

Andreas PITZSCHKE, PhD
Institut de radiophysique

Effets biologiques des radiations ionisantes

Cours RP B/C – Février 2018



Pourquoi étudier la radiobiologie ?

Le doctorant P. J. se fait irradier avec 15 Gy au corps entier. Que passera-t-il ?

- Energie absorbée par le corps → augmentation de la température

- 10 K

- 1 K

- 0.1 K

- 10 mK

- 1 mK



$$\Delta E = D \cdot \Delta m = 15 \text{ Gy} \cdot 70 \text{ kg} \approx 1 \text{ kJ}$$

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{\Delta Q}{c \cdot m} \stackrel{\Delta Q = \Delta E}{=} \frac{D}{c} \approx 3 \text{ mK}$$

$$c = 4.816 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

- **Dose létale : 10 – 12 Gy**

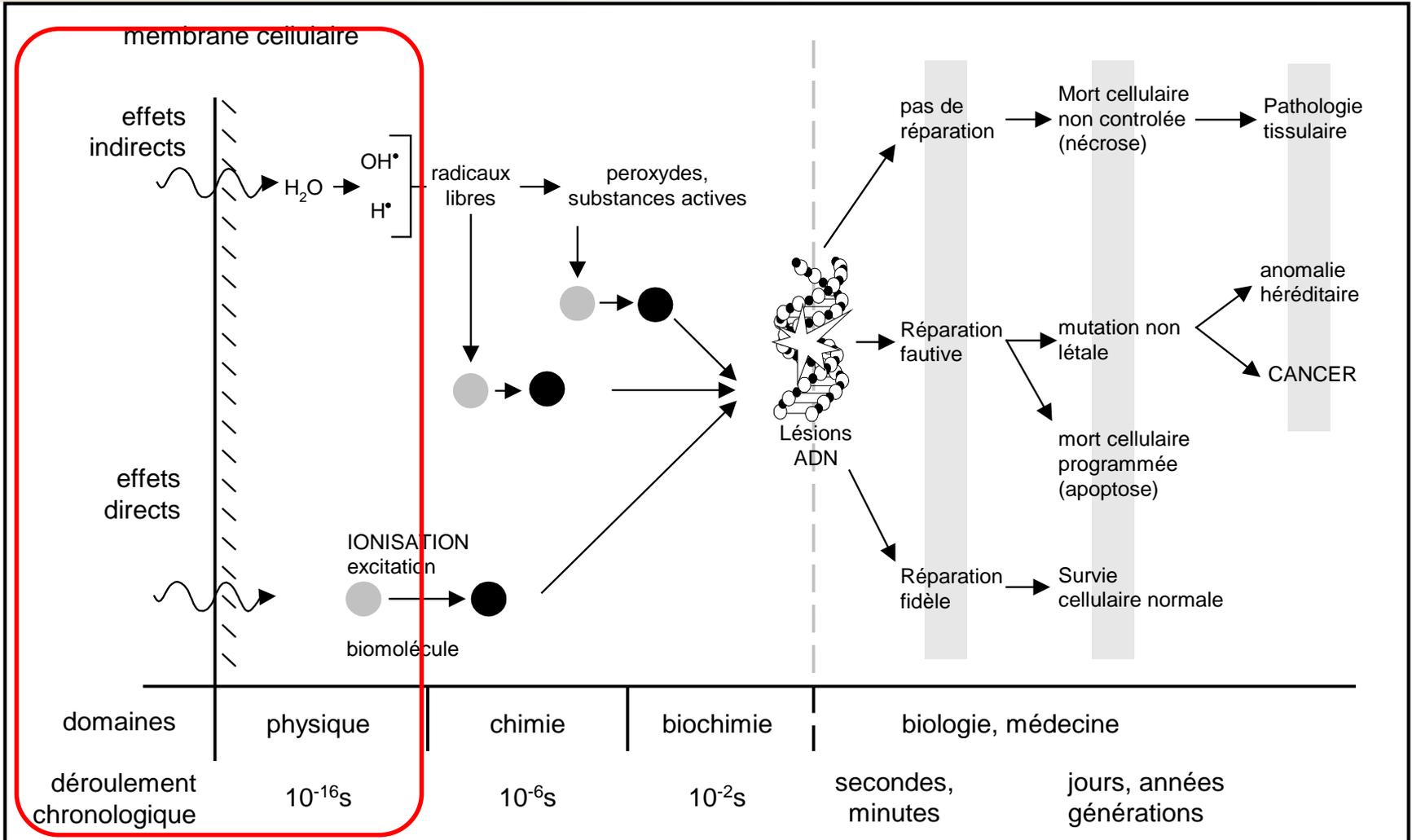
Objectifs du cours :

- Décrire les **actions biologiques** des rayonnements ionisants
- Expliquer les **effets déterministes** (tissulaires) et **stochastiques**
- Evaluer les **effets attendus suite à une exposition** externe ou interne dans une situation donnée

Plan du cours

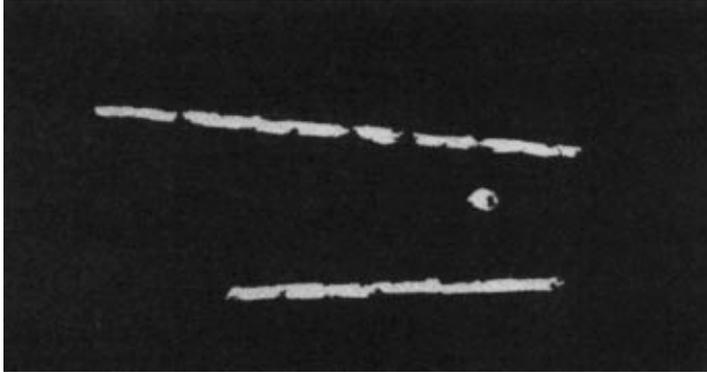
- Effets physiques
- Effets radiochimiques
- Effets sur l'ADN
- Effets cellulaires
- Effets sur l'organisme
 - Réactions tissulaires (effets déterministes)
 - Effets stochastiques
 - Effets sur l'embryon et le fœtus
 - Autres effets
- Risque radiologique

Effets sur l'organisme

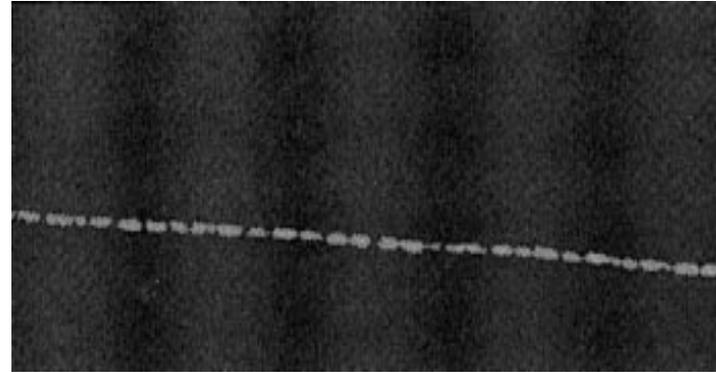


Chambre à brouillard

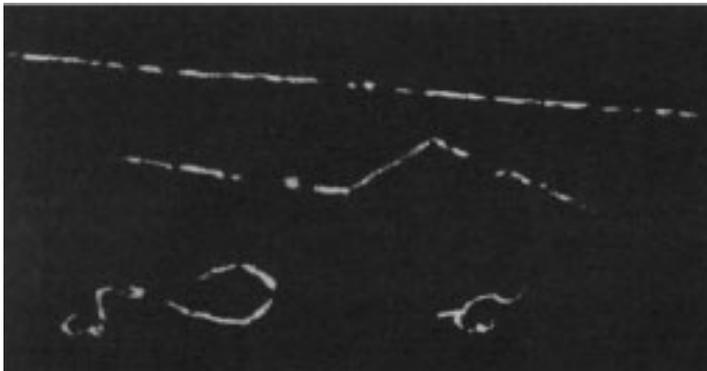
protons



muon



β



particule α

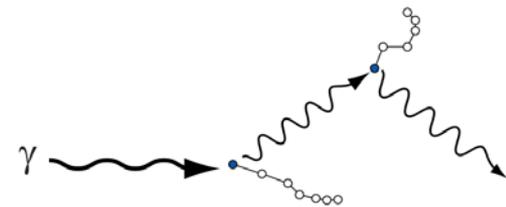
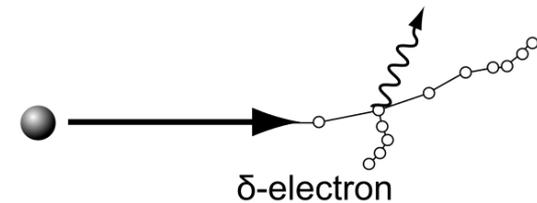


Effets physiques initiaux d'une irradiation

Effets biologiques : aboutissement d'une longue chaîne de **phénomènes** déclenchée par le passage du rayonnement dans le **milieu**

1. Phénomènes : **ionisations et excitations des atomes et molécules**

- Rayonnement directement ionisant :
particules chargées (e^\pm , p , ions lourds)
- Rayonnement indirectement ionisant :
particules non-chargées (photons, neutrons)



Ionisation et excitation des atomes et molécules

- Energie de liaison des électrons:
 - **ionisation/excitation**
 - dans l'ordre de 10 eV
- Energie de liaison intramoléculaire :
 - liaison **chimique**
 - inférieure à 10 eV

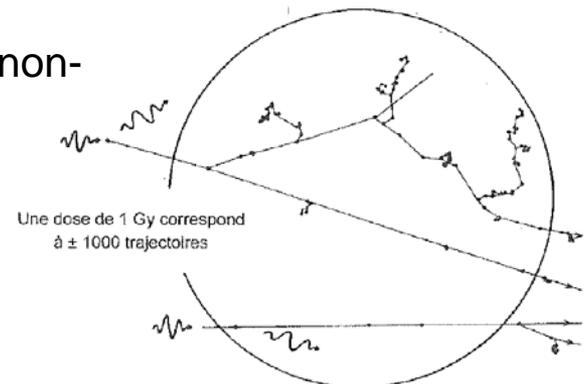
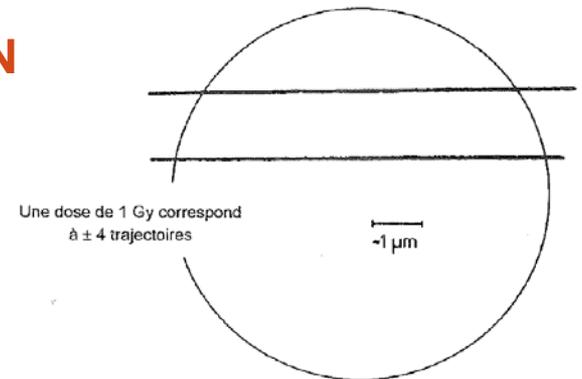
Atome/molécule	Energie (eV)	Liaison
Hydrogène	13.6 (K)	Electronique
Carbone	11.2 (L)	Electronique
Oxygène	13.6 (L)	Electronique
Phosphore	10.9 (M)	Electronique
Calcium	6.1 (N)	Electronique
H ₂	15.6	Electronique
O ₂	12.5	Electronique
H ₂ O	12.6	Electronique
NO ₂	11.0	Electronique
CO ₂	14.4	Electronique
C=C	4.9	Chimique
H-OH	5.16	Chimique

Effets physiques initiaux d'une irradiation

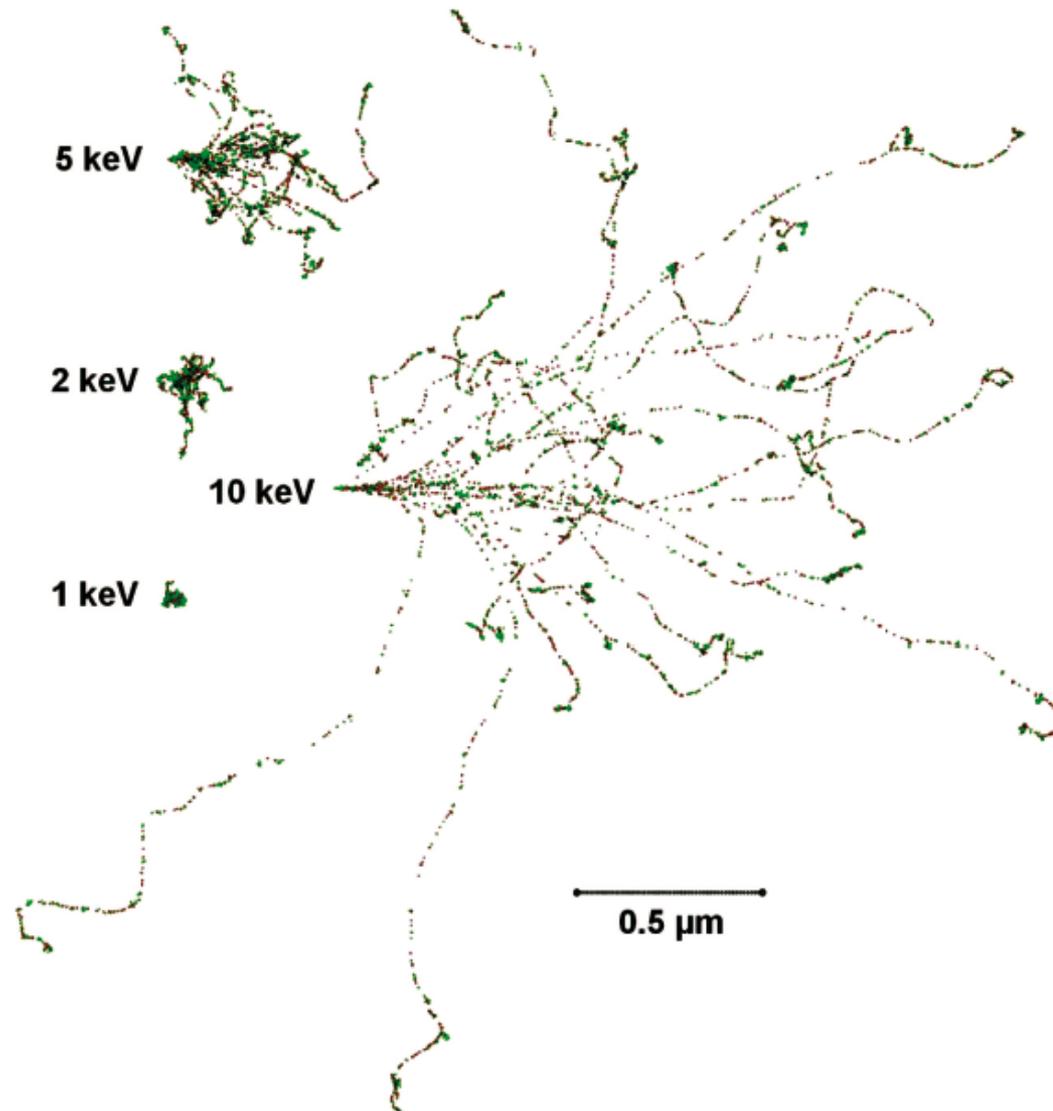
Effets biologiques : aboutissement d'une longue chaîne de **phénomènes** déclenchée par le passage du rayonnement dans le **milieu**

2. Milieu : **Structures cellulaires contenant l'ADN**

- Rayonnement directement ionisant : particules chargées (e^\pm , p , ions lourds)
 - α : $\sim 2 - 4$ trajectoires par noyau pour 1 Gy
- Rayonnement indirectement ionisant : particules non-chargées (photons, neutrons)
 - γ : ~ 1000 trajectoires par noyau pour 1Gy



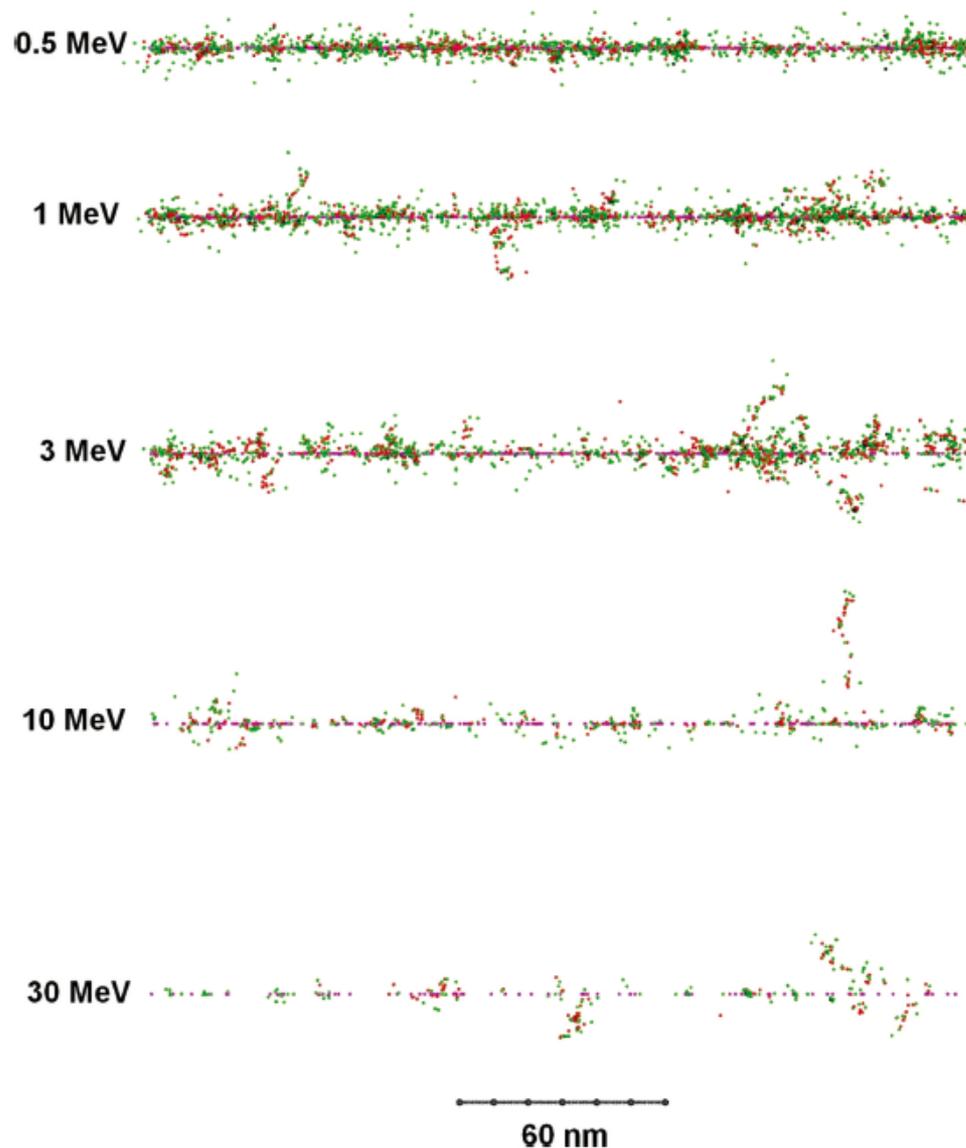
Electrons



ICRU 86

Figure 2.3. Twenty randomly generated electron tracks for initial kinetic energies of 1 keV, 2 keV, 5 keV, and 10 keV. Red points represent ionizations, and green points represent excitations. All tracks of the same energy start at the same point and initially proceed in the same direction (left to right in the figure).

Alphas



ICRU 86

Figure 2.5. Calculated 230 nm track segments for 0.5 MeV, 1 MeV, 3 MeV, 10 MeV, and 30 MeV alpha particles in water. Red points represent ionizations, and green points represent excitations.

Transfert d'énergie linéique (TEL)

- À l'échelle du micromètre :
 - L'énergie absorbée est distribuée de manière **non uniforme** et discontinue
 - L'effet biologique résulte de l'absorption d'énergie dans des structures de très **petites dimensions**
 - Grandeur «dose absorbée» n'exprime pas ces caractères → **microdosimétrie**
- Distribution de l'énergie à l'échelle microscopique :

$$\text{TEL} = \frac{\Delta E}{\Delta x} \quad [\text{eV} / \mu\text{m}]$$

Dépôt d'énergie dans les structures cellulaires contenant de l'ADN

Type d'ionisation	Energie déposée et volume	TEL	Fréquence par cellule et Gy
Ionisation isolées	~10 eV dans ~2nm	~ 1 keV/ μ m (faible)	~1000
Petites grappes	~100 eV dans ~2nm	~ 10 keV/ μ m (faible)	~20 – 100
Grosses grappes	~400 eV dans 5-10 nm	~ 10 – 100 keV/ μ m (faible, élevé)	~ 4 ^a – 100 ^b
Très grosses grappes	~800 eV dans 5-10 nm	> 100 keV/ μ m (élevé)	~ 0 – 30

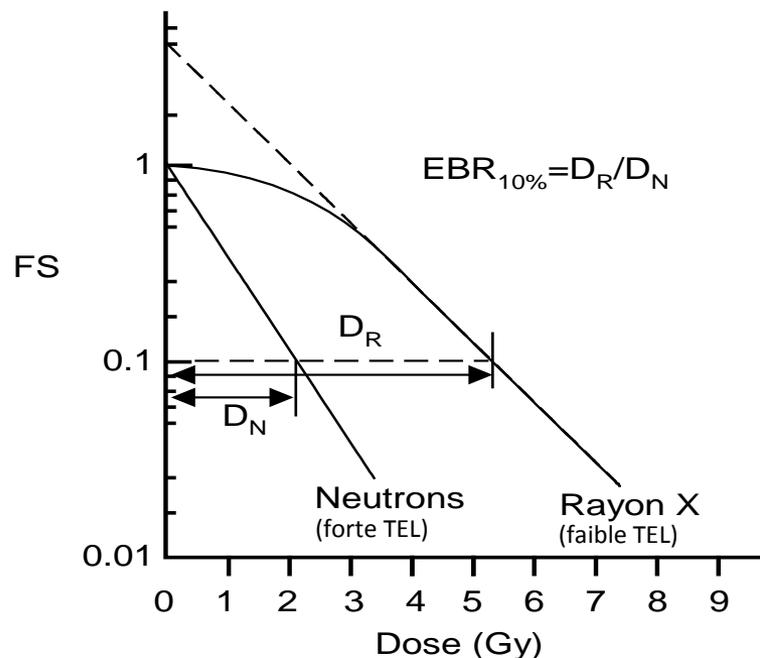
^a TEL faible

^b TEL élevé

Effet du type de rayonnement (EBR)

Les rayonnements fortement ionisants sont plus efficaces pour détruire les cellules

$$\text{EBR} = \frac{\text{Dose du rayonnement de référence}}{\text{Dose du rayonnement à l'étude}} \quad \left| \text{même niveau d'effet} \right.$$



EBR (efficacité biologique relative) sert à comparer les effets biologiques de deux rayonnements

valeur « moyenne » de l'EBR pour la radioprotection $\Rightarrow w_R$

$$\text{Equivalent de dose: } H_T = \sum_R w_R D_{R,T}$$

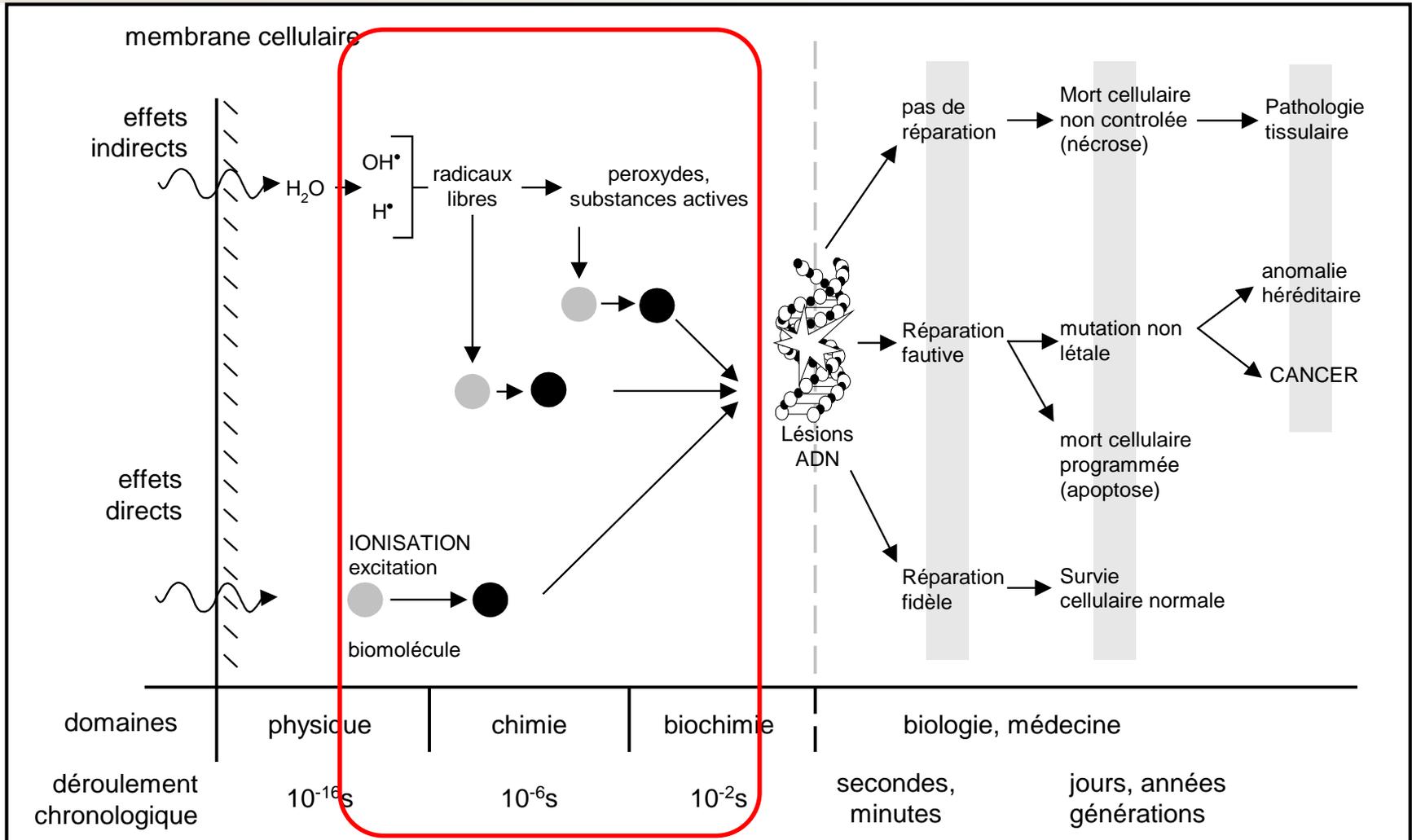
Résumé : étape physique

- Conversion de particules non chargées (γ or n) en particules chargées
- Interaction des particules chargées avec les électrons de la matière
 - ionisation des atomes
 - excitation des atomes
- Recombinaison, désexcitation \Rightarrow chaleur
- Durée du processus : $< 10^{-16}$ s
- Quantification de l'action des radiations sur la matière :

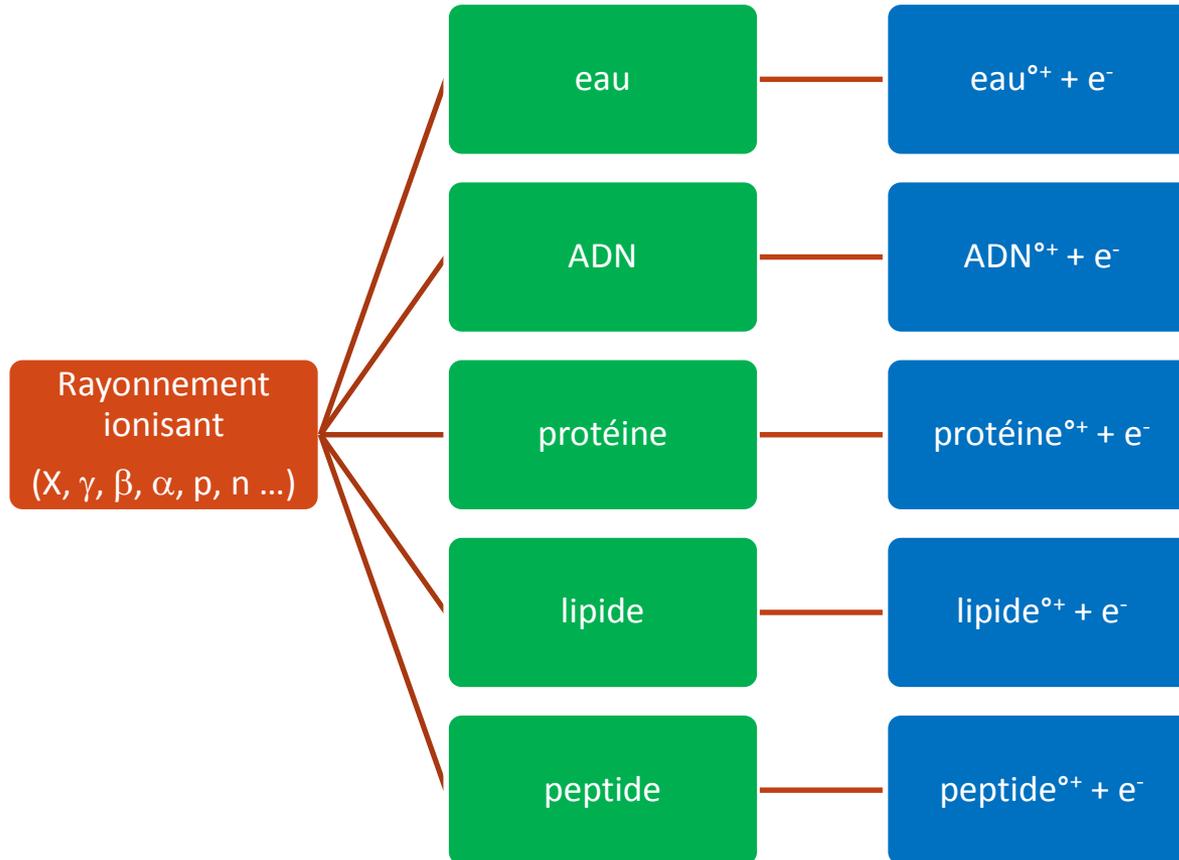
- Macroscopique : dose absorbée $D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad [\text{J/kg}] = [\text{Gy}]$

- Microscopique : TEL $\text{TEL} = \frac{\Delta E}{\Delta x} \quad [\text{eV} / \mu\text{m}]$

Effets sur l'organisme

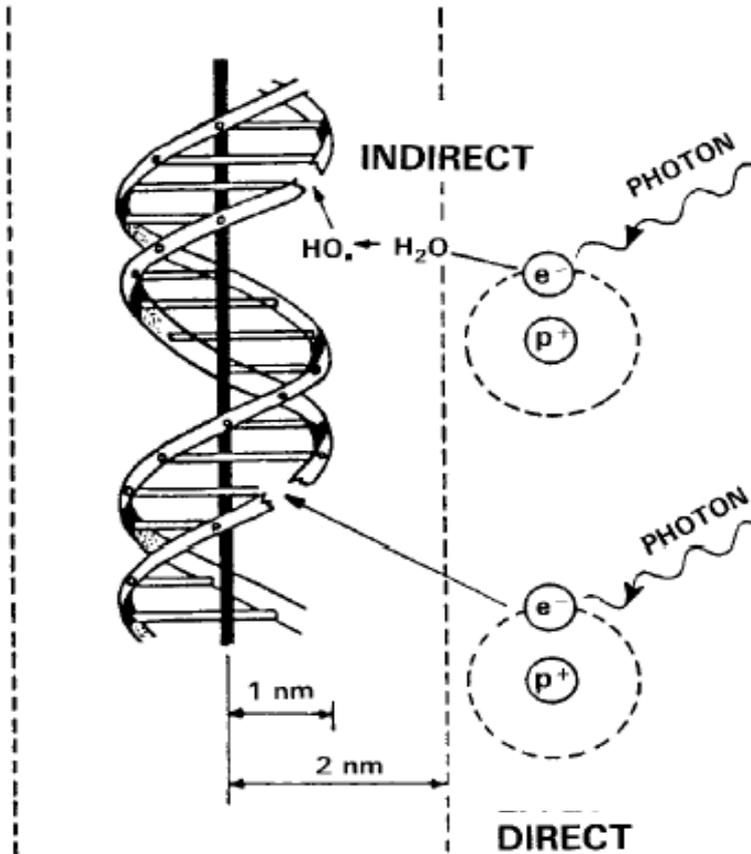


Chimie sous rayonnement

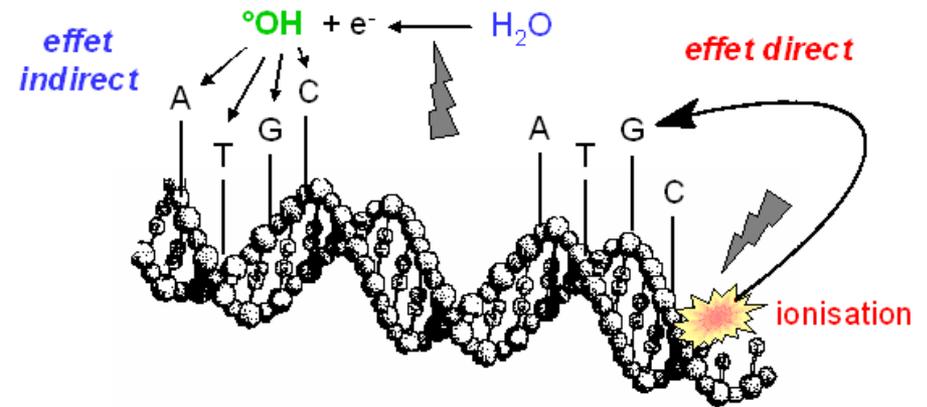


- Arrachement d'un électron du cortège électronique
- Apparition d'un **radical libre** très réactive

Effet direct et indirect



Direct :



Indirect :



Ce phénomène est **beaucoup plus fréquent** que l'effet direct d'ionisations des protéines et en particulier de l'ADN.

Radicaux libres de la radiolyse de l'eau

A 10^{-16} s des ionisations et des excitations:



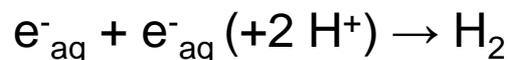
A 10^{-14} s ces systèmes excités produisent des **radicaux très réactifs**:



A 10^{-12} s l'électron devient solvaté ($E_{\text{e}^-} = 0.025$ eV) :



A 10^{-9} s recombinaison des radicaux en espèces non radicalaires :



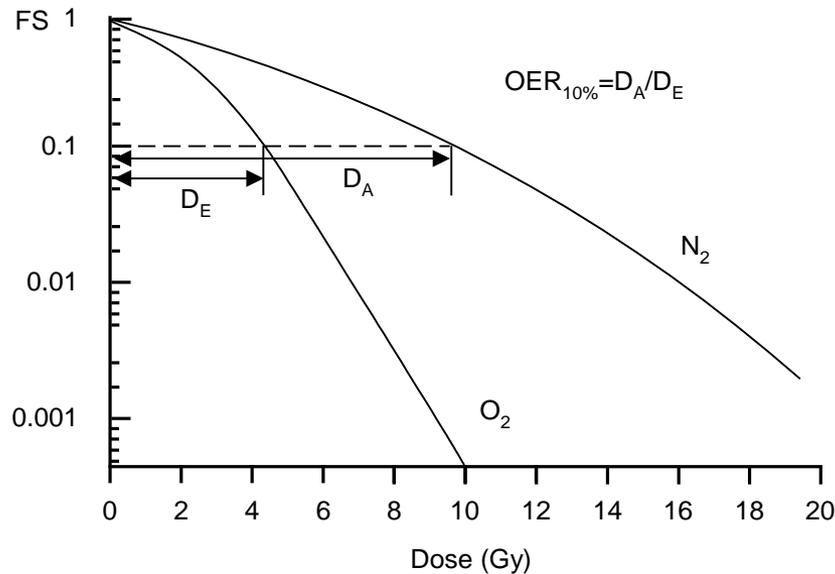
Radicaux peroxydes

- RO_2° : **radicaux libres secondaires**
- Action d'oxygène sur des radicaux libres centrés sur le **carbone** (R°)
- Espèces formées à la suite de réactions initiées par les radicaux libres $^\circ\text{OH}$ sur des **substrats bio-organiques** (RH)
$$^\circ\text{OH} + \text{RH} \rightarrow \text{R}^\circ + \text{H}_2\text{O}$$
$$\text{R}^\circ + \text{O}_2 \rightarrow \text{RO}_2^\circ$$
- **Dégradation oxydative des membranes biologiques** (lipides)

Effet d'oxygène (OER)

Les cellules bien oxygénées sont plus sensibles aux radiations

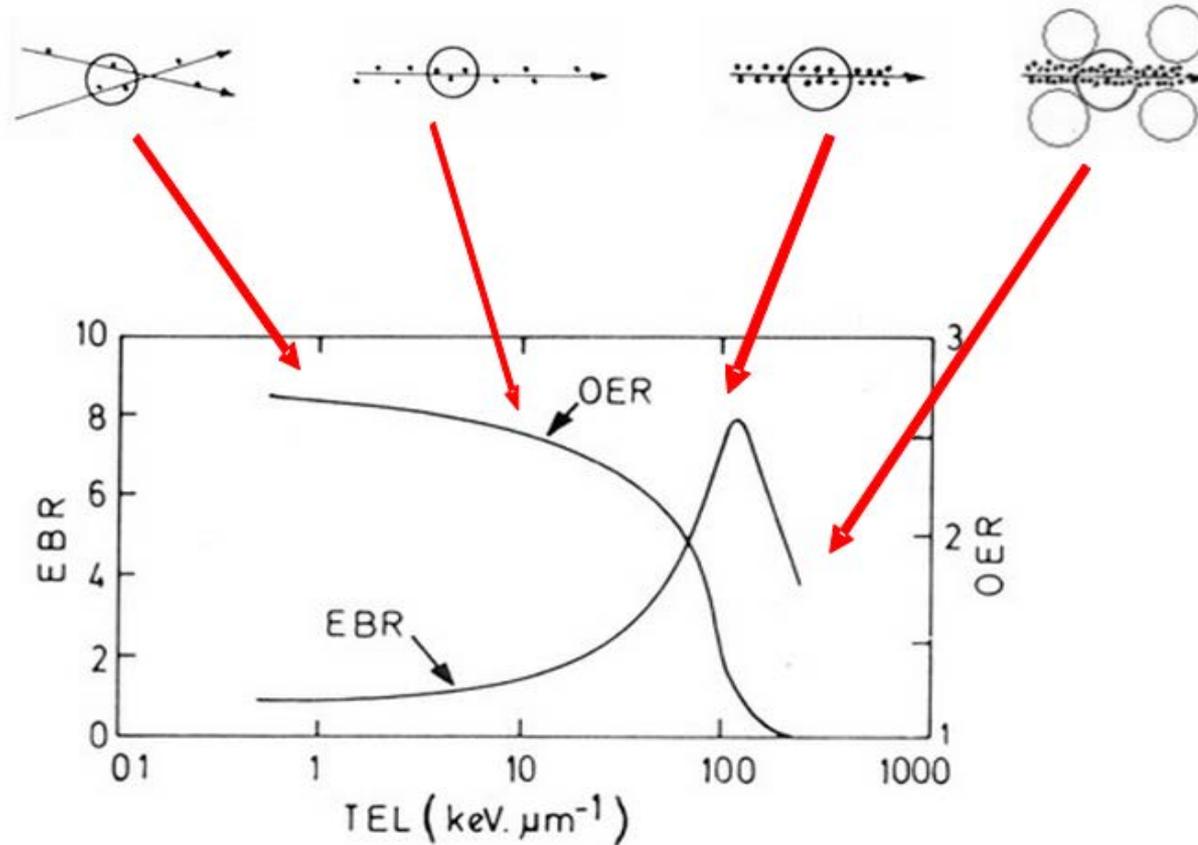
OER : Oxygen enhancement factor



Effet important dans le traitement du cancer par radiothérapie

$$\text{OER} = \frac{\text{Dose en condition d'hypoxie}}{\text{Dose dans l'air}} \quad \text{même niveau d'effet}$$

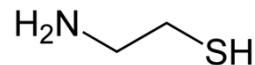
?? OER, EBR et TEL ??



EBR = efficacité biologique [relative]; OER = Oxygen Enhancement Ratio.

Influence d'agents chimiques

Radioprotecteurs (*cystéamine*)



- Diminuent le taux de toutes les espèces réactives de l'oxygène (ROS: reactive oxygen species)



Radiosensibilisateurs (*oxygène*)

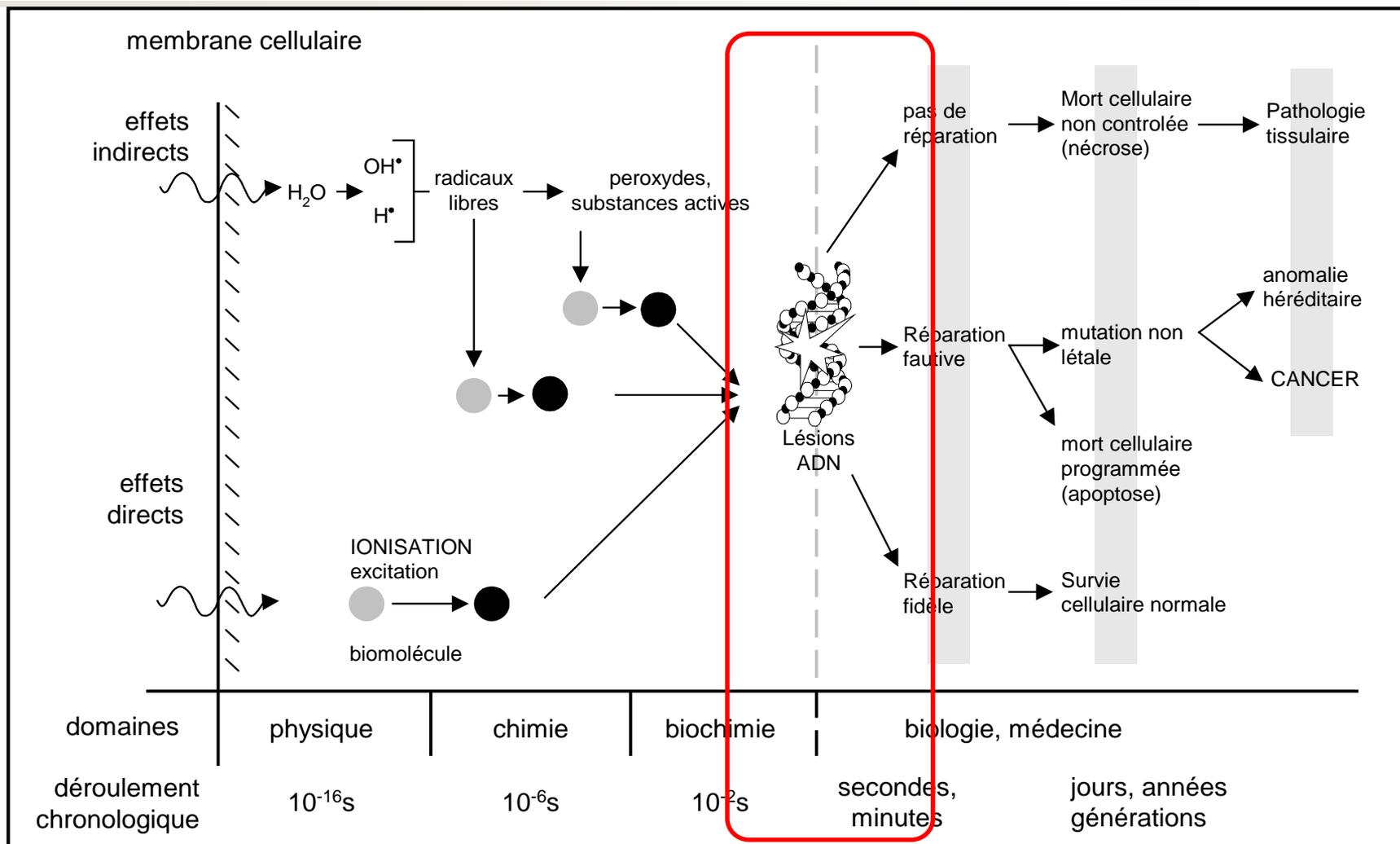
- Augmentent la sensibilité de la cellule, c.à.d. créent des radicaux libres



Résumé : Radiochimie

- Effet **direct** : ionisation direct de l'ADN
- Effet **indirect**: ionisation indirect de l'ADN par des radicaux
- Formation d'**espèces réactives de l'oxygène** suite à la **radiolyse de l'eau** (effet indirect) :
 - Soit **recombinaison** rapide pour former des molécules d'eau ou d'hydrogène → aucun effet
 - Soit **diffusion** des radicaux libres et altération moléculaire avec par ex. des ruptures au niveau de l'ADN
 - Soit **combinaison** pour former des peroxydes, très réactifs
- La présence d'oxygène va favoriser la formation de peroxydes et donc augmenter l'effet de la radiation

Effets sur l'organisme



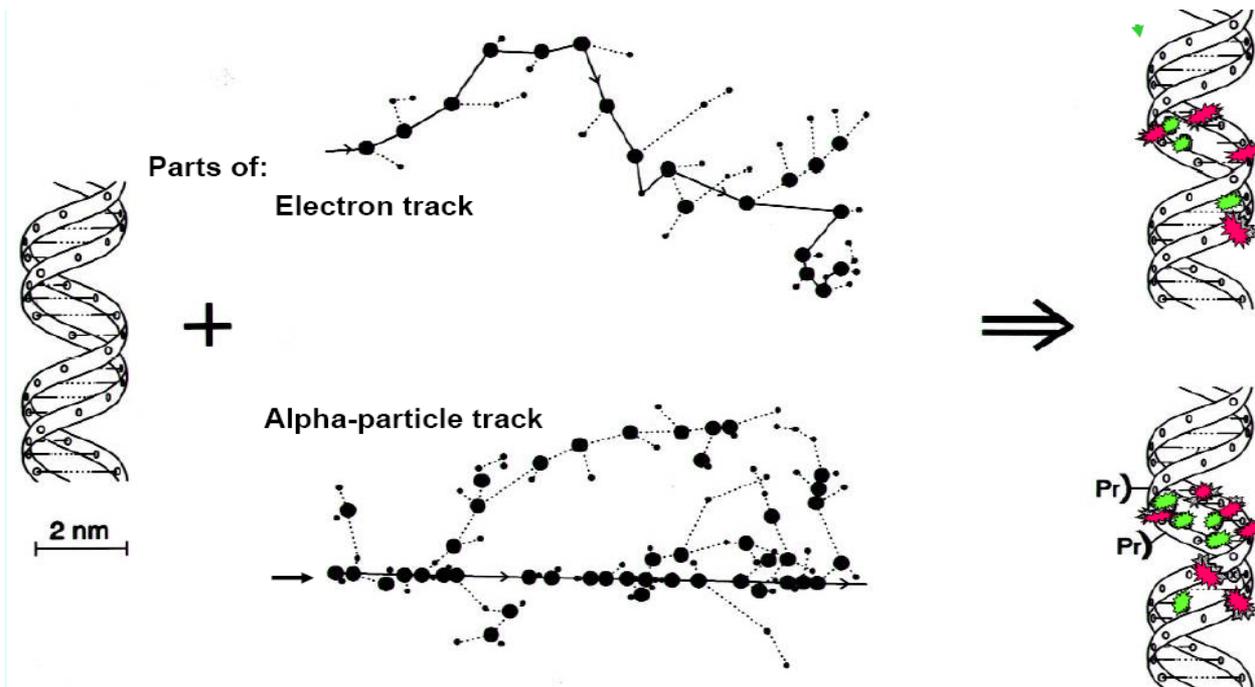
Effets du rayonnement sur l'ADN

- Porteur de l'information génétique :
 - Agent de sa propre **réplication** (transcription en ARN)
 - Traduction de l'information en **protéines**
 - Garant de la **transmission** fidèle de **l'information** génétique
- Toute atteinte ou changement de l'ADN :
 - **Incapacité de reproduction** et mort cellulaire
 - **Mutation** (instabilité génétique et transformation maligne)
 - Mécanisme de **réparation et défense**

Lésions induites dans l'ADN par le rayonnement

Effets différents en fonction du TEL :

- TEL faible : 40% des lésions sont dues au dépôt d'énergie dans la matière biologique et 60% dues aux effets indirects
- TEL élevé : risque important de lésions directes

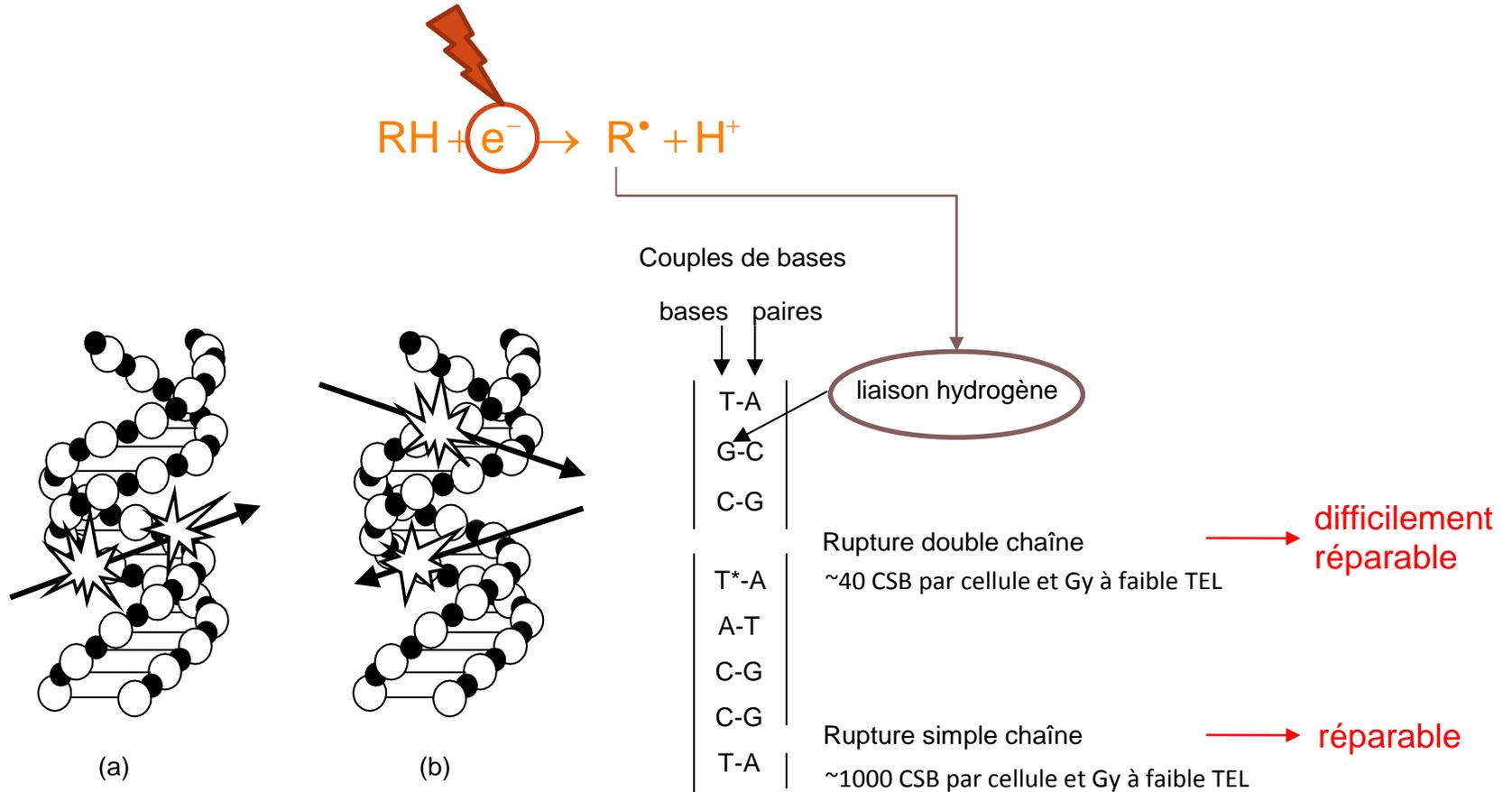


Lésions de l'ADN

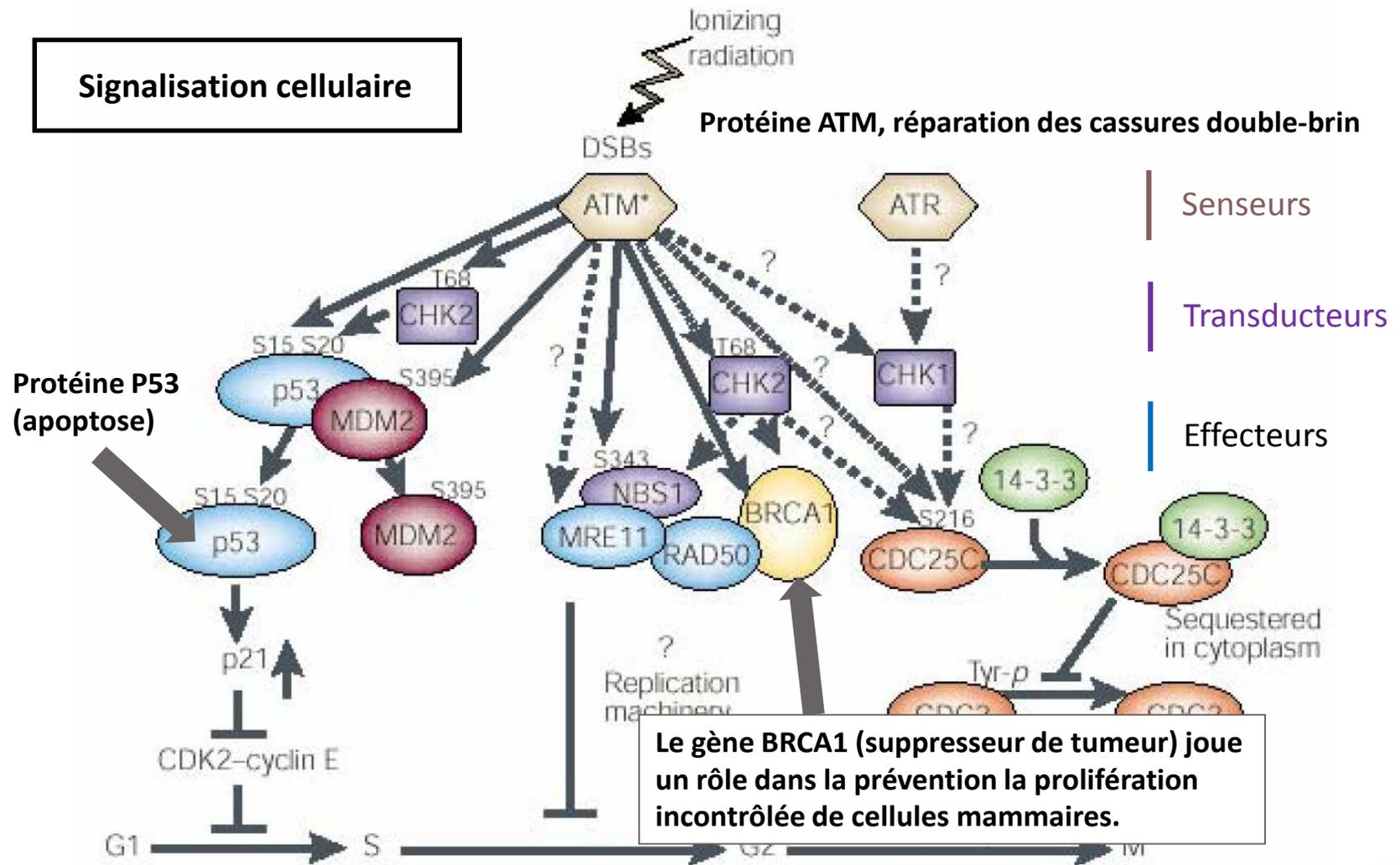
Type de dommage	Dommages endogènes Lésions par cellule et par jour	Dommages radio-induits Lésions par génome par Gy
Cassure simple-brin	55'000	1'000
Pertes de bases	18'000	-
Dommages de bases	~4'000	2'000
Cassure double-brin	8	40
Pontages ADN/ADN	8	30
Pontages ADN/protéine	Quelques-uns	150

- **Nombre de lésions** par jour dans chaque cellule est **considérable** !
 - Lésions naturelles par jour plus nombreuses que celles causées par une dose de 1 Gy
 - La cellule s'est adaptée au cours d'évolution pour réparer les lésions simples
- **Irradiation artificielle : lésions complexes** comme CDB et LMDS (locally multiply damaged sites)

Cassures simple-brin (CSB) et double-brin (CDB)



Signalisation des dommages de l'ADN



(Source : BEIR VII)

Aberrations chromosomiques

 <p>Isochromosome dicentrique</p>	 <p>Anneau</p>	 <p>Délétion terminale</p>
 <p>Translocation réciproque</p>	 <p>Inversion péricentrique</p>	 <p>Inversion paracentrique</p>

- Dues aux cassures et fusions des chromosomes
- Détection d'aberrations dans les lymphocytes

Résumé : L'effet sur l'ADN

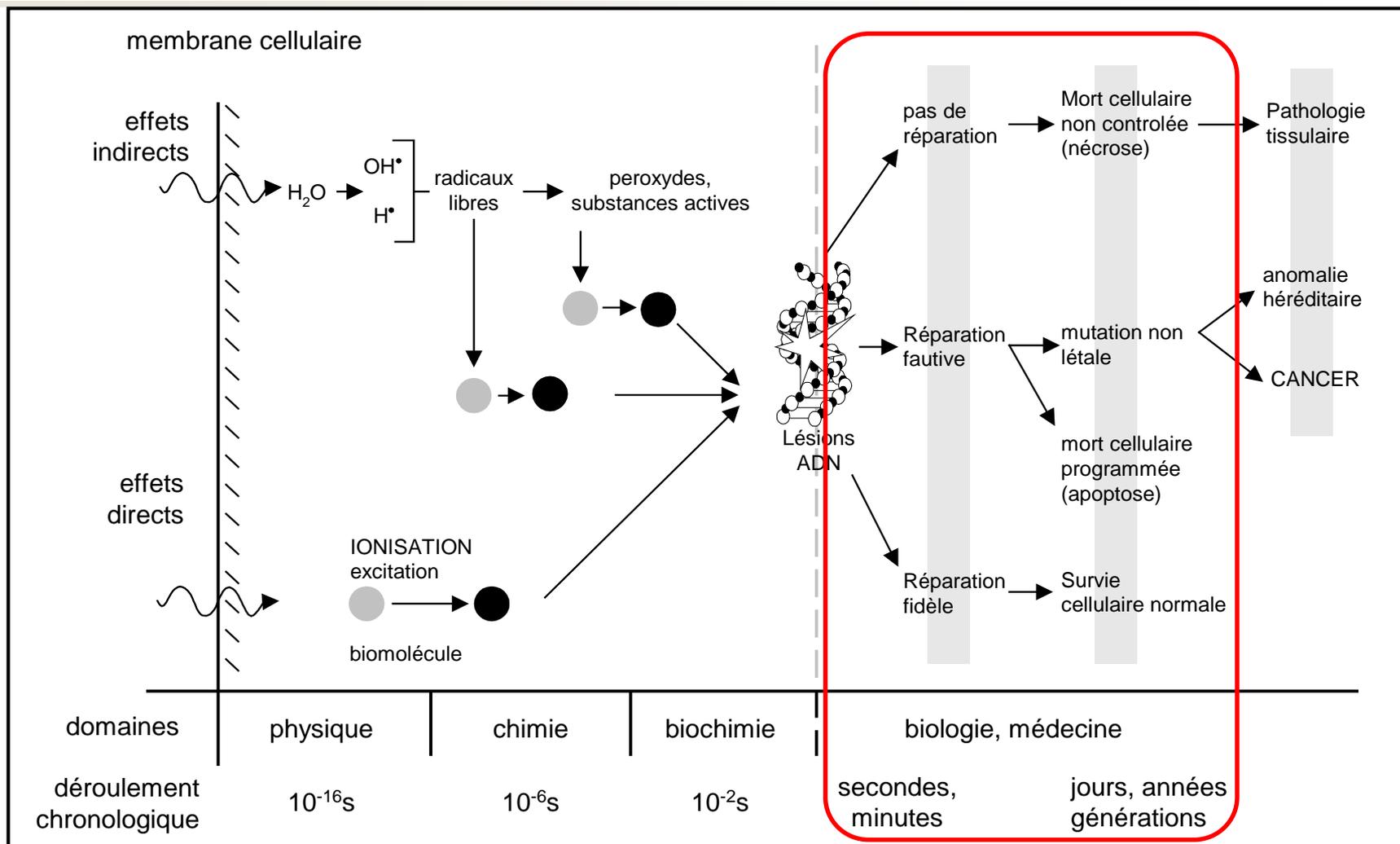
Type de dommages causés par la radiation:

- dommage à une base de l'ADN : 80 %
- rupture monobrin (SSB) : 20 %
- **rupture double brin (DSB) : 1 %**
- **LMDS (locally multiplied damaged site) : 0.3 %**

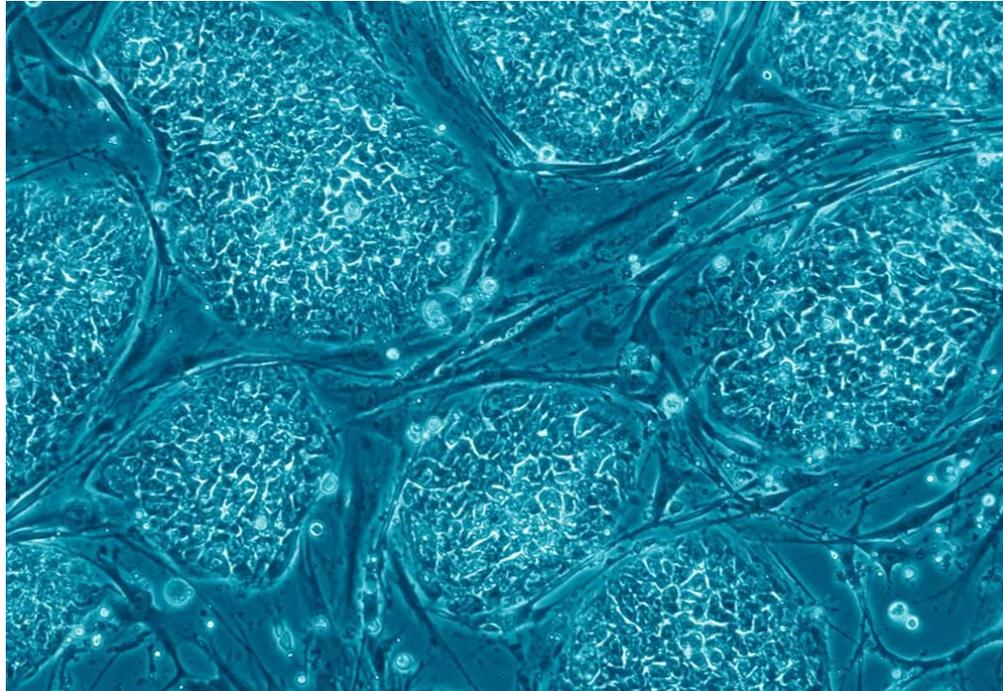
Mise en œuvre de nombreux gènes de réparation

- ATM et ATR détectent CSB et DSB
- Chk1 et Chk2 contrôle cycle cellulaire et prolifération
- p53 et BRCA1 contrôle intégrité génomique et apoptose

Effets sur l'organisme



Effets des radiations sur les cellules



Les effets au niveau cellulaire sont étudiés en culture :

Élaboration des théories du mécanisme des radiations ionisantes et évaluation de leurs effets

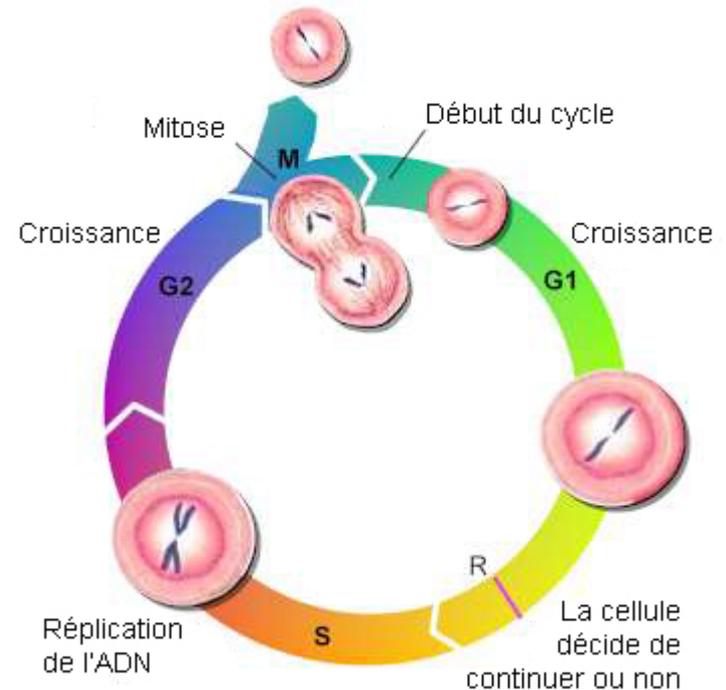
Loi de Bergonié et Tribondeau

Les cellules les plus radiosensibles sont :

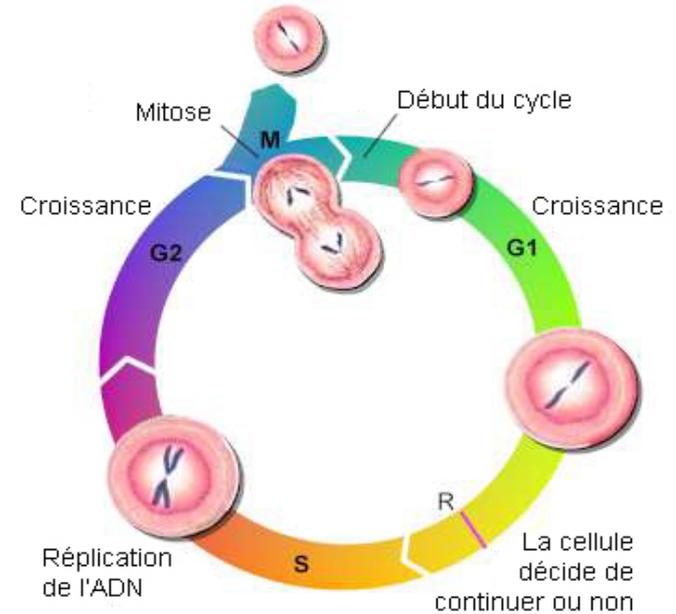
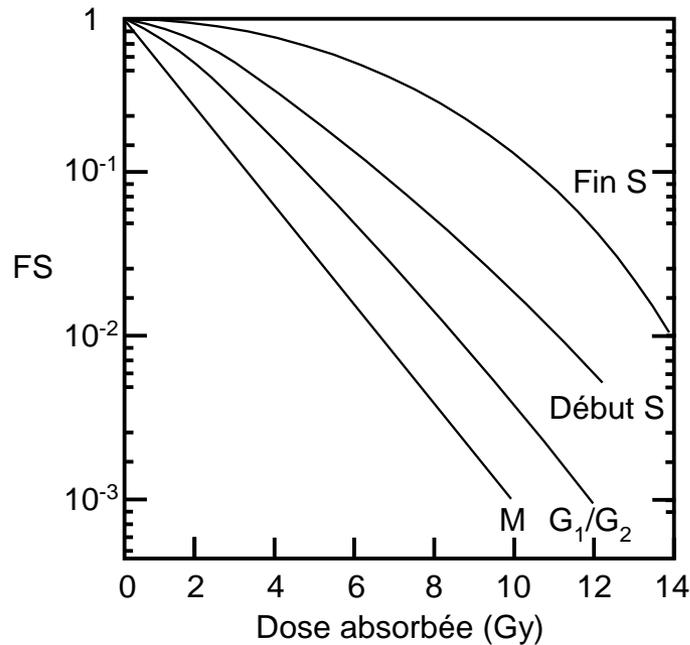
- celles dont le **rythme de multiplication est le plus élevé** (tissu hématopoïétique, couche basale de l'épiderme)
- celles qui ont un **long avenir** caryocinétique (cellules jeunes)
- celles qui sont les **moins différenciées** (tissu de l'embryon, cellules souches)

Cycle cellulaire et rayonnement

- Cycle cellulaire :
 - G1 (gap 1) : **croissance** et accumulation de réserves
 - S (synthèse) : **duplication du génome**
 - G2 (gap 2) : **réorganisation et contrôle** de l'intégrité du génome
 - M (mitose) : condensation et ségrégation des chromosomes et **séparation** des deux cellules (cytodiérèse)
- Irradiation :
 1. Provoque un ralentissement de la synthèse de l'ADN → allongement de la phase S
 2. Blocage temporaire des cellules en G2
 3. Retard à la mitose



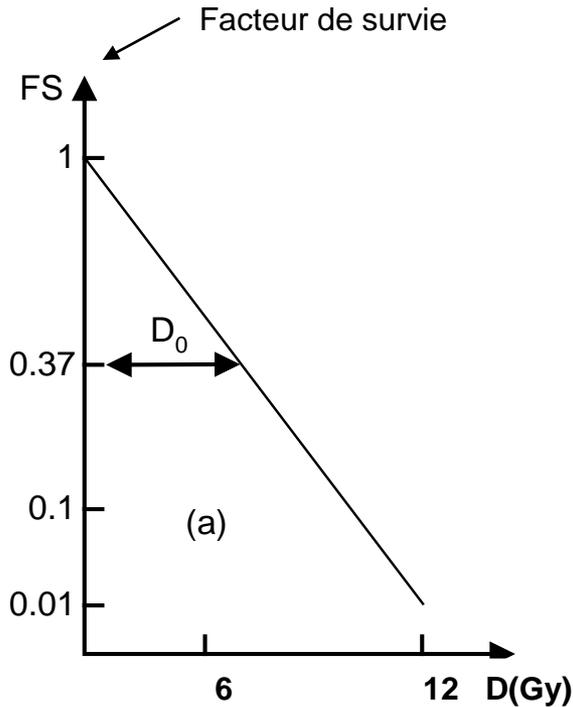
Cycle cellulaire et rayonnement



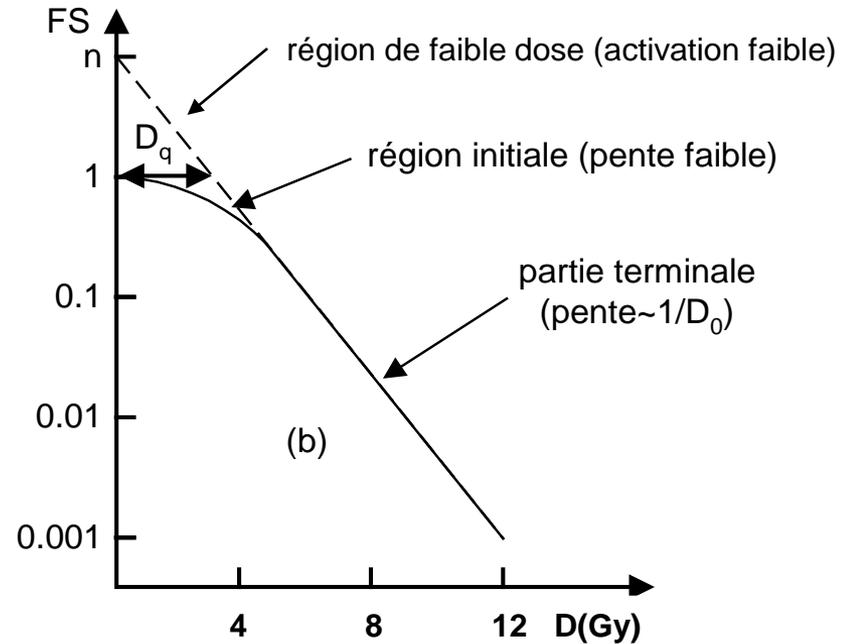
Radiosensibilité varie au cours des phases du cycle **d'un facteur 2 à 3** :

- sensibilité accrue à la mitose (M)
- sensibilité réduite durant la synthèse(S)

Effets cellulaires : courbe de survie



$$\ln(\text{FS}) = -\alpha D$$



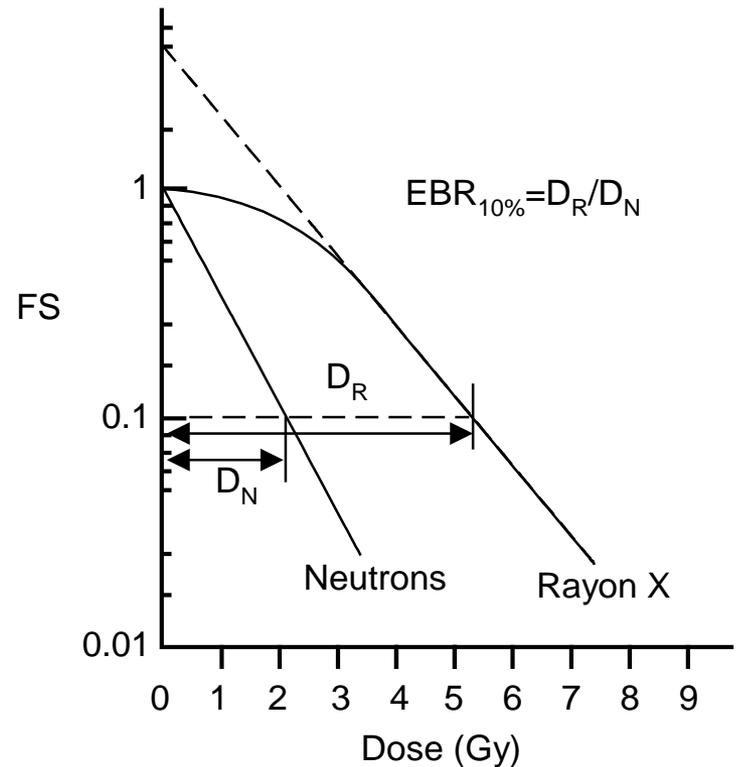
$$\ln(\text{FS}) = -\alpha D - \beta D^2$$

Epaulement

Mécanisme de réparation aux faibles doses

Modèle linéaire-quadratique et faibles doses

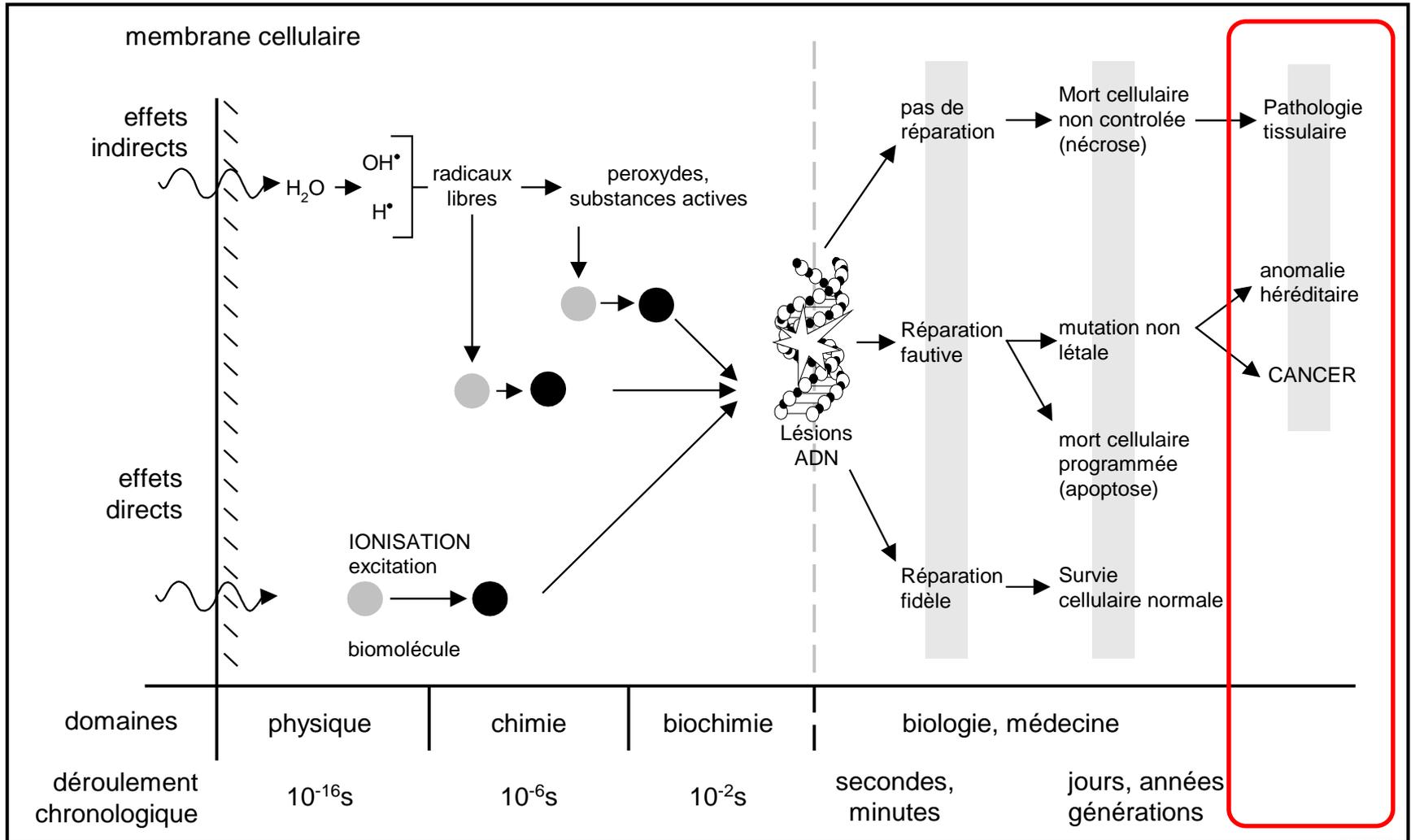
- L'épaulement caractérisé par le rapport α/β :
 - α : réponse tissulaire à **faible dose**
 - β : réponse tissulaire à **haute dose**
 - $\alpha > \beta$: l'effet de faible dose importants
 - $\alpha \sim \beta$: hyper-radiosensibilité
- α et β dépendent du **TEL** :
 - β faible pour TEL élevés



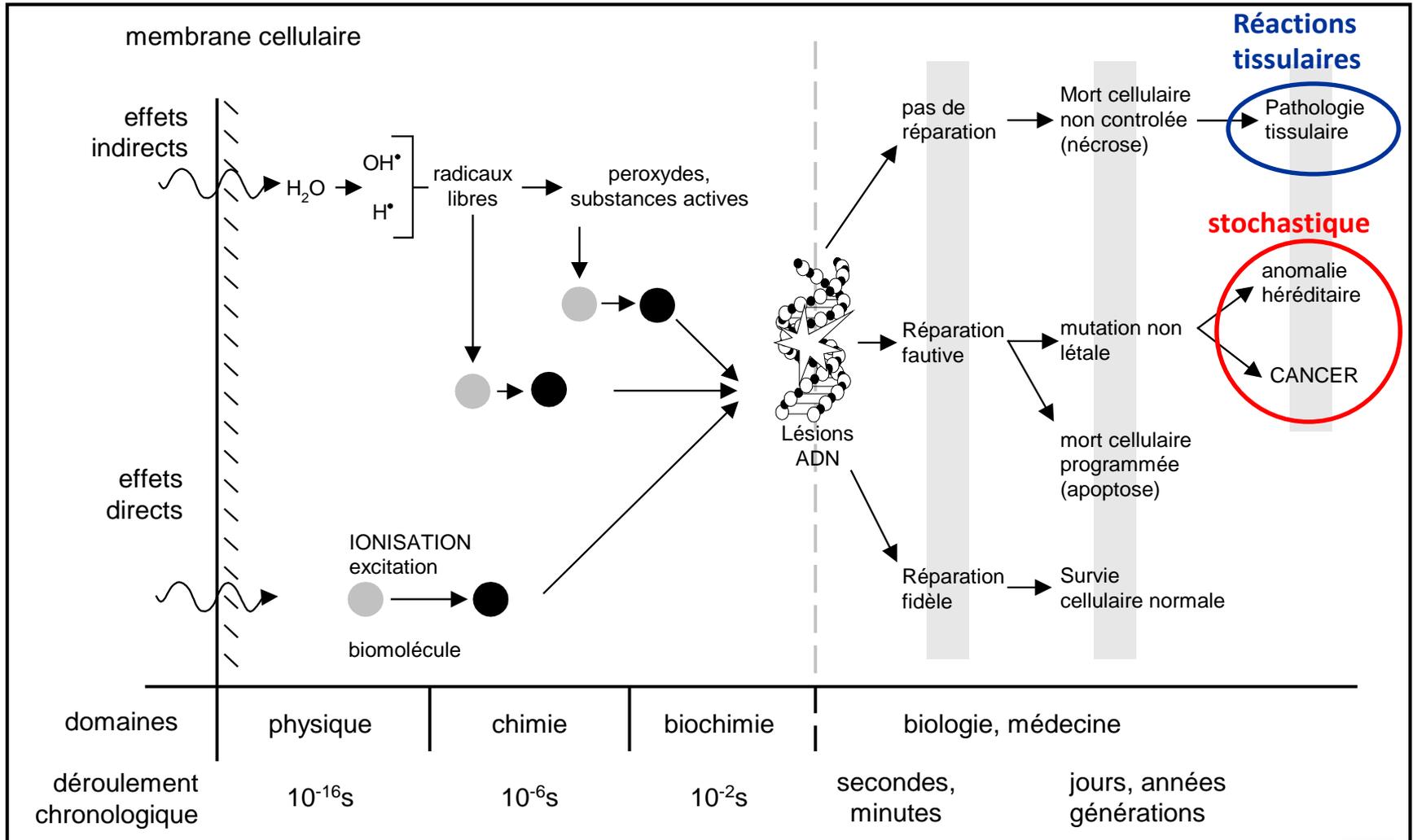
Résumé : Effets des radiations sur les cellules

- La radiosensibilité de la cellule :
 - varie en fonction du **cycle cellulaire** (facteur 2 - 3),
 - peut être exprimée par un modèle linéaire-quadratique
- Les cellules les plus radiosensibles :
 - **rythme de multiplication** le plus élevé
 - **long avenir**
 - **moins différenciées**

Effets sur l'organisme



Effets sur l'organisme

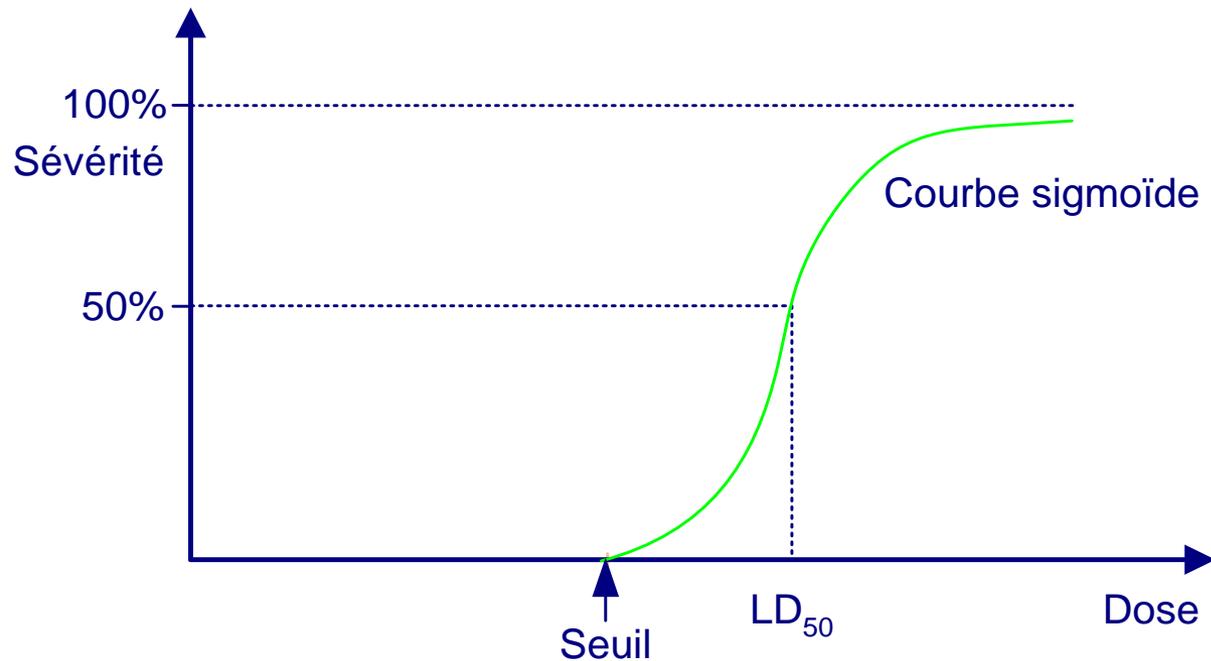


Classification des effets

Nature	Tissulaire	Stochastique
Mécanisme	Perte de fonctionnalité	Modification cellulaire
Délai	En général immédiat	Latence (env. 20 ans)
Effet d'une variation de dose	Sévérité de l'effet	Probabilité d'occurrence
Niveau de dose	Seulement à hautes doses	Déjà à faibles doses
Seuil	Démonstré	Pas démontré
Exemple	Érythème	Induction de cancer

Réaction tissulaire

- Relation entre la dose et la **sévérité** d'un effet déterministe mortel



- Seuil : dose en dessous de laquelle il n'y a pas d'effet (l'organisme gère et répare)
- LD₅₀ : dose semi-létale; 50 % des individus recevant une telle dose décèdent

Caractérisation des réactions tissulaires

Dose de seuil : ?

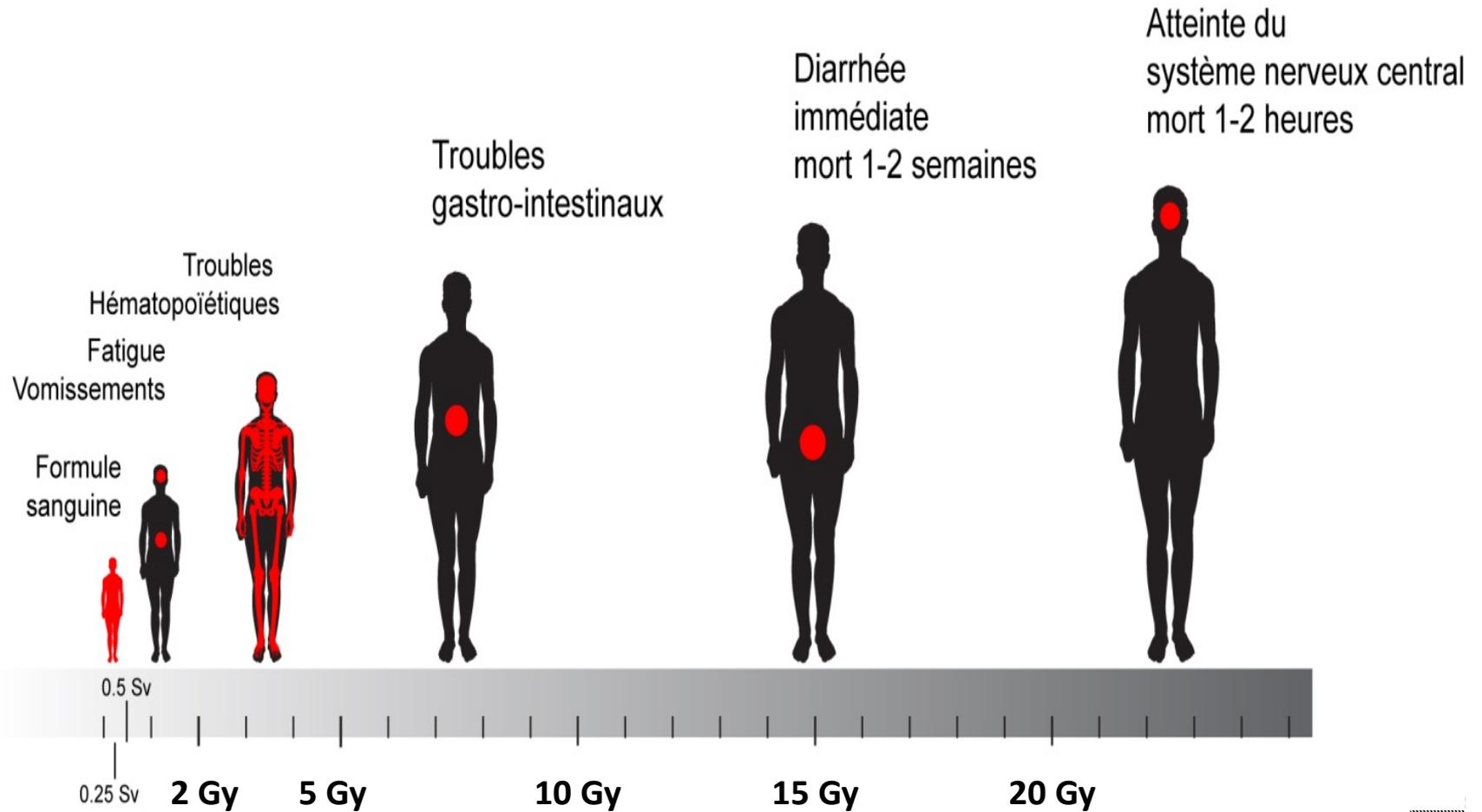
Dose semi-létale : ?

Caractérisation des réactions tissulaires

Dose de seuil : 0.5 Gy

Dose semi-létale : 5 Gy

Syndromes de l'irradiation aiguë



Syndromes de l'irradiation aiguë

Irradiation du **corps entier**

Organe ou tissu concerné	Domaine de dose [Sv]	Temps de latence [jours]	Temps de survie [jours]
Hématopoïétique	3 – 5	15 - 20	30 – 60
Gastro-intestinal	5 - 15	3 - 5	10 – 20
Système nerveux central	> 50	-	1 - 5

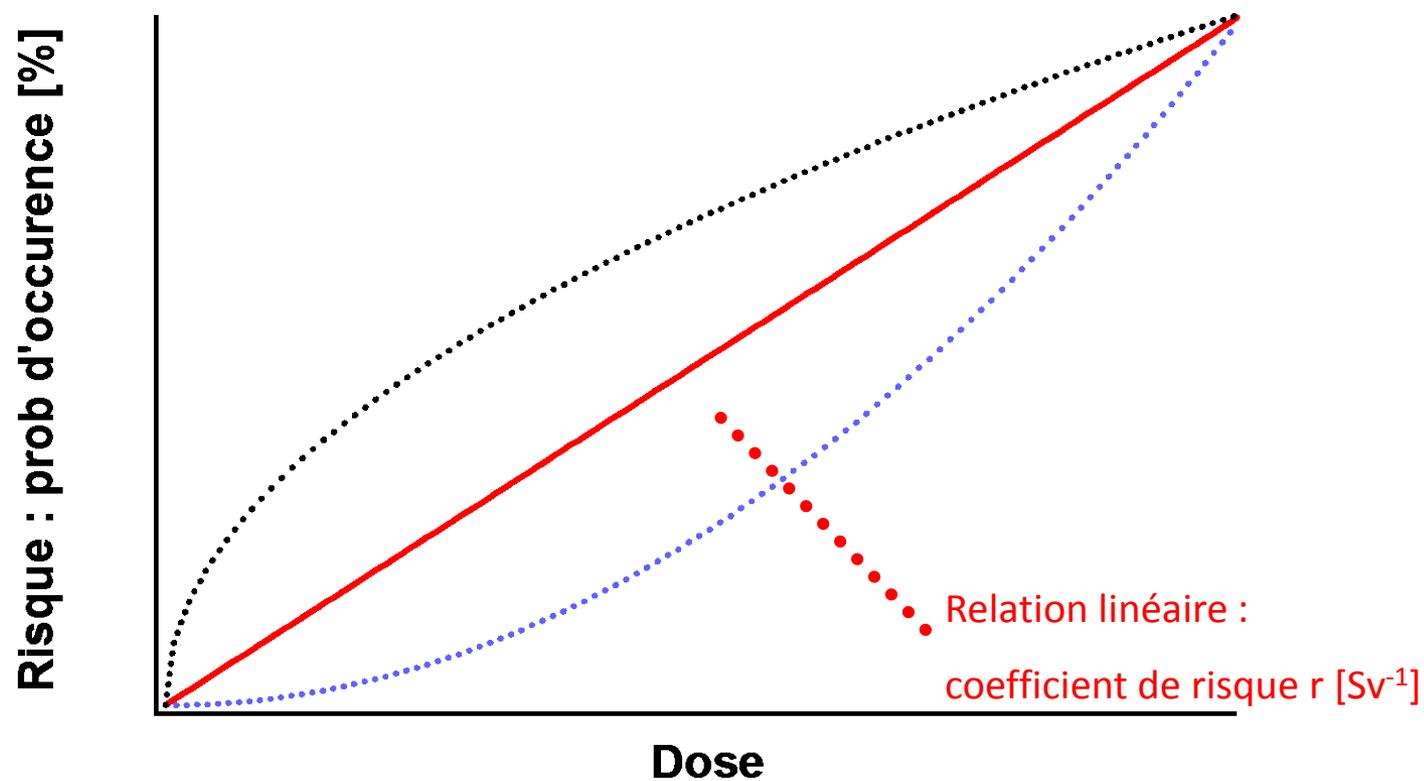
Irradiation aiguë de la peau

La peau est un tissu particulièrement radiosensible

- 3 – 5 Gy** : seuil de l'érythème et de la desquamation sèche
- 20 Gy** : desquamation humide (ampoules à 4 semaines)
- 50 Gy** : nécrose de la peau après 3 semaines

Effets stochastiques

Relation entre dose et **probabilité d'occurrence**



Mesure d'un effet stochastique

Facteur de risque : r

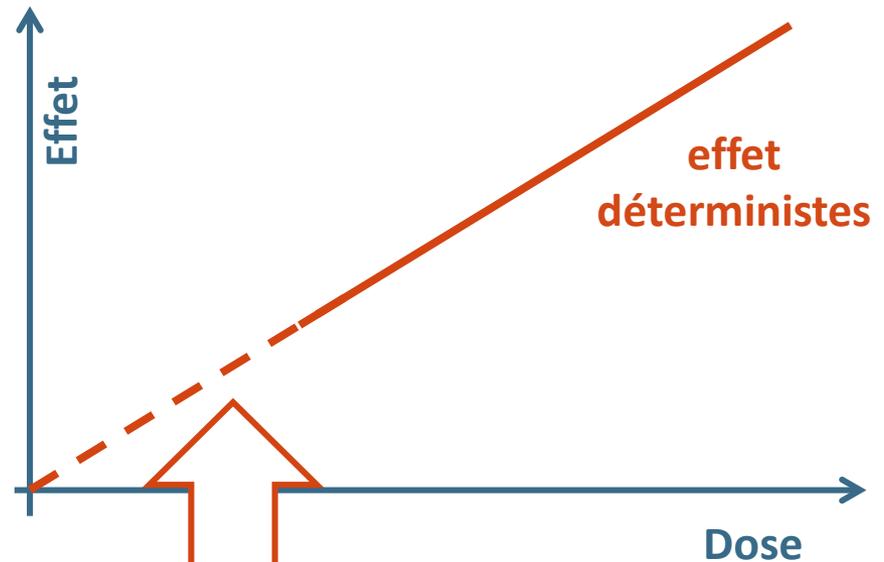
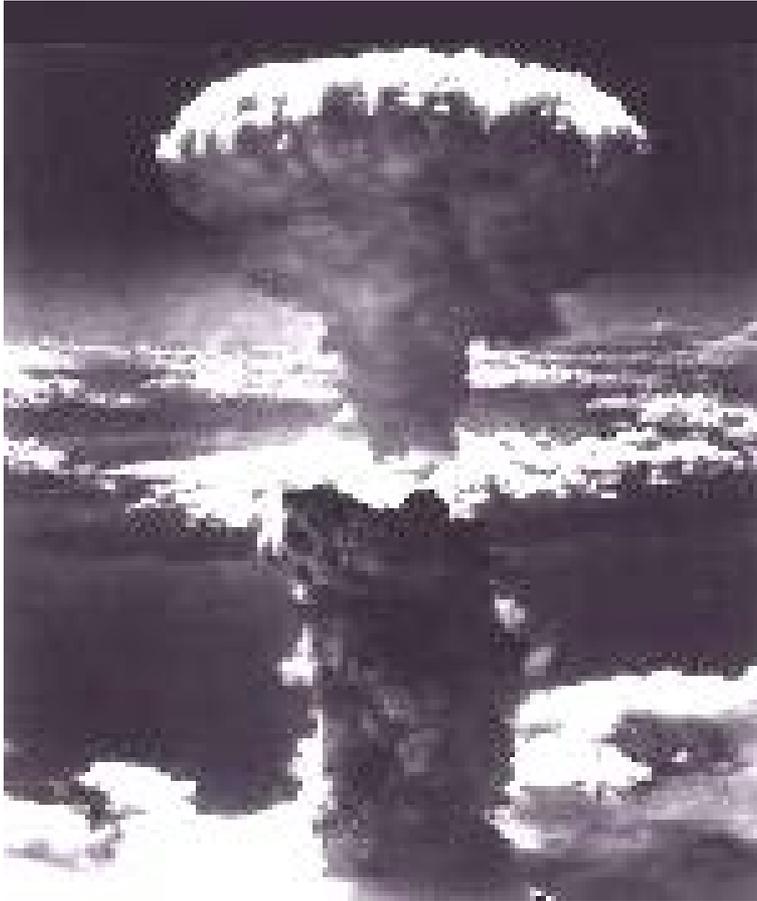
Taux d'effets supplémentaires par unité de la grandeur représentative de la cause

Exemple

Risque de décès lié à la circulation routière

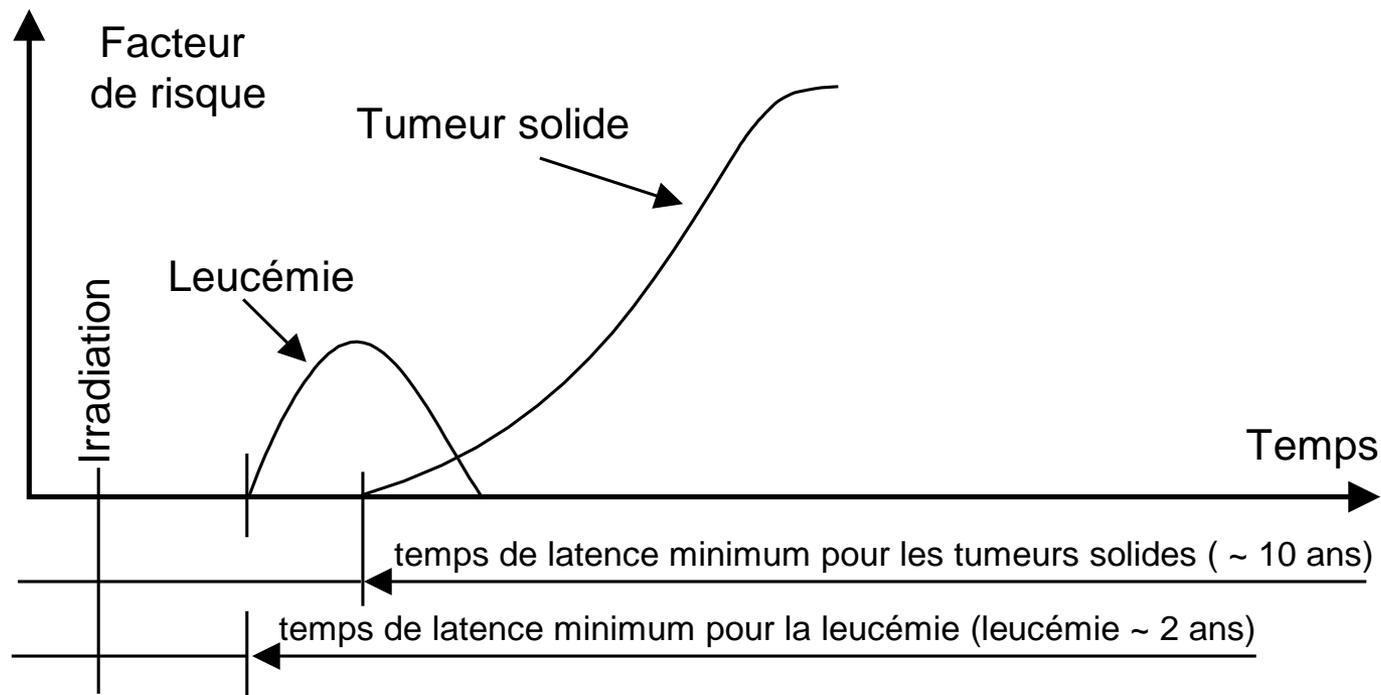
$$\begin{aligned} r &= \frac{\text{nbre de décès en Suisse sur la route}}{\text{nbre de km parcourus}} = \\ &= \frac{600}{7'000'000 \times 15'000} \cong 10^{-8} \text{ km}^{-1} \end{aligned}$$

Beaucoup d'informations
obtenues grâce aux survivants
d'Hiroshima et Nagasaki

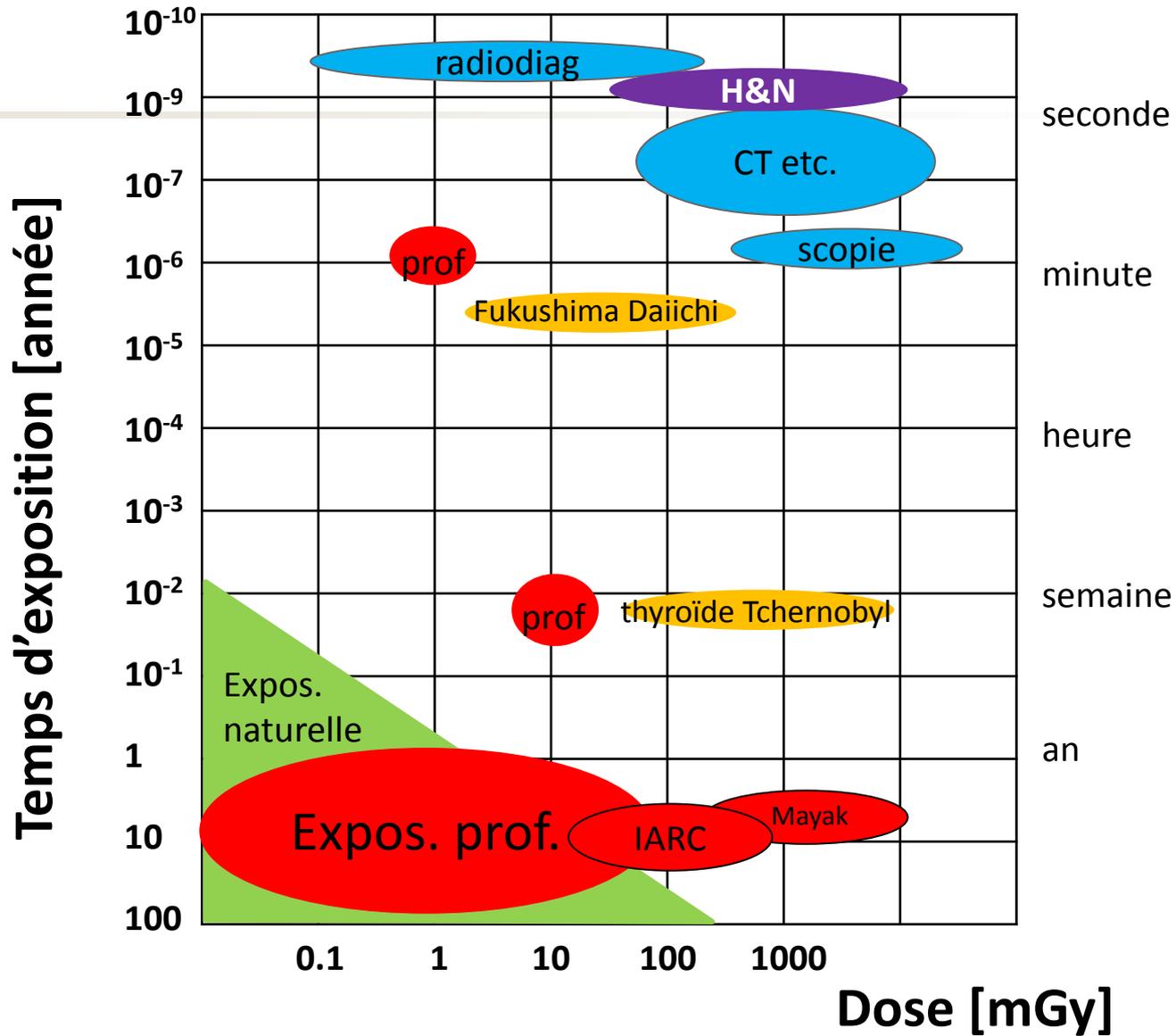


Linear non-threshold
hypothesis (LNT)

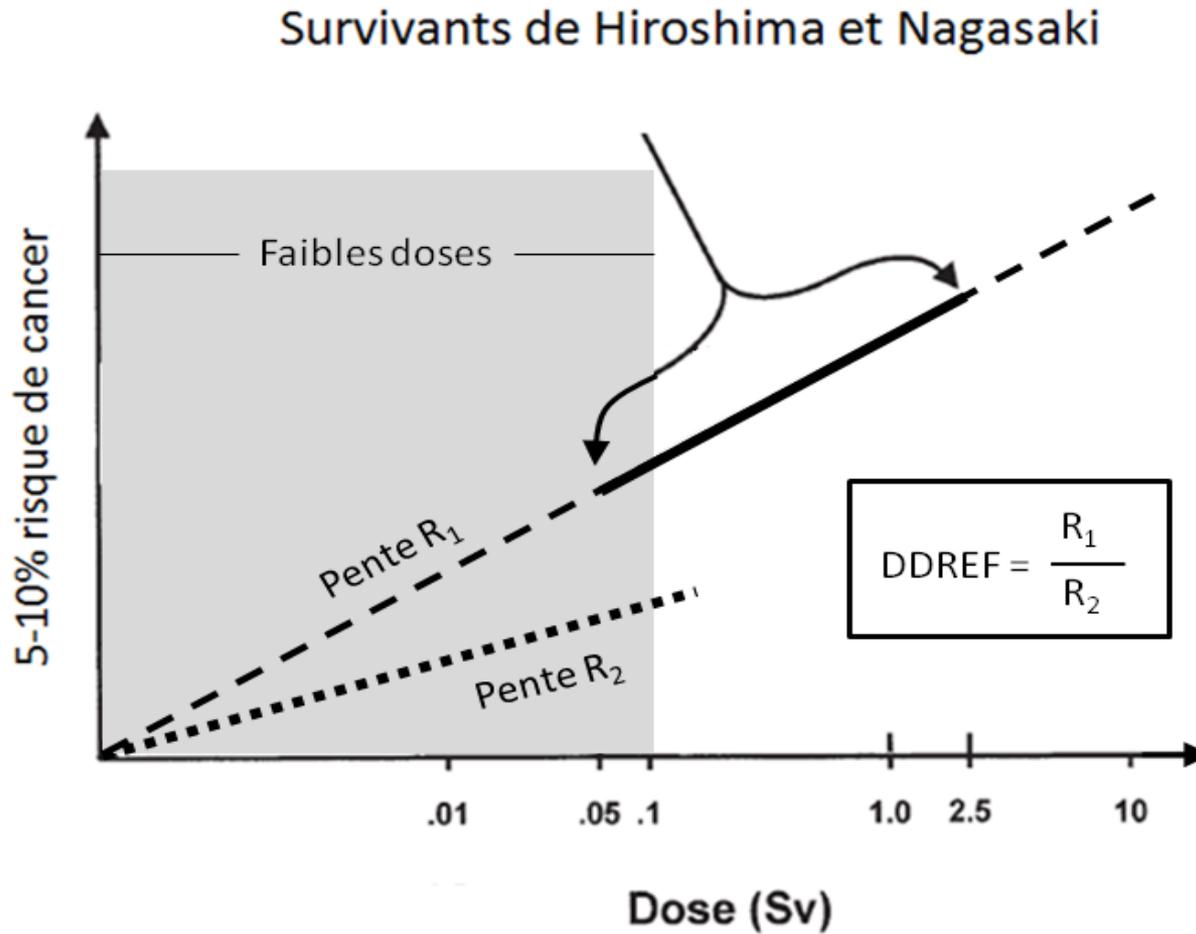
Temps de latence des cancers radioinduits



Est-ce que c'est raisonnable de
comparer les survivants de Hiroshima
& Nagasaki avec les conditions
d'irradiation d'aujourd'hui ?



Modèle linéaire sans seuil



Induction de cancer par les radiations

(cancérogenèse due à l'exposition aux radiations)

Base épidémiologique

Survivants d'Hiroshima & Nagasaki :

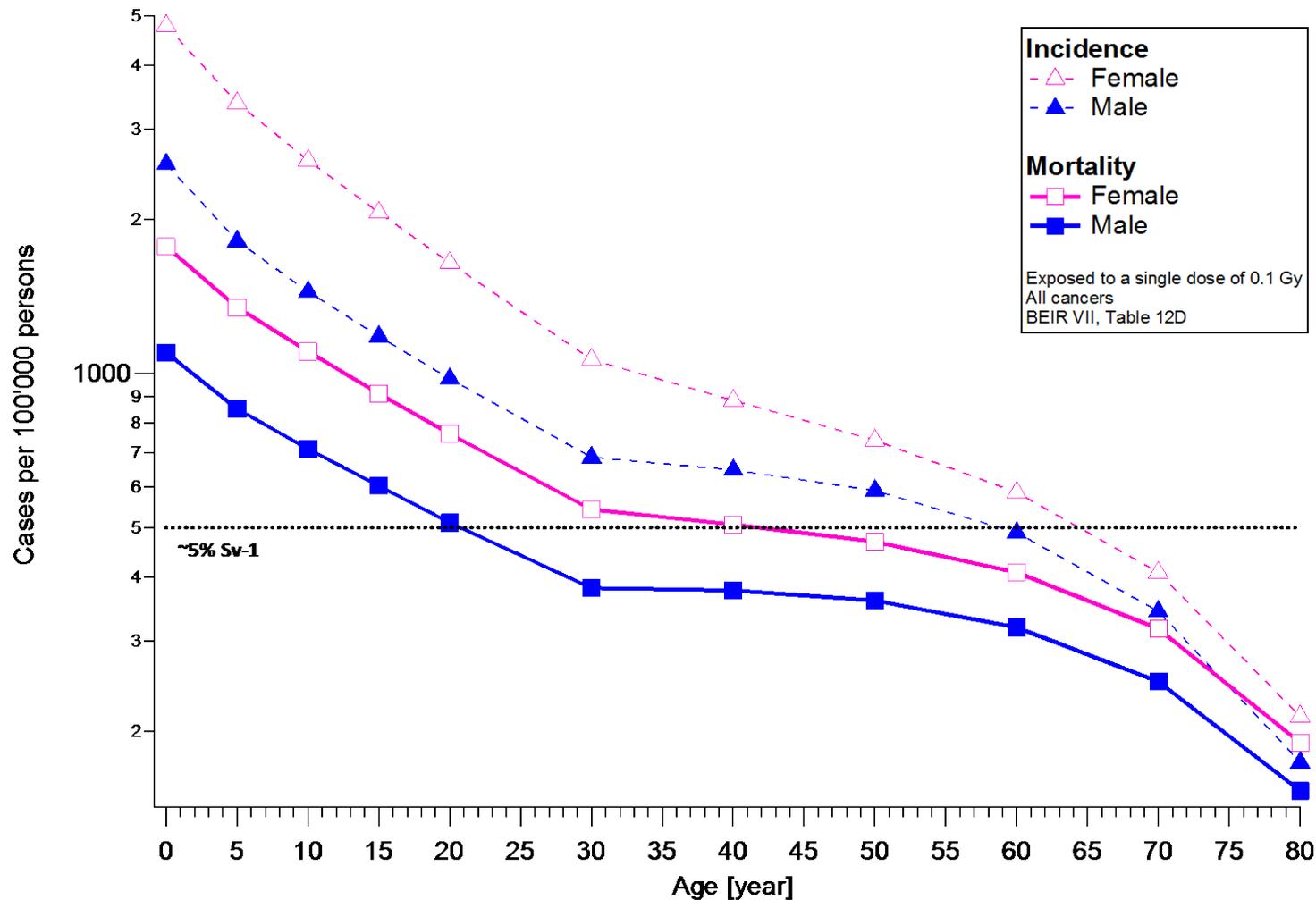
- De l'ordre de 1 Sv (irradiation aiguë)
- 86'572 survivants

Travailleurs exposés aux radiations :

- De l'ordre de 0.1 Sv (irradiation chronique)
- 95'673 personnes

⇒ **Facteur de risque : 5% Sv⁻¹**

Probabilité de développer un cancer après une irradiation du **corps entier** avec une dose absorbée de **100 mGy**



Induction effets héréditaires

Base :

- Expérimentation animale

Effet :

- Malformation non-spécifique

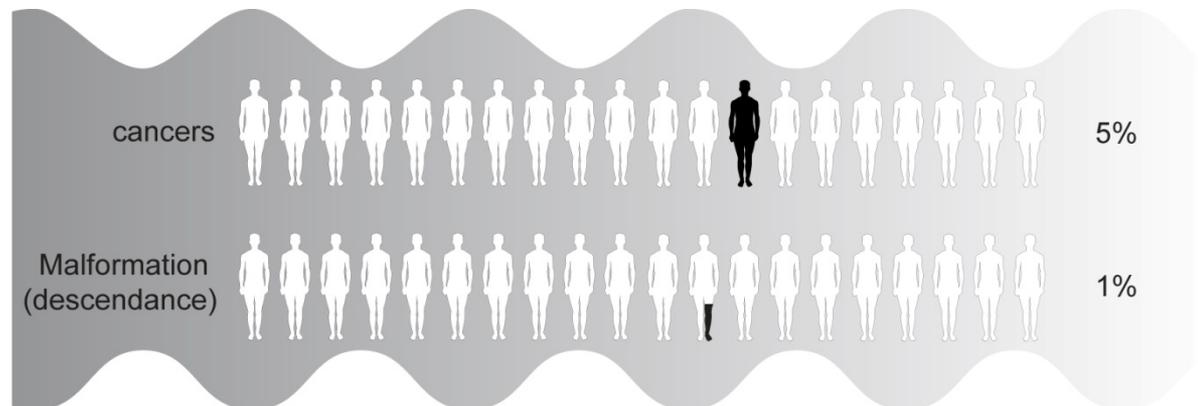
Dose de doublement :

- 1 Sv

Facteur de risque : 1% Sv⁻¹

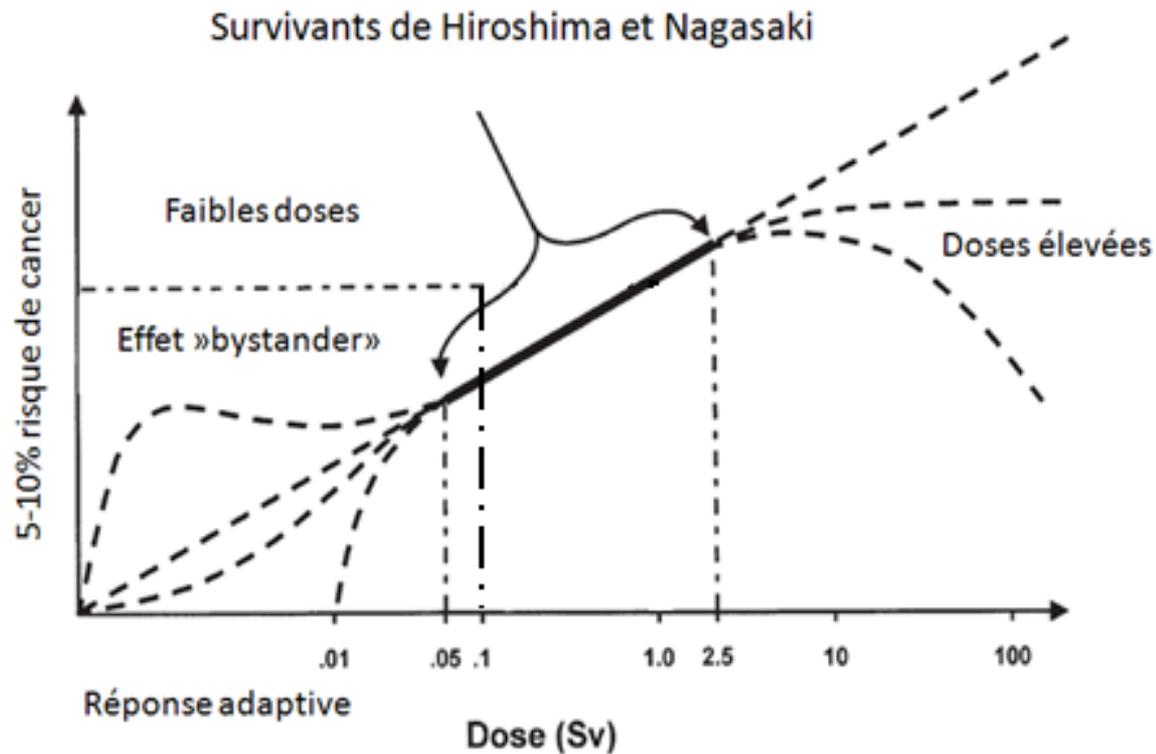
Effets stochastiques et risques

1 Sv



	Facteur de risque par mSv
• Cancers	5 sur 100'000
• Effets héréditaires	1 sur 100'000

Controverse sur le risque radiologique



Autres affections que le cancer

Affections cardiaques

Attaques cérébrales

Affections digestives et respiratoires

L'ICRP recommande de considérer un
seuil à 100 mSv (effet déterministe)

Exposition prénatale

- **Echec de la fixation utérine**
 - 0-3 semaines dès la conception
 - action « tout ou rien »
- **Malformations**
 - de 3 semaines à 2 mois
 - seuil : 0.1 Gy
- **Induction de cancer**
 - de 3 semaines à la naissance
 - **R ~ 10-15 % Sv⁻¹**
- **Réduction du QI**
 - 8 à 15^{ème} semaine
 - (16-25^{ème} semaine : 4x moins)
 - seuil : 0.3 Gy
 - 30 points par Gy



Notion de détriment

Définition – CIRP 107:

Détriment dû aux rayonnements

Concept utilisé pour mesurer les effets nuisibles pour la santé de l'exposition aux rayonnements dans différentes parties du corps. Il est défini par la Commission en fonction de plusieurs facteurs, comprenant l'incidence des cancers ou des effets héréditaires causés par les rayonnements, la mortalité dans ces conditions, la qualité de vie et les années de vie perdues en raison de ces conditions.

Gilet :
change la
probabilité
d'avoir un
accident



Casque :
change la
gravité d'un
accident

détriment = **probabilité** x **gravité**

Notion de détriment

- Cette notion est introduite pour quantifier les effets néfastes des radiations et est utilisé en radioprotection. **Les effets déterministes ne sont pas pris en compte.**
- La notion de détriment est une combinaison de la **probabilité d'incidence** et de la **gravité des effets**, prenant en compte :
 - probabilité d'un cancer mortel
 - probabilité pondérée d'un cancer non mortel
 - probabilité pondérée d'effets héréditaires graves

Notion de détriment

Les effets aléatoires ou stochastiques (les cancers) qui surviennent apparemment au hasard dans un groupe irradié (selon l'irradiation entre **5% et 10% pour 1 Sv**). Rien ne distingue, sur le plan clinique, les cancers spontanés des cancers radio-induits.

La CIPR a limité dans sa publication 60 (1991) la notion de détriment au préjudice sur la santé, excluant ainsi les autres formes de préjudice (social, économique, environnemental, etc.)

Les **deux modèles**, ERR (excès de risque relatif) et ERA (excès de risque absolu), ont été **développés pour les cancers** de l'œsophage, l'estomac, le côlon, le foie, le poumon, le sein, l'ovaire, la vessie, la thyroïde et la leucémie.

Les données relatives aux autres tissus et organes humains sont insuffisantes pour estimer spécifiquement l'importance du risque des rayonnements. Ces tissus et organes ont été regroupés dans la catégorie « les tissus restants ».

Coefficients nominaux de risque

CIRP 107

<i>Tissu</i>	<i>Coefficients de risque nominal (cas pour 10 000 personnes par Sv)</i>	<i>Létalité</i>	<i>Risque nominal ajusté pour la létalité et la qualité de vie¹</i>	<i>Perte relative de vie sans cancer²</i>	<i>Détriment (par rapport à la colonne 1)³</i>	<i>Détriment relatif</i>
Œsophage	15	0.93	15.1	0.87	13.1	0.023
Estomac	79	0.83	77.0	0.88	67.7	0.118
Côlon	65	0.48	49.4	0.97	47.9	0.083
Foie	30	0.95	30.2	0.88	26.6	0.046
Poumon	114	0.89	112.9	0.80	90.3	0.157
Os	7	0.45	5.1	1.00	5.1	0.009
Peau	1000	0.002	4.0	1.00	4.0	0.007
Sein	112	0.29	61.9	1.29	79.8	0.139
Ovaire	11	0.57	8.8	1.12	9.9	0.017
Vessie	43	0.29	23.5	0.71	16.7	0.029
Thyroïde	33	0.07	9.8	1.29	12.7	0.022
Moelle osseuse	42	0.67	37.7	1.63	61.5	0.107
Autres solides	144	0.49	110.2	1.03	113.5	0.198
Gonades*	20	0.80	19.3	1.32	25.4	0.044
TOTAL	1715		565		574	1.000

*effets héréditaires

¹ Définie comme $R^* q + R^* (1 - q)^* ((1 - q_{\min}) q + q_{\min})$, où R est le coefficient de risque nominal, q est la fraction de mortalité, et $(1 - q_{\min}) q + q_{\min}$ est le poids donné aux cancers non mortels. Ici, q_{\min} est le poids minimal pour les cancers non mortels

² Définie comme la durée de vie moyenne perdue du fait de la maladie par rapport à l'espérance de vie normale, exprimée par rapport à la moyenne pour tous les cancers.

³ Définie comme la multiplication du risque nominal ajusté pour la létalité et la qualité de vie avec la perte relative de vie sans cancer.

Dose effective E

La contribution relative des organes au détriment total permet de déterminer les facteurs de pondération tissulaires : w_T

$$E = \sum_T w_T H_T = [Sv]$$

ICRP 103

Organe ou tissu	w_T
Moelle osseuse, colon, poumon, estomac, sein, reste ⁴	0.12
Gonades	0.08
Vessie, foie, œsophage, thyroïde	0.04
Surfaces des os, cerveau, glandes salivaires, peau	0.01
Total	

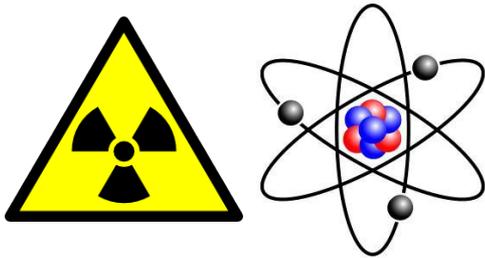
Calcul du détriment global

<i>Population exposée</i>	<i>Cancer</i>		<i>Effets héréditaires</i>		<i>Total</i>	
	CIPR 103	CIPR 60	CIPR 103	CIPR 60	CIPR 103	CIPR 60
Travailleurs adultes	4.1	4.8	0.1	0.8	4.2	5.6
Population entière	5.5	6.0	0.2	1.3	5.7	7.3

% par Sv

Résumé: effets des radiations I

Radiations ionisantes



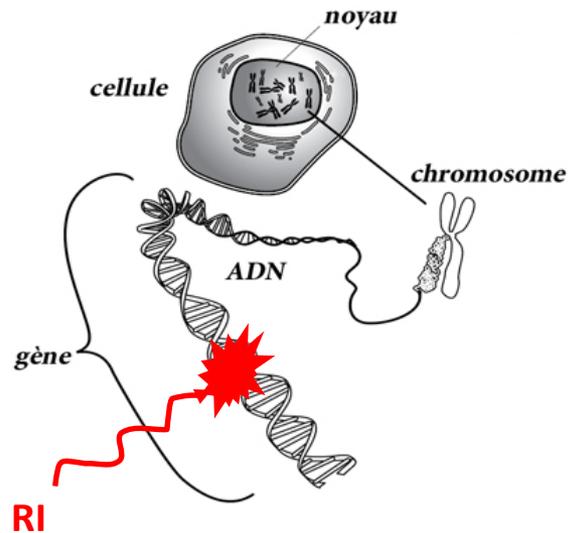
1. Ondes e.m.

- rayons X
- rayons γ

2. Particules

- particules β
- particules α
- neutrons
- protons
- ...

Lésions de l'ADN



Ionisation des atomes de la cellule (ADN)

Pas de réparation

- Mort de la cellule
- **Réactions tissulaires**
 - Brûlure, cataracte, stérilité, mort, ...

Réparation fautive

- Mutations non létales
- Effets **stochastiques**
 - CANCER
 - Anomalie héréditaire

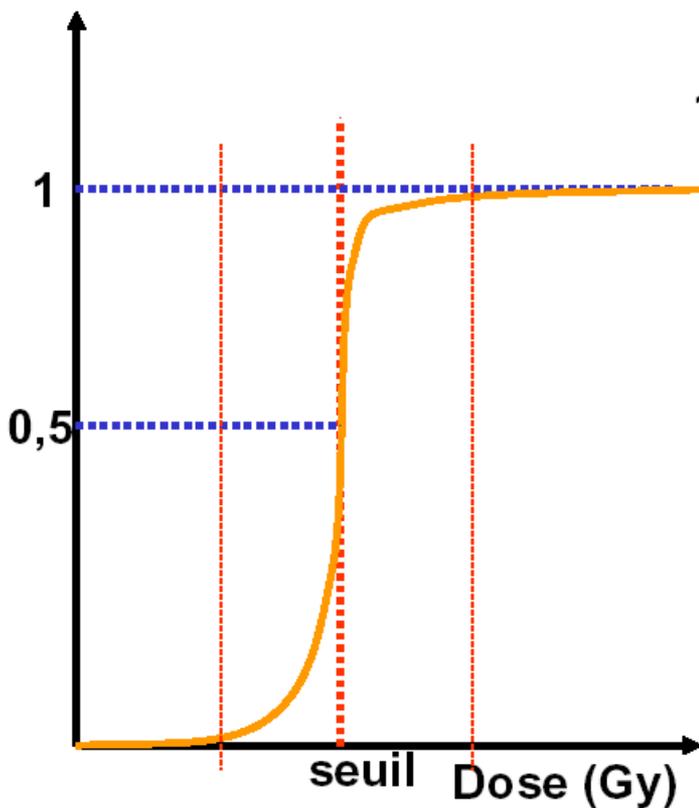
Réparation fidèle

- Survie de la cellule
- Pas d'effet

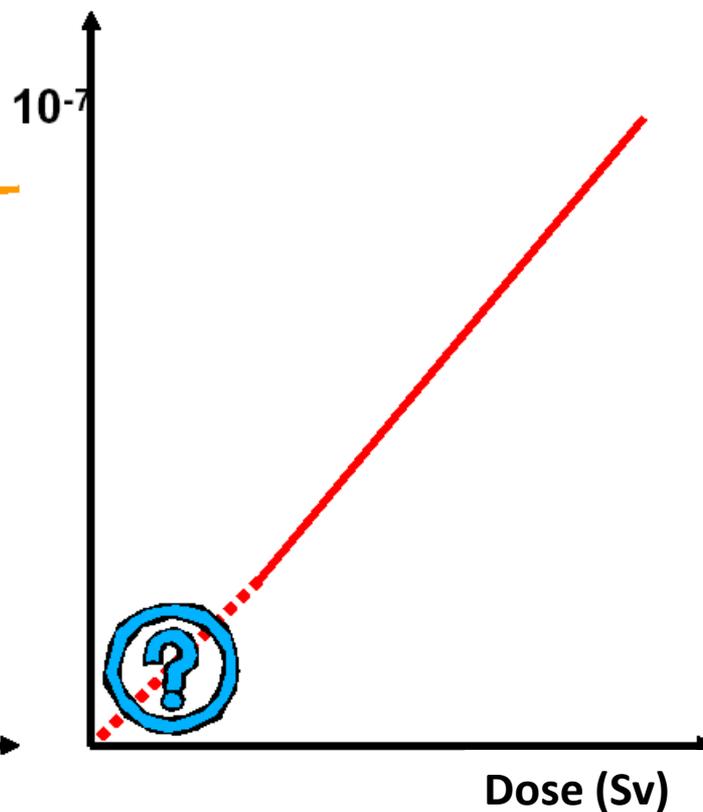
Résumé: effets des radiations II

Réactions tissulaires

Effet déterministe



Effet stochastique



Objectifs du cours :

- Décrire les **actions biologiques** des rayonnements ionisants
- Expliquer les **effets déterministes** (tissulaires) et **stochastiques**
- Evaluer les **effets attendus suite à une exposition** externe ou interne dans une situation donnée

Exercices

1. Indiquer les principales étapes de l'action biologique des radiations.
2. Indiquer les effets déterministes chez un individu recevant une dose au corps entier de 0,1 Gy.
3. Indiquer l'effet d'une dose au corps entier de 10 Gy chez un individu en l'absence de traitement subséquent.
4. On admet qu'un effet (hypothétique) a une probabilité de 10 % par Sv à haute dose. Calculer le nombre d'effets induits dans une population de 7 millions d'habitants (population suisse) recevant en moyenne une dose de 1 mSv, en admettant un DDREF de 5 pour cet effet spécifique.
5. Calculer pour la population suisse le nombre annuel de cancers induits par l'irradiation naturelle dont la dose effective moyenne est estimée à 4 mSv par an.
6. Quels effets des radiations sont considérés dans l'évaluation du détriment ?
7. Calculer la dose effective dans la situation suivante :

dose aux gonades	: 2 mSv
dose à la moelle osseuse	: 1 mSv
dose à la thyroïde	: 5 mSv
dose aux autres organes	: 0 mSv.