant 85% du contenu cellulaire) et génération de : réducteur H ; oxydant OH et e-aqueux.

Leur combinaison aboutit à la formation de substance toxique = **eau oxygénée** ( $H_2O_2$ ).



## Généralités

### Effets chimique – biologique – tissulaire

---

---

Les **lésions cytoplasmiques** sont à l'origine de déstabilisation de l'architecture cellulaire, par altération du cytosquelette.

Les **lésions membranaires** les plus importantes seraient la peroxydation des acides gras.

Pour obtenir un même effet (morts cellulaires), la dose nécessaire est au minimum 100 fois moindre dans le noyau que sur les membranes.

**Le noyau est la cible préférentielle des rayonnements ionisants.**

On est ainsi amenés à distinguer aujourd'hui :

- des effets liés à des modifications de l'ADN, qui restent l'essentiel,
- des effets sans atteinte du code génétique, dit « effets épigénétiques».

(A mettre en parallèle avec l'écriture d'un livre et sa lecture)

Les lésions de l'ADN,

nombreuses, même mal réparées ne se traduisent pas par des remaniements chromosomiques visibles,

ne sont pas spécifiques,

sont très nombreuses (environ 5000 par cellule pour 1 Gy).

# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Cellulaires

La cellule gère les réparations

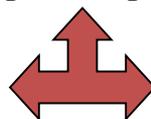
Lésion  Réparation

MAIS

Simple brin,

une copie disponible pour la synthèse

Réparation rapide

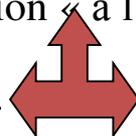


Réparation intégrale

Double brin,

réparation « à l'aveugle »

Réparation « comblement »



Recombinaison homologue

Mutation

Situation majoritaire

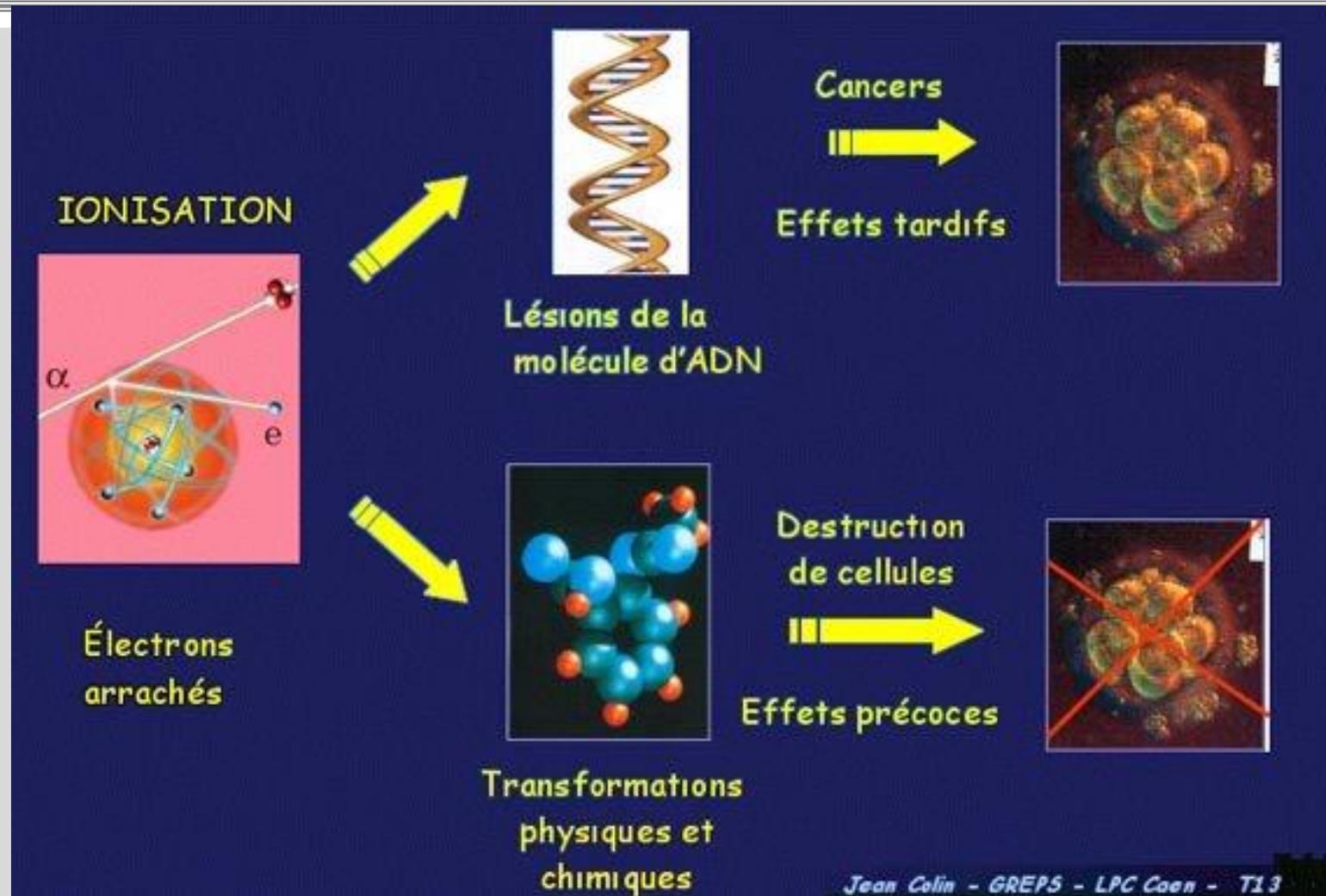


Fidèle

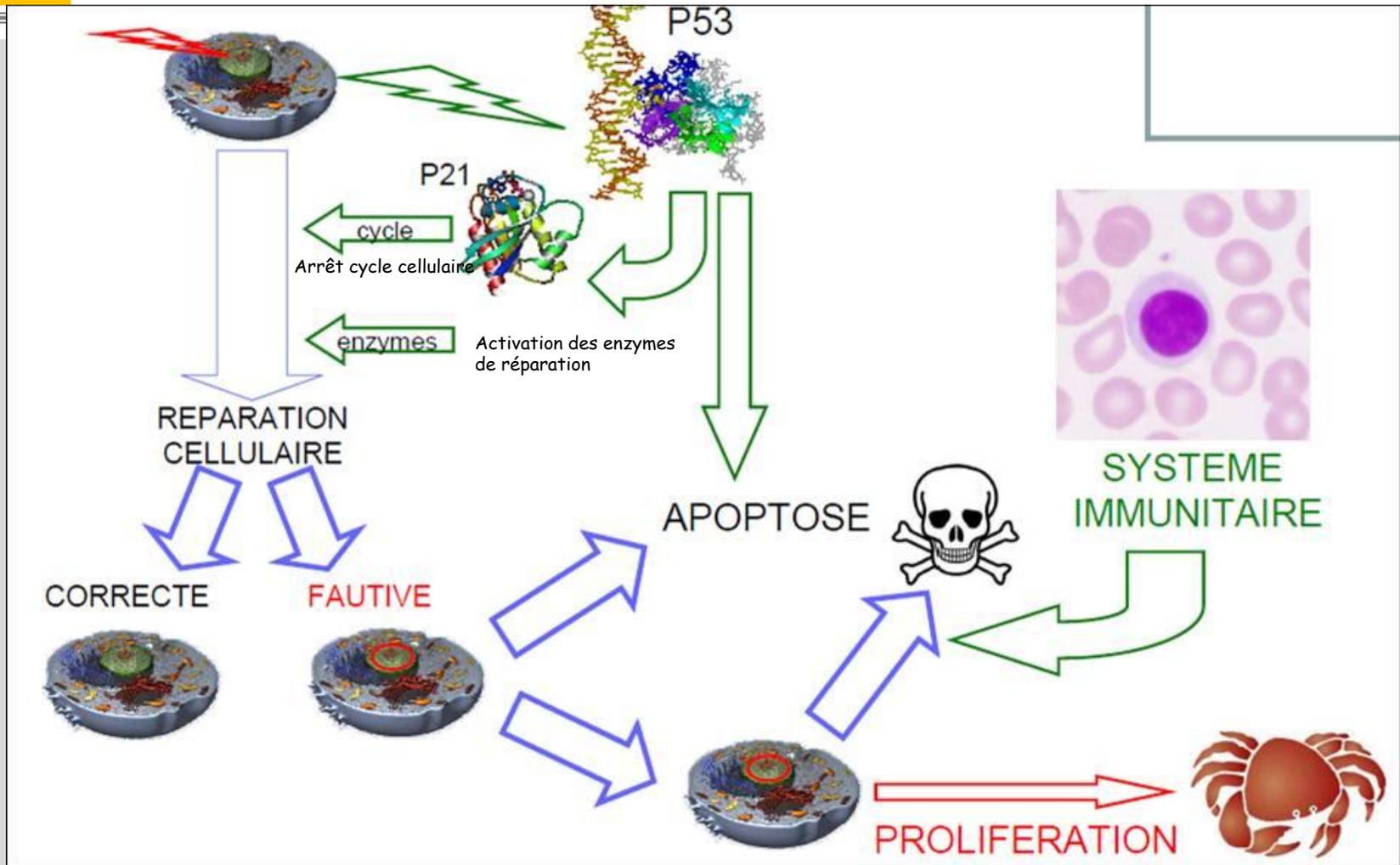
minoritaire

**MORT CELLULAIRE LE PLUS SOUVENT**

# Les effets biologiques des rayonnements ionisants



# Les effets biologiques des rayonnements ionisants Tissulaires



# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Tissulaires

### **EFFETS DETERMINISTES ou OBLIGATOIRES ou NON STOCHASTIQUES**

#### **MORT CELLULAIRE**

- # Effets précoces ou moyen terme
- # Effets à seuil
- # A caractère obligatoire
- # Généralement réversibles
- # gravité proportionnelle à la dose
- # Caractéristiques
  - Syndrome d'irradiation aiguë
  - Brulures radiologiques

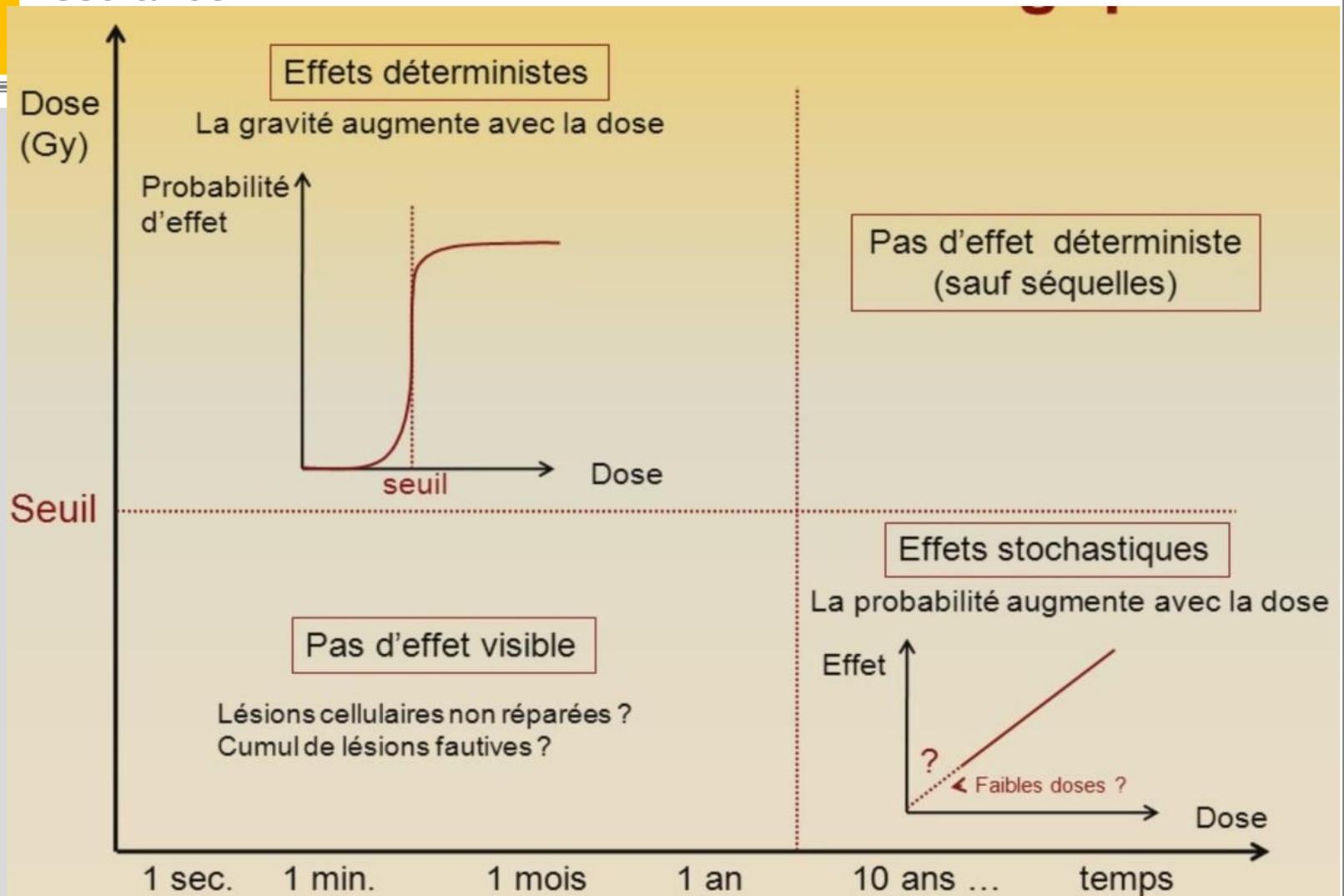
### **EFFETS NON DETERMINISTES ou ALEATOIRES ou STOCHASTIQUES**

#### **SURVIE DE CELLULES LESEES**

- # Effets tardifs
- # Sans seuil caractérisé
- # À caractère aléatoire, non obligatoire
- # Irréversibles spontanément
- # De gravité indépendante de la dose, mais fréquence d'apparition proportionnelle
- # Non caractéristiques
  - Cancers
  - Effets génétiques

# I- Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## I-3-Tissulaires



# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

---

---

Les effets biologiques des rayonnements ionisants dépendent de :

- La nature des rayonnements
- L'énergie du rayonnement
- Du débit de dose
- La géométrie de la source
- La durée d'exposition
- Du type de cellules exposées (radiosensibilité des organes)

**Plus une cellule est jeune, peu différenciée, à forte activité de reproduction, plus elle est radiosensible**

Chaque tissu a une radiosensibilité qui lui est propre

# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Les effets déterministes, exposition partielle

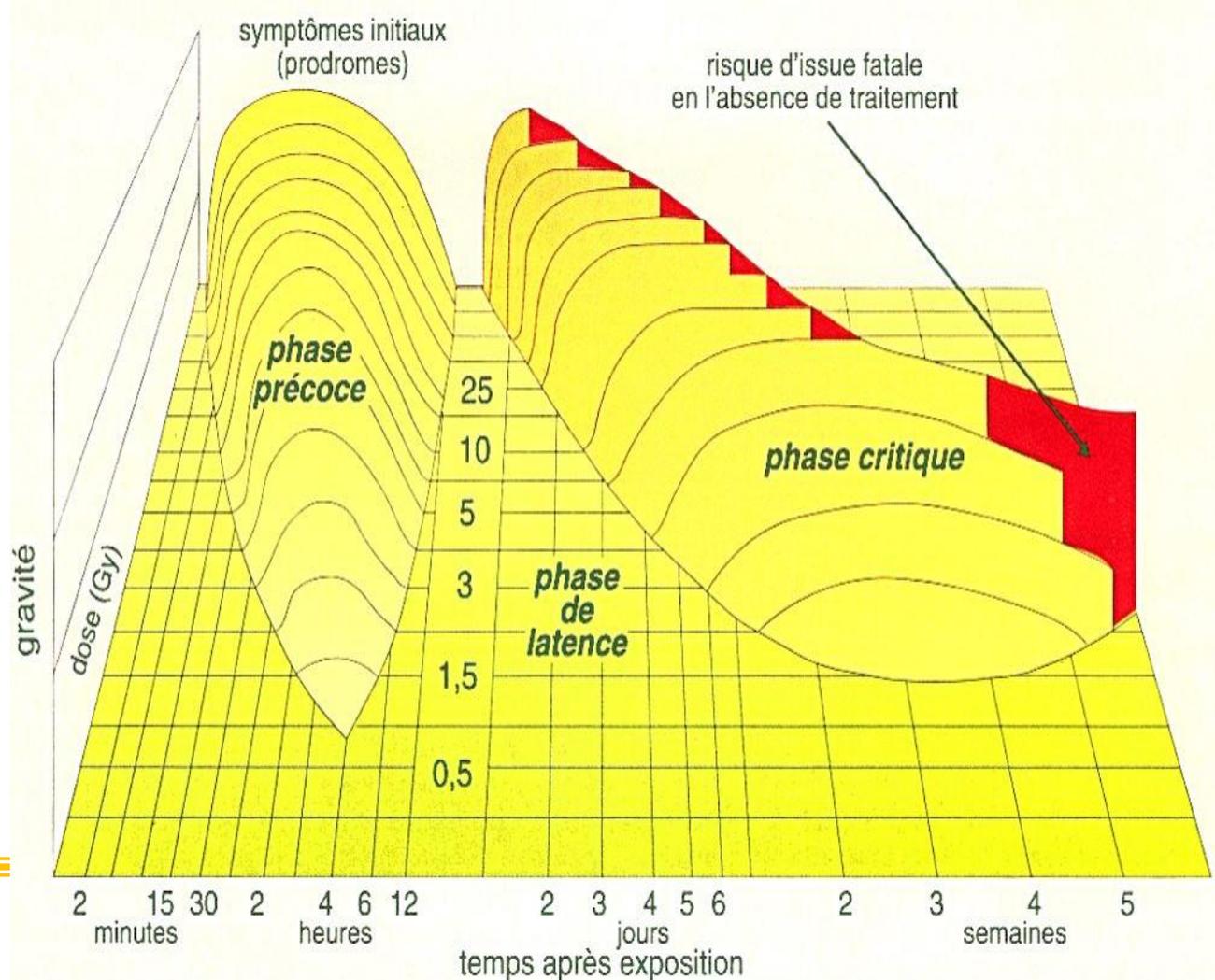
TISSUS EFFET		SEUIL (Gy)
Testicules	stérilité transitoire	0,15
	stérilité permanente	3,5 - 6,0
Ovaires	stérilité	2,5 - 6,0
Cristallin	cataracte	5,0
	opacités détectables	0,5 – 2,0
Peau	érythème	1 - 5
	phlyctènes	20
	nécroses	50
	<i>aucune lésion en dessous de 0,5 Sv / an</i>	

# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Tissulaire

### Évolution clinique d'une irradiation externe globale

- Phase initiale
- Période de latence
- Phase critique
- Évolution tardive



# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Les effets déterministes, exposition globale

D(Gy)	forme	symptômes
< 0,5	infra-clinique	aucun signe clinique
0,5 à 2 h sédation en 24h	réaction générale légère	asthénie, nausées, vomissements 3 à 6 après l'exposition,
2 à 4  après l'exposition normale en 4 à 6 mois	hématopoïétique modérée	leucopénie, thrombopénie, anémie maximale 3 semaines retour à la
4 à 6 Gy	hématopoïétique grave	hémorragies, aplasie . DL 50 : 4 à 4,5
6 à 7 hémorragies	gastro-intestinale	diarrhée, vomissements,
8 à 10	pulmonaire	insuffisance respiratoire aiguë
>10	cérébrale	coma, mort en 14 à 36 h

# I- Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Effets in utero

### PHASE

### EFFET SEUIL (Gy)

Pré implantation, 8 ème jour

Loi du tout ou rien

Organogenèse, 2ème semaine au 2ème mois,

Malformation congénitales  
100 mSv

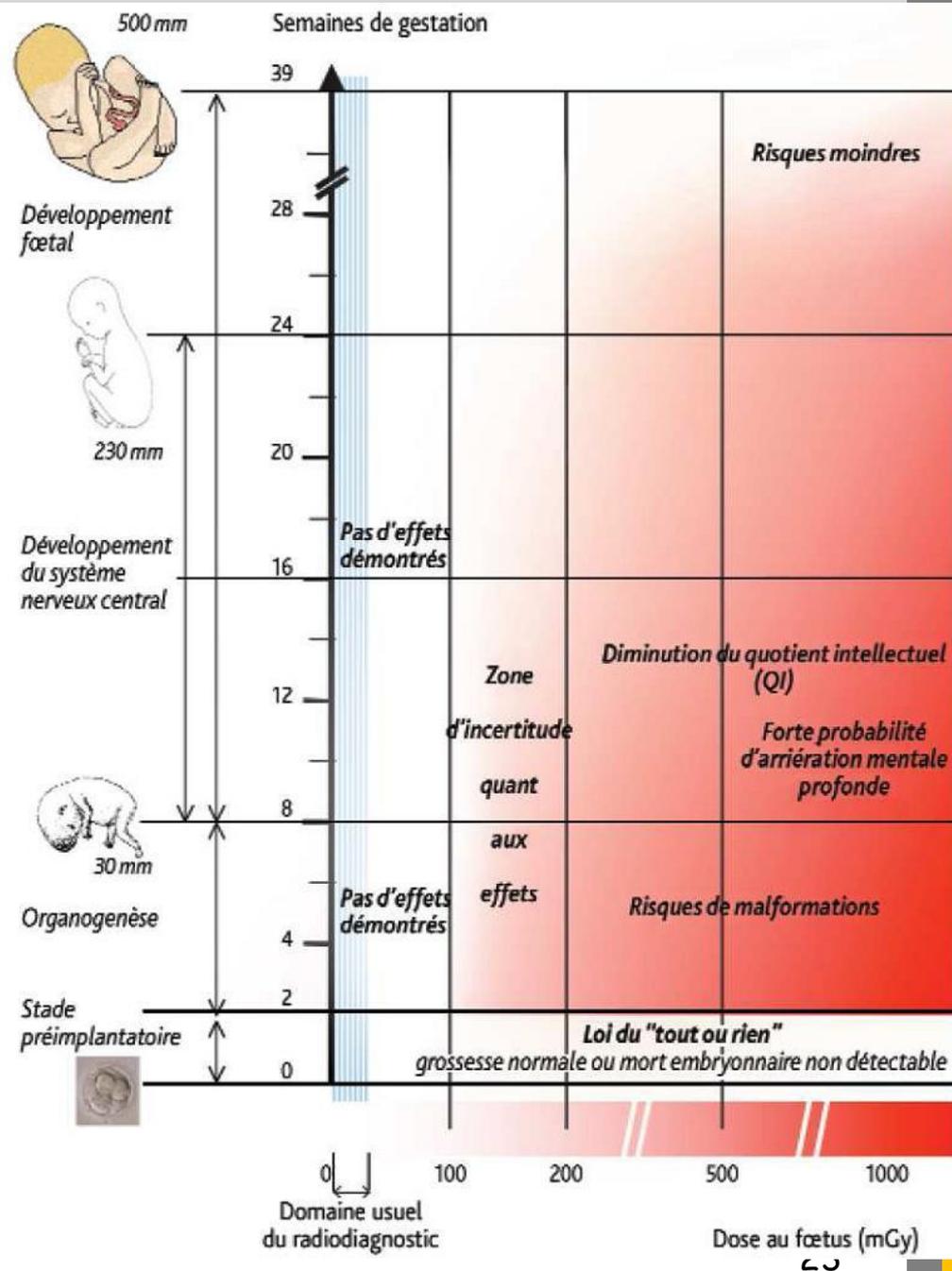
Stade foetal, croissance 8ème à 15ème  
au delà 15 ème

Retard mental  
Troubles de la croissance  
sans malformation

(microcéphalie, hydrocéphalie, spina bifida, retards staturo pondéraux

Risque de cancers X 2 à 3 par rapport à la population

# Effets in utero



# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Les sources d'information

---

---

- Les études in vitro
- L'expérimentation animale
- Les enquêtes épidémiologiques :
  - Populations exposées à de faibles doses
  - Populations exposées à des doses moyennes ou fortes :
    - Pour des raisons professionnelles
    - Pour des raisons médicales
    - Survivants d'HIROSHIMA et de NAGASAKI
    - Accident de TCHERNOBYL

# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Les effets retardés

---

---

### **LONGEVITE**

< 2 Sv pas de différence significative (cohorte Hiroshima Nagasaki)

### **EFFETS GENETIQUES**

Cohorte H/N, si le risque existe , il est très faible

### **LES CANCERS**

Dans une population non exposée, 25% des individus vont développer un cancer

Expérimentation animale, effets cancérogènes faibles pour une irradiation à faible débit

Cohorte H/N : à doses élevées excès de cancers et de leucémies :

- 4 à 20 ans pour les leucémies (type de cancer le plus fréquent)
- 15 à 20 ans pour les cancers (thyroïde 20 ans, sein 25 ans, peau 40 ans)
- Aucun effet observé chez sujet ayant reçu < 1 Sv

# Les effets biologiques des rayonnements ionisants

## Les effets retardés

---

---

### **EVALUATION DES RISQUES A TRES FAIBLES DOSES**

Effets rares tardifs, ne sont appréhendés qu'en terme de probabilité

Etudes épidémiologiques

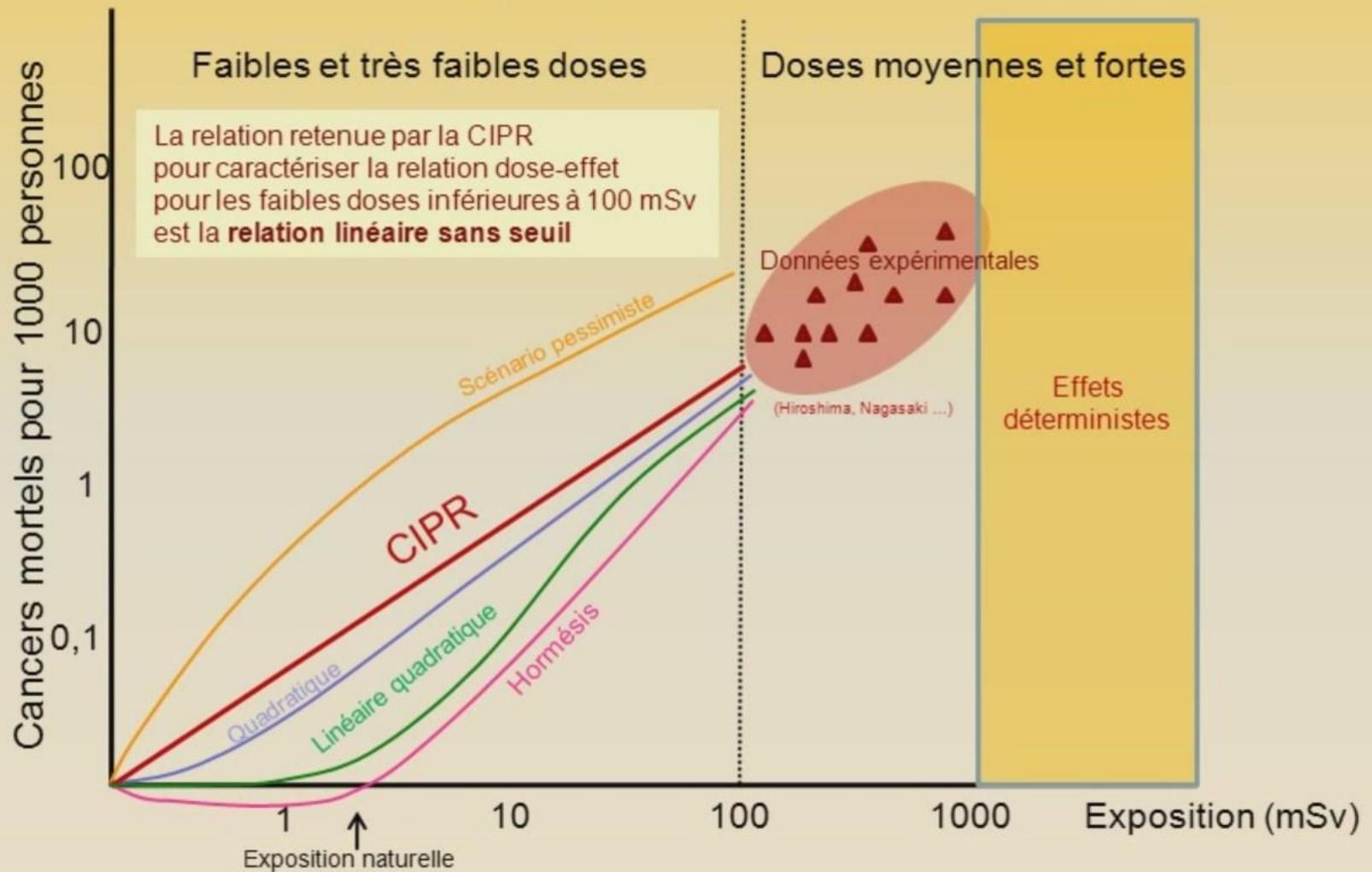
Effets représentés sous forme d'une courbe linéaire quadratique (effets très faibles aux faibles doses puis croit rapidement à des doses plus élevées)

Pour la CIPR : relation linéaire sans seuil (qui surestime les effets) pour ces recommandations

Dernières données scientifiques (juin 2015) : Etude épidémiologique « In Works » : lien entre la leucémie et l'exposition aux faibles doses (plus la dose accumulée est élevée plus le risque augmente)

# Relation dose/effet

Relation retenue partout dans le monde pour poser les bases de la radioprotection :  
linéaire sans seuil



# Rayonnements ionisants

## Probabilité d'apparition d'effets stochastiques

Probabilité de risque de décès d'individus exposés à de faibles doses délivrées à faibles débits ( % . Sv<sup>-1</sup> . homme<sup>-1</sup> )

	CIPR 26	CIPR60
<b>Effets cancérogènes</b>	$1,25 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$
<b>Effets héréditaires</b>	$0,4 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$
<b>Total</b>	$1,65 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$

CIPR60 : pour 10 000 personnes recevant 100 mSv, 50 décès par cancers radio-induits, contre 2500 décès par cancers naturels (25% en France)

En résumé,

# EFFETS DES RADIATIONS

Valeurs en millisieverts (mSv) : 1 Sv = 1 000 mSv = 1 000 000  $\mu$ Sv - L'exposition est cumulative

## ■ Radiations potentiellement mortelles

Risques ultérieurs très importants de cancers

- 10 000 mSv : 100 % mortel en quelques jours
- 5 000 mSv : 50 % mortel sous 30 jours
- 2 000 mSv : Graves pathologies sanitaires

## ■ Aucun symptôme immédiat

Pathologies et risques de cancers

- 1 000 mSv : Pathologies et cancers  $\geq$  5 %
- 400 mSv : Exposition 4 h = pathologies
- 100 mSv : Niveau élevé risques de cancers

## ■ En principe aucun symptôme

Aucun risque discernable de cancer

- 20 mSv : Limite annuelle travailleurs
- 10 mSv : Dose moyenne scanner du corps
- 9 mSv : Dose annuelle pilotes de ligne
- 3 mSv : Mammographie
- 2.5 mSv : Dose moyenne annuelle France
- 0.1 mSv : Radiographie rayons X



**CERVEAU** Œdème cérébral à dose élevée

**YEUX** Une dose de radiation élevée peut déclencher une cataracte

**THYROÏDE** L'iode radioactif sature et génère le cancer : Enfants très vulnérables

**POUMONS** Très vulnérables aux particules qui irradient notamment sang et organes

**ESTOMAC** Très vulnérable aux particules ingérées par une diffusion des radio isotopes

**ORGANES GÉNITAUX** Stérilité, descendance risques malformations, troubles comportementaux

**PEAU** Brûlures (bruning) et desquamation

**MOELLE OSSEUSE** Destruction. Les globules blancs, rouges et plaquettes sont altérés ce qui engendre leucémies et un effondrement du système immunitaire

# La radioprotection

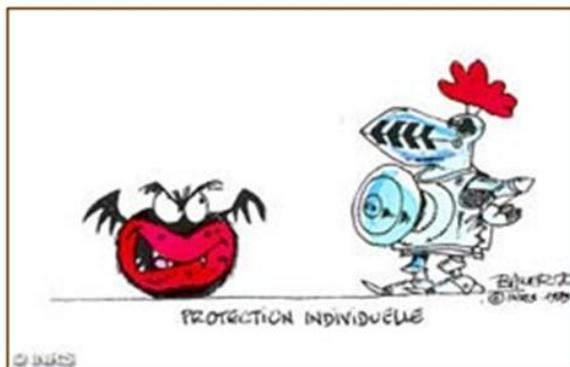
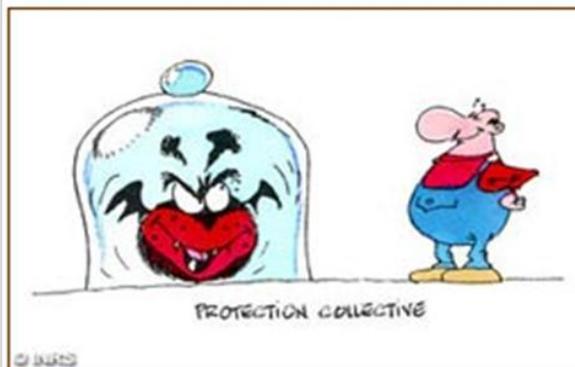
---

---

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

*(article 1<sup>er</sup>-I de la loi 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire)*

## Moyens de radioprotection : équipements collectifs et individuels



Démarche de prévention  
Culture de radioprotection

**Eviter la routine vis-à-vis d'un « risque » invisible**

**Eviter les discours « on est très loin des limites, pas besoin d'en faire tout un foin »**

**Eviter les pratiques « les autres n'appliquent pas les consignes, pourquoi moi le ferais-je? »**

historique

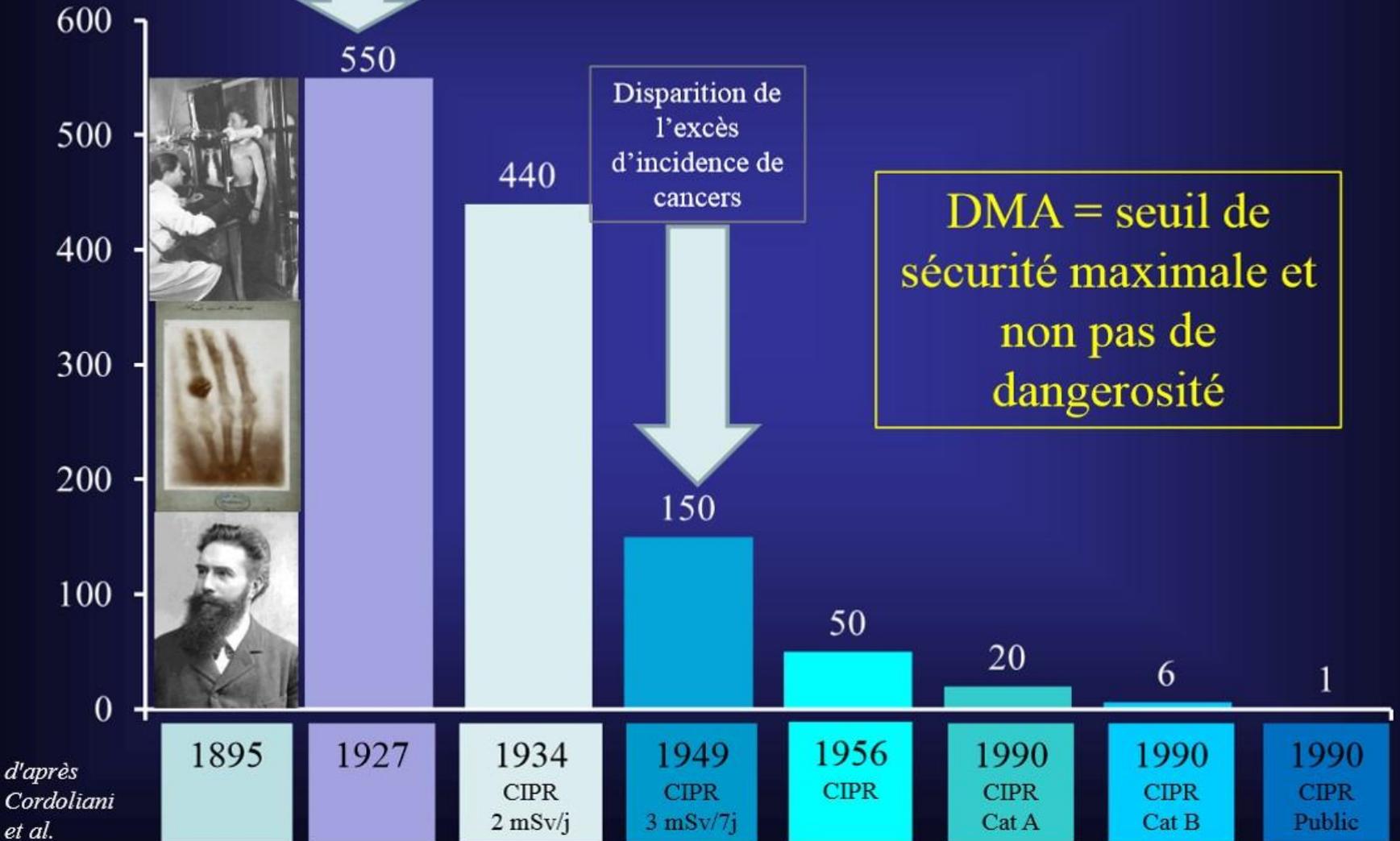
# Histoire de la Dose Maximale Admissible

mSv/an

Disparition des effets déterministes

Disparition de l'excès d'incidence de cancers

DMA = seuil de sécurité maximale et non pas de dangerosité



d'après Cordoliani et al.

# TABLEAU 6 DES MALADIES PROFESSIONNELLES INDEMNISABLES

•Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutif à une exposition aiguë.....		<b>30 jours</b>
•Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutif à une exposition chronique .....	<b>1an</b>	
•Blépharite ou conjonctivite.....		<b>7 jours</b>
•Kératite.....	<b>1 an</b>	
•Cataracte.....	<b>10 ans</b>	
•Radiodermites aiguës.....	<b>60 jours</b>	
•Radiodermites chroniques.....		<b>10 ans</b>
•Radio-épithélite aiguë des muqueuses.....		<b>60 jours</b>
•Radiolésions chroniques des muqueuses.....		<b>5 ans</b>
•Radionécrose osseuse.....	<b>30 ans</b>	
•Leucémies.....	<b>30 ans</b>	
•Cancers bronco-pulmonaire primitif par inhalation.....	<b>30 ans</b>	
•Sarcome osseux.....	<b>50 ans</b>	

# RAYONNEMENTS IONISANTS



**MERCI DE VOTRE  
ATTENTION !**