Objectif général n°1 : Reconnaitre les composants des risques inhérents aux RI dans le domaine médical

MODULE 1.1

THOMAS LEMOINE,

INGENIEUR RADIOPROTECTION

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

Objectif pédagogique :
Identifier les risques associés aux RI

Effets biologiques des rayonnements ionisants sur l'homme

THOMAS LEMOINE

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

Introduction

La majorité des formations sur le thème de la radioprotection commencent par le chapitre des « effets biologiques » !

Parce que les rayonnements utilisés sont « ionisants » (échelle microscopique), quelle que soit la dose délivrée.

Parce que les effets de ces rayonnements sur l'homme sont bien connus à forte dose, et incontestables (échelle macroscopique).

Sommaire

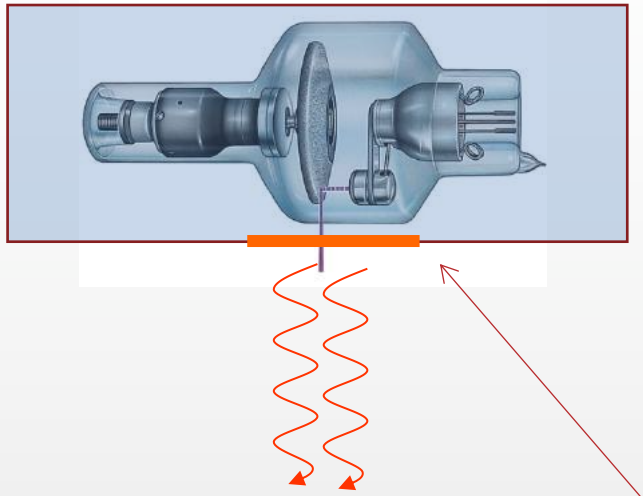
1/ Des rayonnements qui créent des ions
2/ Les réactions biochimiques et moléculaires
3/ Les effets déterministes
4/ Les effets stochastiques
5/ Quelques résultats d'études épidémiologiques

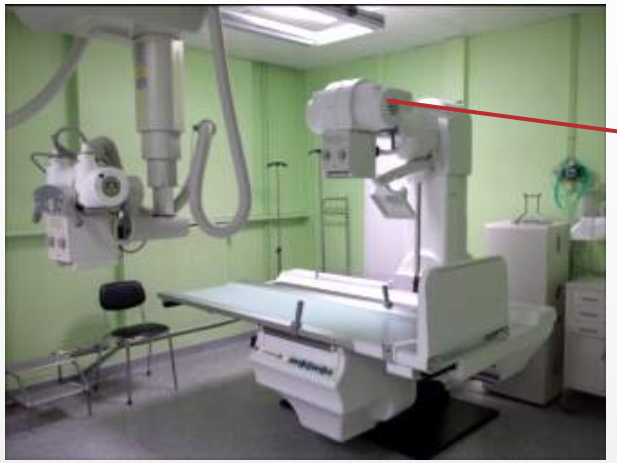
Sommaire

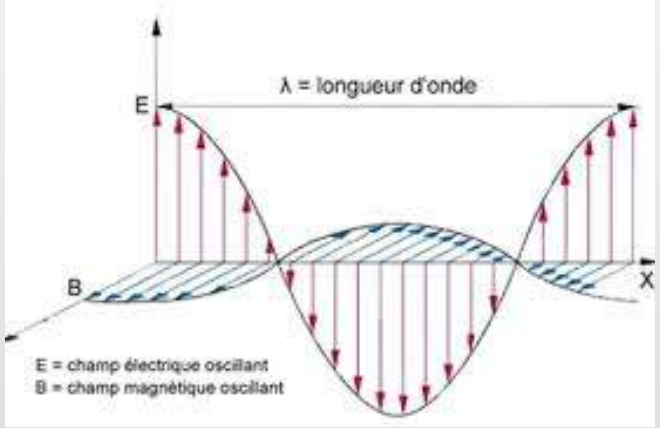
1/ Des rayonnements qui créent des ions
2/ Les réactions biochimiques et moléculaires
3/ Les effets déterministes
4/ Les effets stochastiques
5/ Quelques résultats d'études épidémiologiques

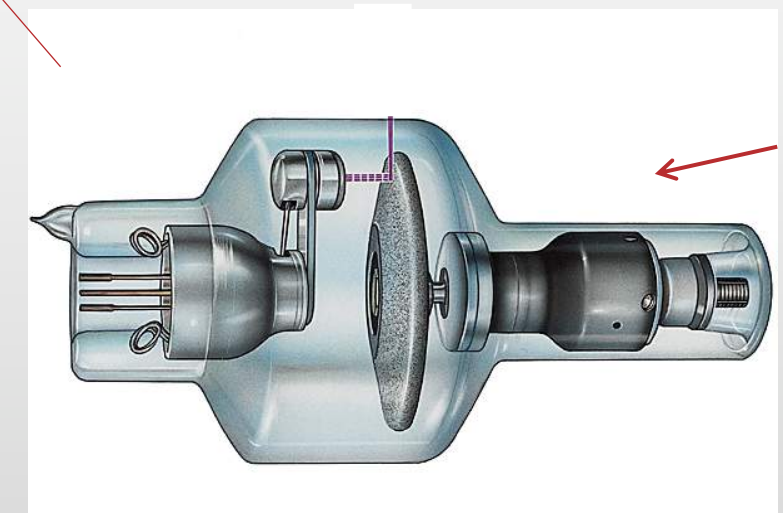
FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

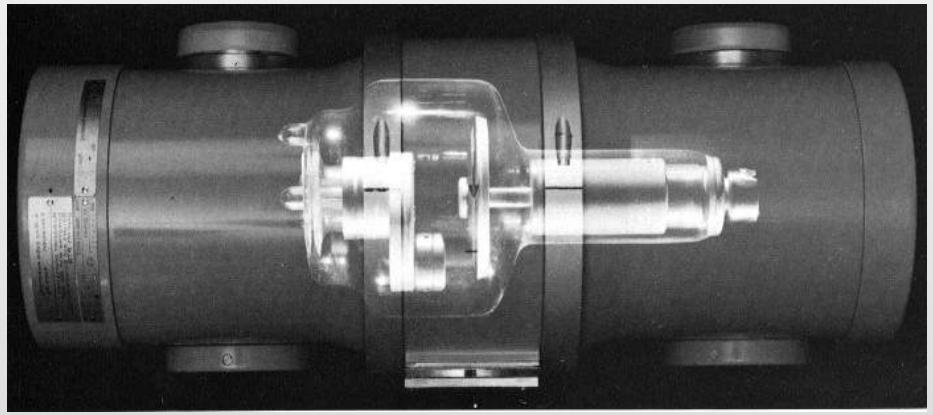
1/ Des rayonnements qui créent des ions



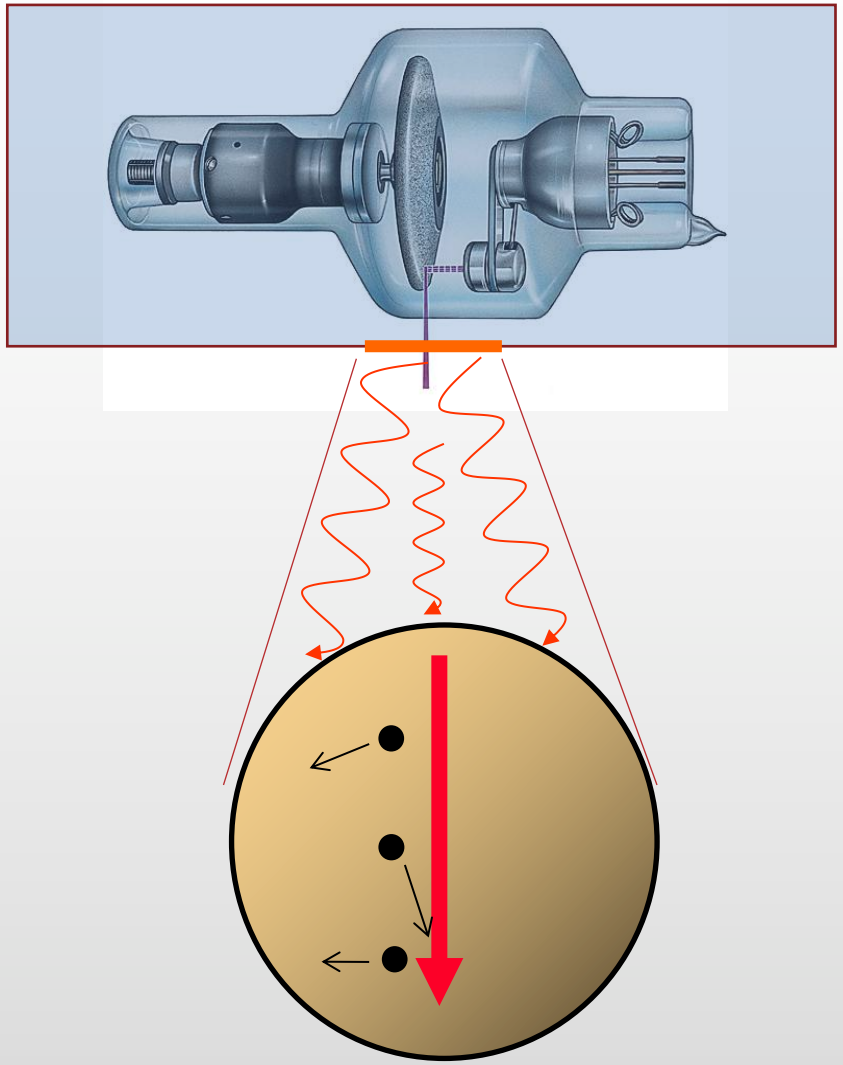


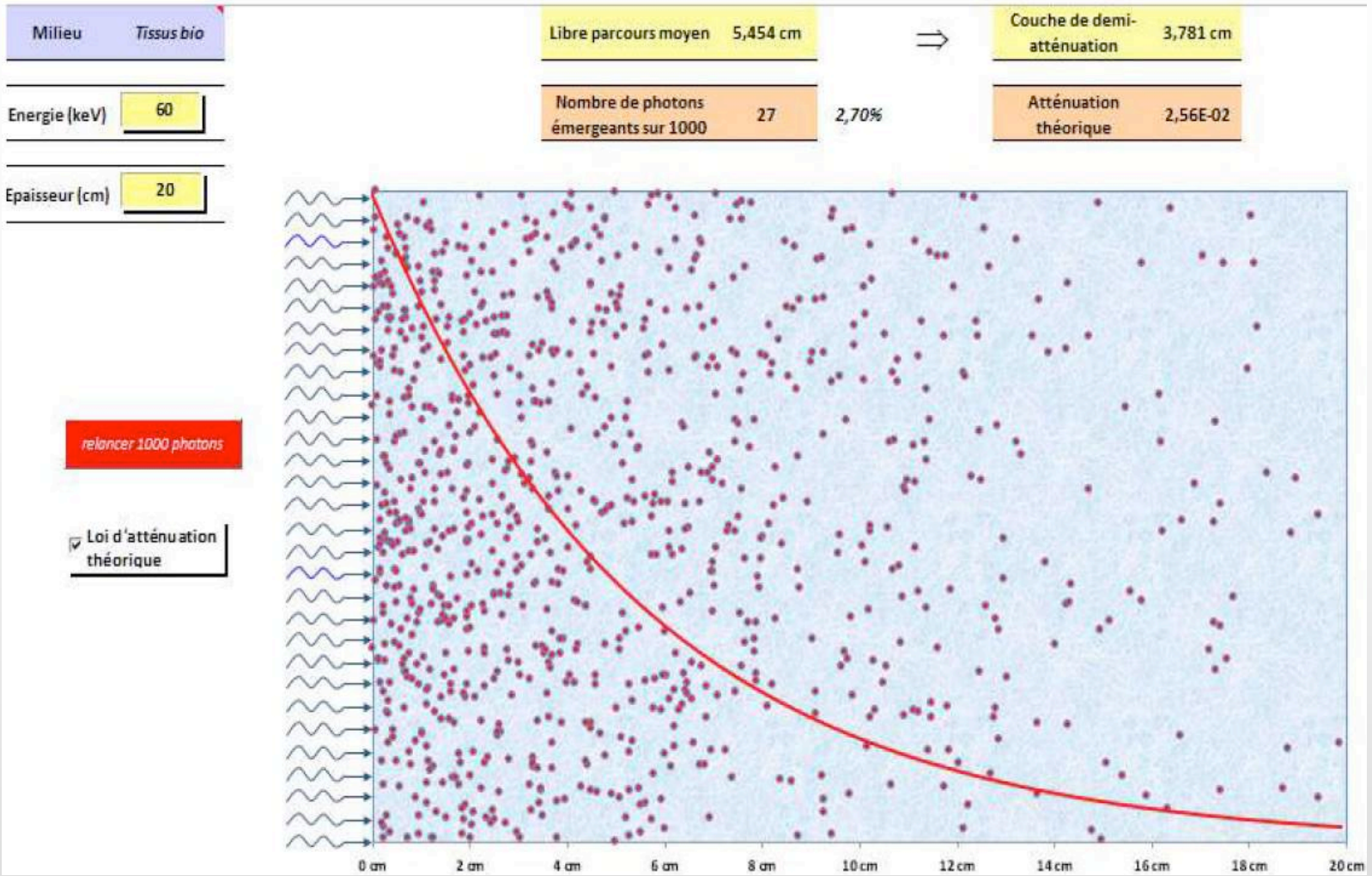






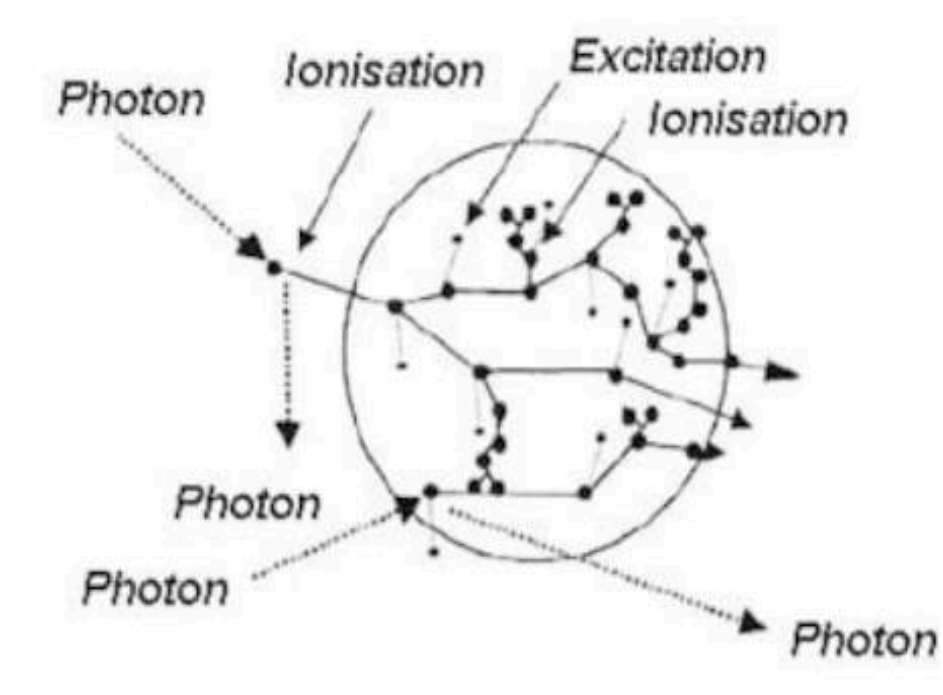
1/ Des rayonnements qui créent des ions

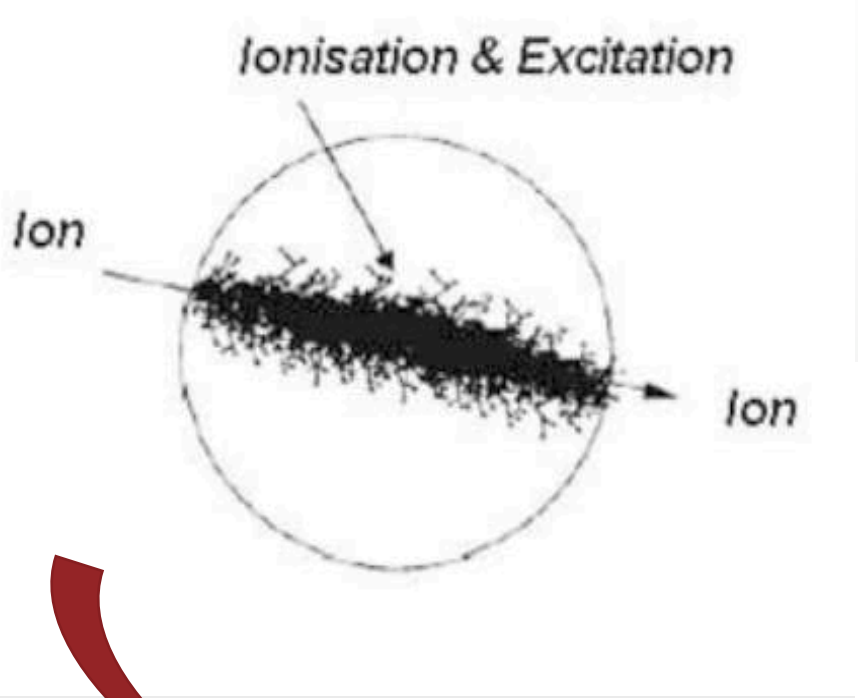




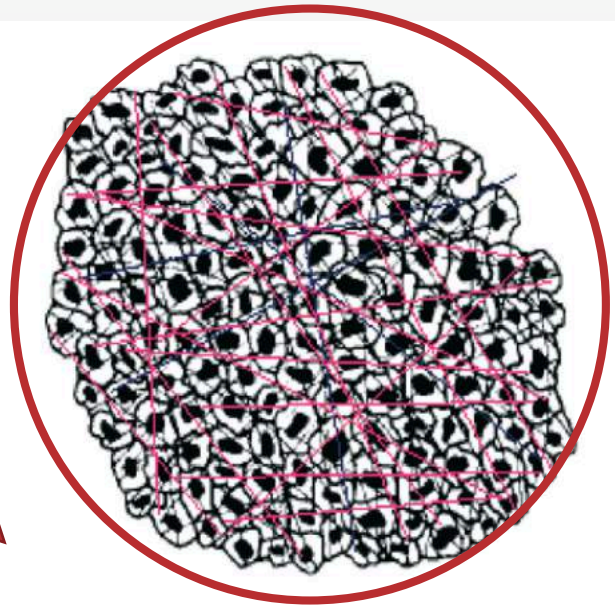
Dosimex®

1/ Des rayonnements qui créent des ions

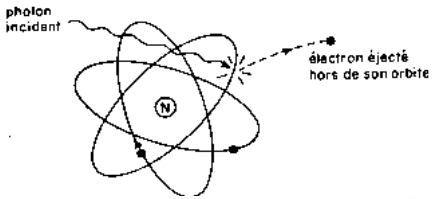




Source : Physique appliquée à l'exposition externe



Photons de 1 MeV

Phénomènes Physiques	10^{-15} s 
Phénomènes Physico-chimiques	10^{-12} s
Phénomènes Biochimiques	
Effets Moléculaires	10^{-6} s
Effets cellulaires	Qq h à qq jours
Effets tissulaires	Qq h à plusieurs années
Effets pathologiques	

Sommaire

1/ Des rayonnements qui créent des ions
2/ Les réactions biochimiques et moléculaires
3/ Les effets déterministes
4/ Les effets stochastiques
5/ Quelques résultats d'études épidémiologiques

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

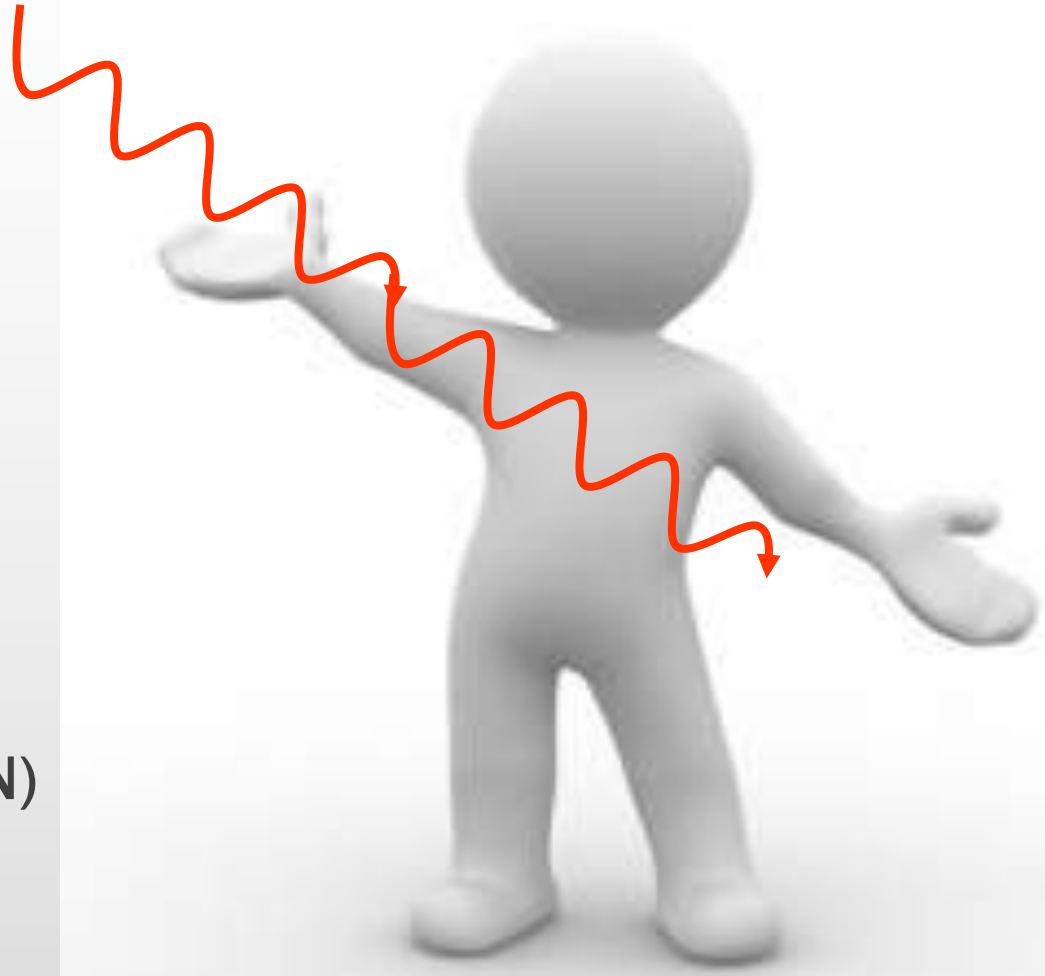
2/ Les réactions biochimiques et moléculaires

Dans 1 Cellule :

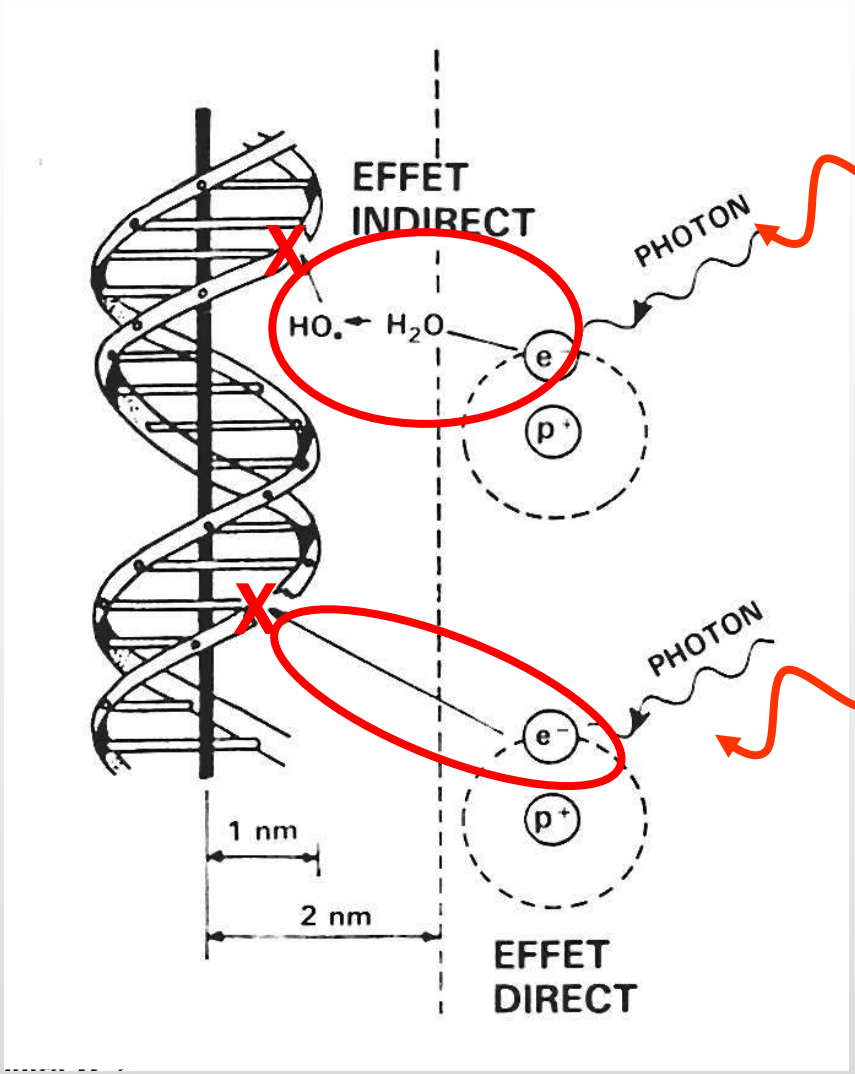
10^{13} molécules d'eau + 10^{8} macromolécules

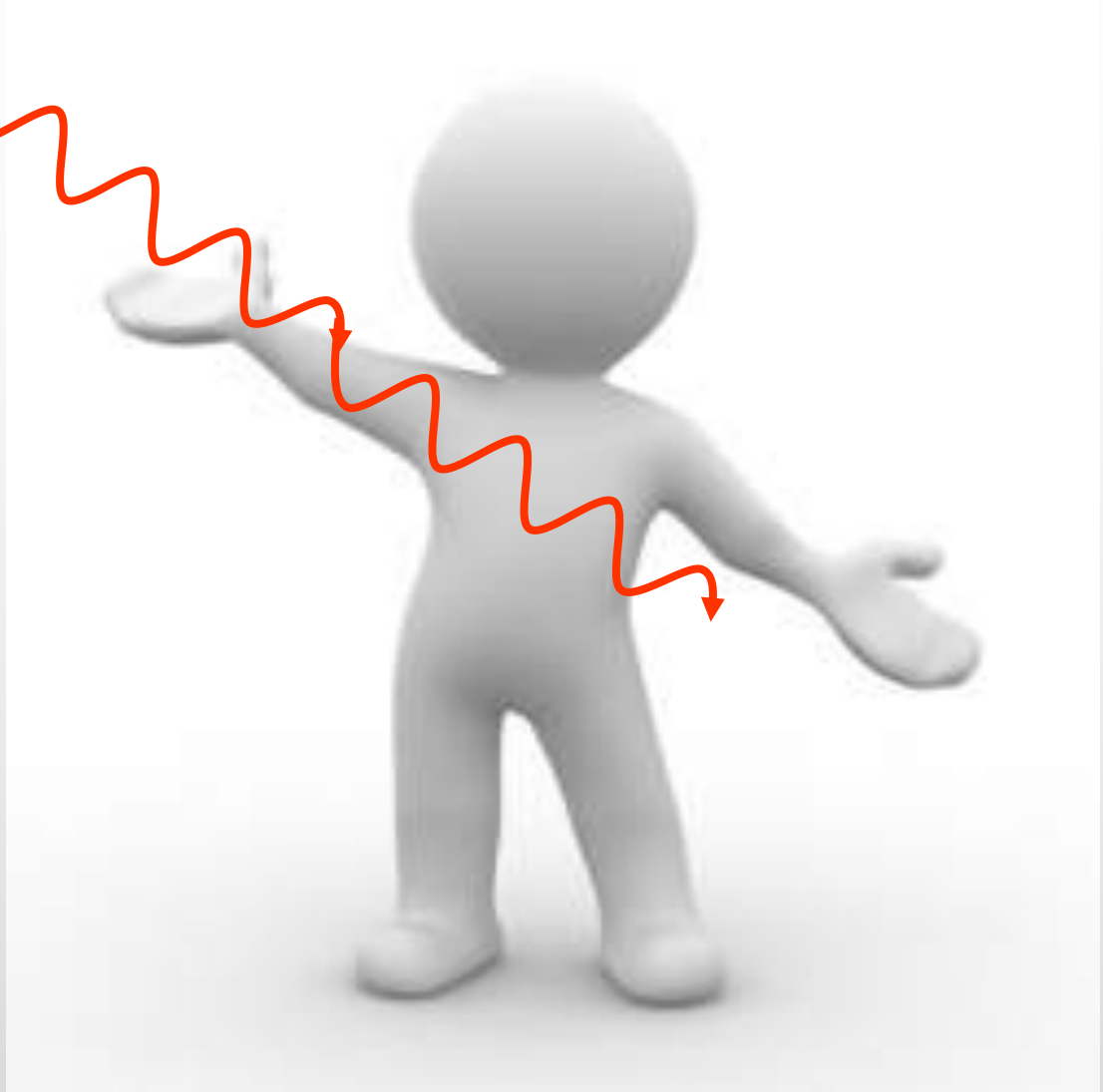
⇒ Risques de dommages :

- de l'eau intracellulaire = <u>Effet indirect</u>
- des macromolécules nobles membranaires ou intracellulaires (cytoplasmique ou intranucléaires : ADN) = <u>Effet direct</u>

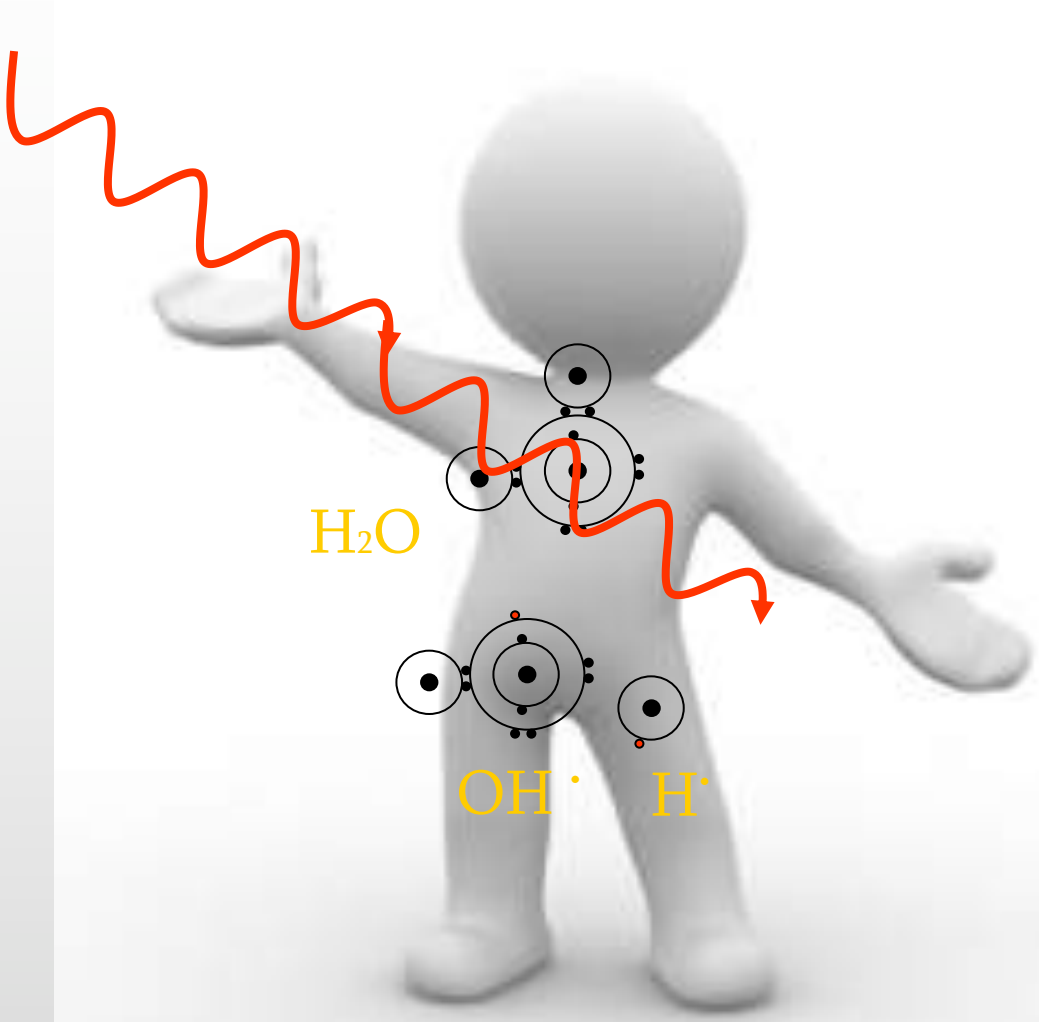


2/ Les réactions biochimiques et moléculaires

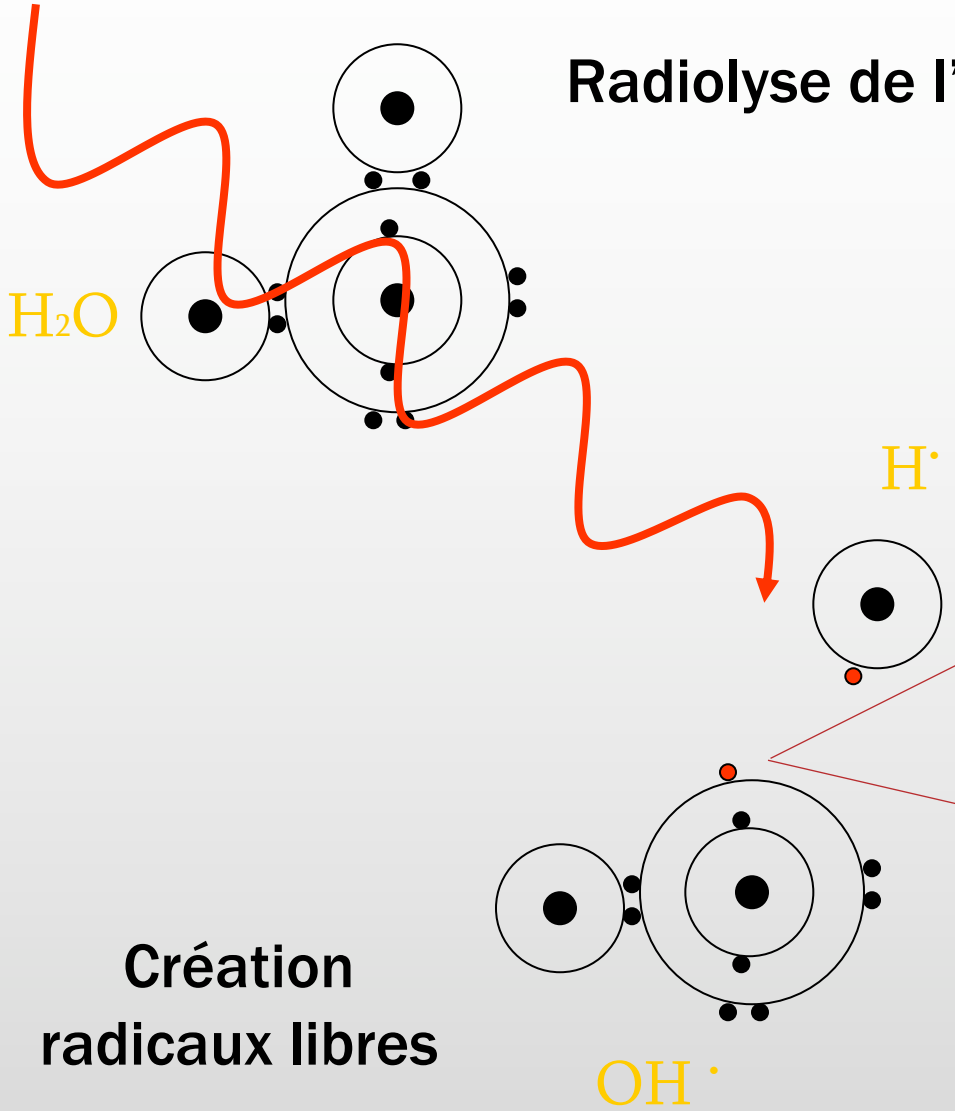


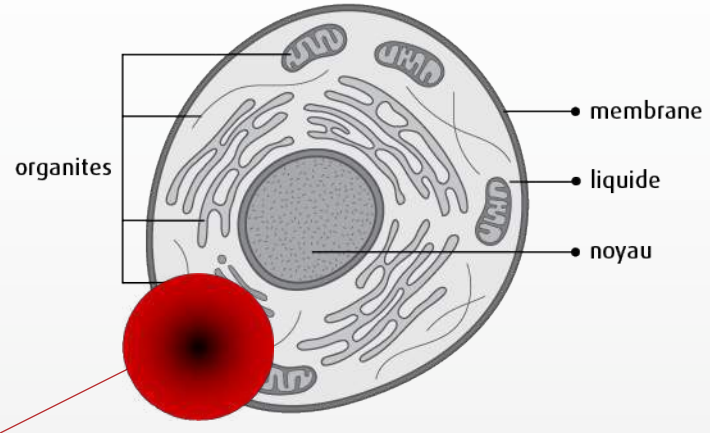


2/ Les réactions biochimiques et moléculaires



2/ Les réactions biochimiques et moléculaires





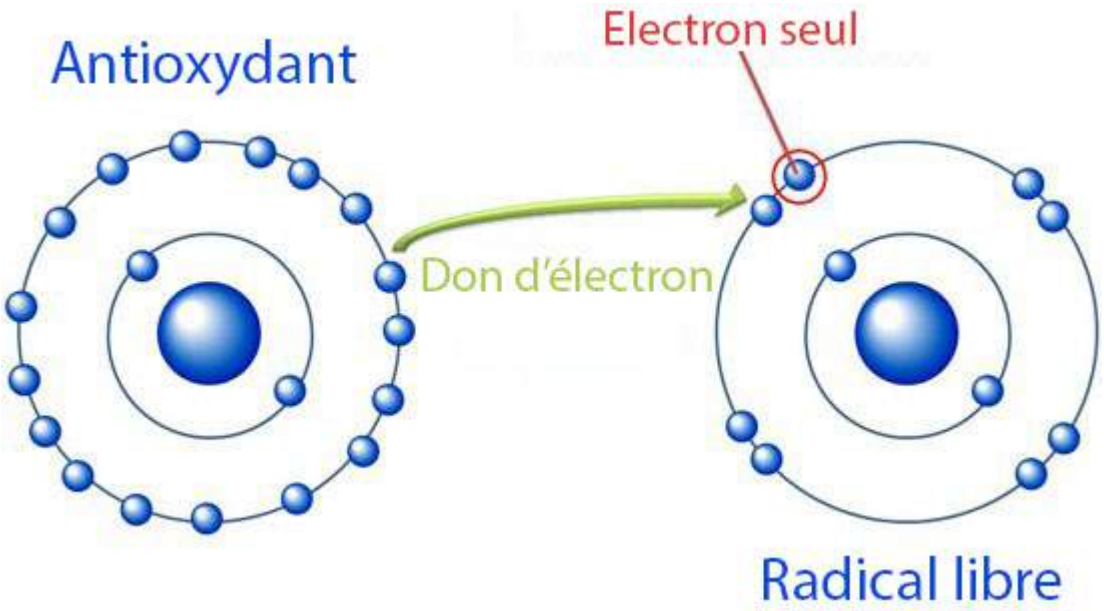
Lyse cellulaire

Mutation potentielle ADN

2/ Les réactions biochimiques et moléculaires
Les mécanismes de défense

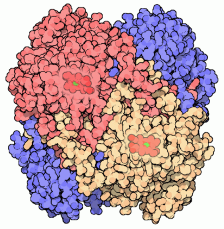
Neutralisation des radicaux libres

1/



2/

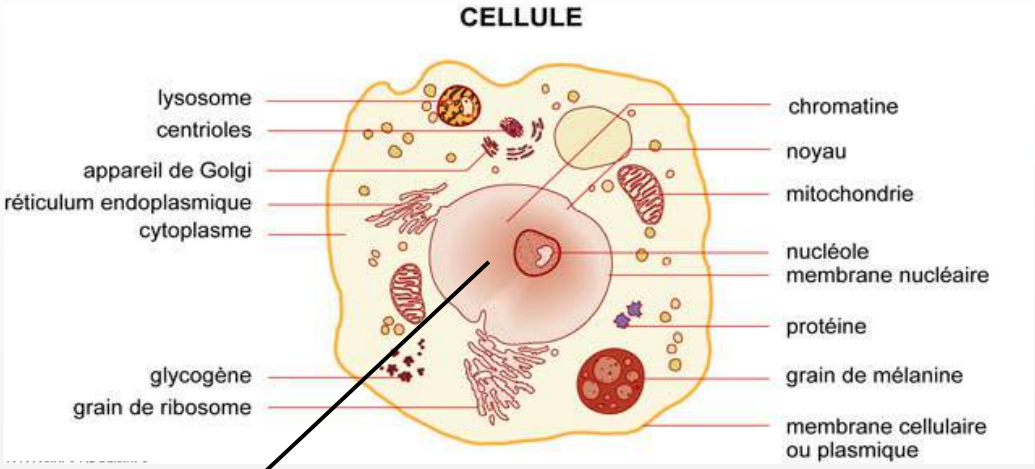
$$2H_2O_2 \xrightarrow{\text{Catalase}} 2H_2O + O_2$$

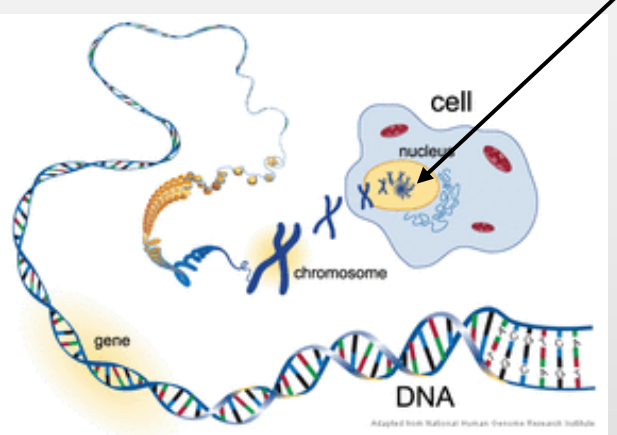


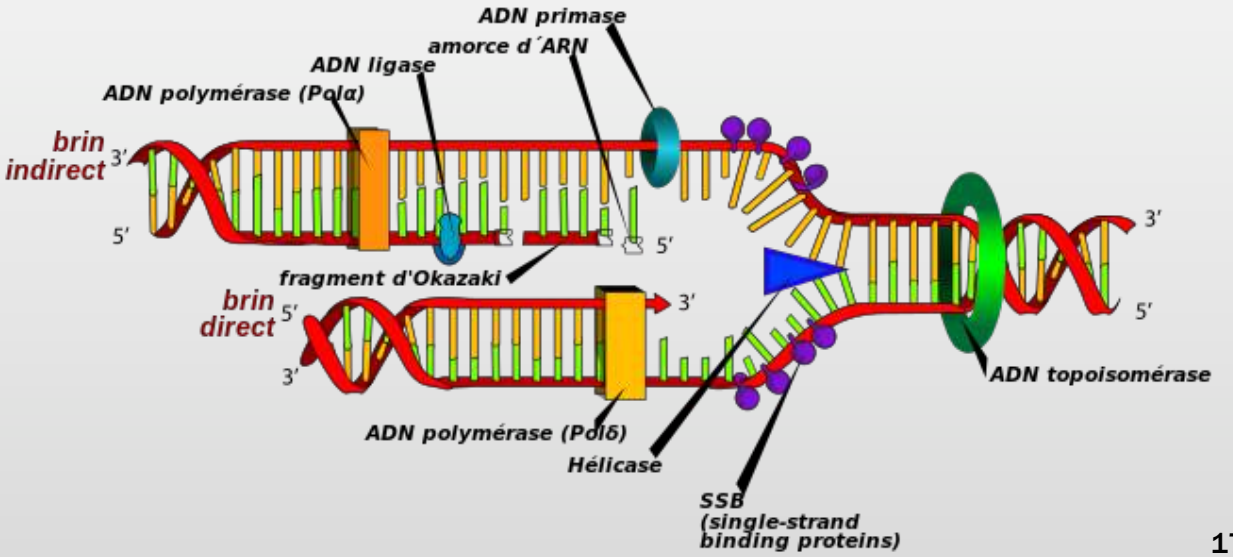
3/

2/ Les réactions biochimiques et moléculaires
Les mécanismes de défense

Réparation de l'ADN muté



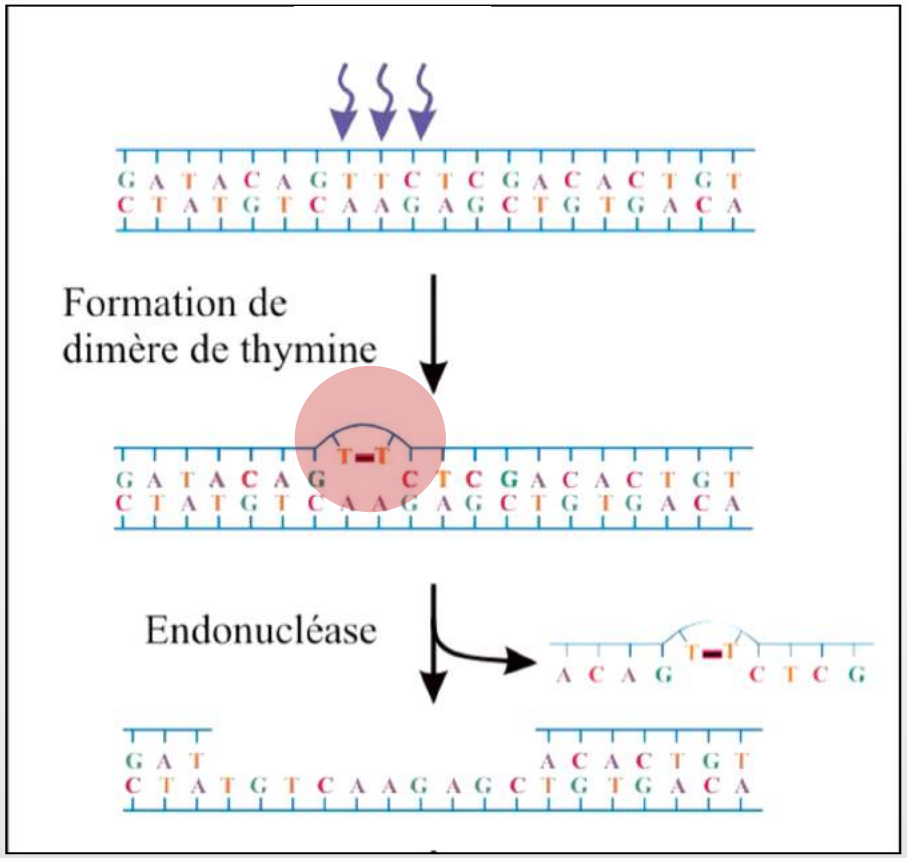


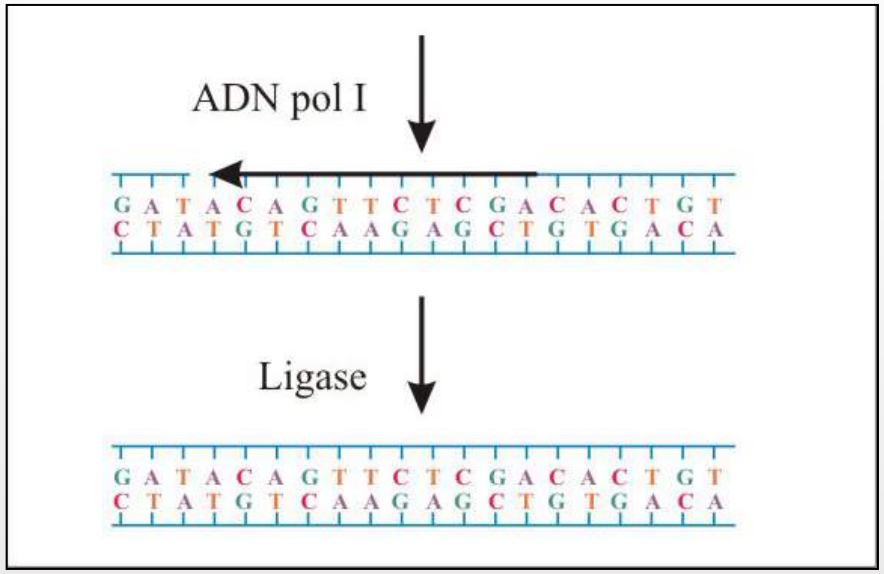


2/ Les réactions biochimiques et moléculaires
Les mécanismes de défense

Réparation de l'ADN muté

Réparation système enzymatique





Réparation fidèle par excision resynthèse

La réalité physico-chimique est bien plus complexe…

Que se passe-t-il si les mécanismes de défense sont défaillants ?

Objectif général n°1

Reconnaitre les composants des risques inhérents aux RI dans le domaine médical

MODULE 1.2

THOMAS LEMOINE, INGENIEUR RADIOPROTECTION

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

Objectif pédagogique :
Identifier les risques associés aux RI

Effets biologiques des rayonnements ionisants sur l'homme

Effets déterministes

THOMAS LEMOINE

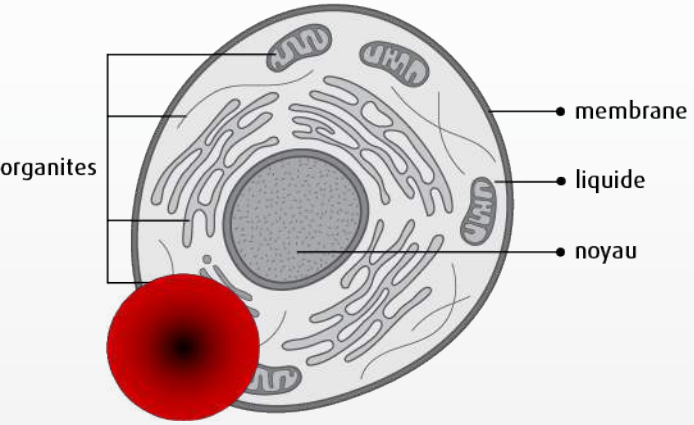
FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

Sommaire

1/ Des rayonnements qui créent des ions
2/ Les réactions biochimiques et moléculaires
3/ Les effets déterministes
4/ Les effets stochastiques
5/ Quelques résultats d'études épidémiologiques

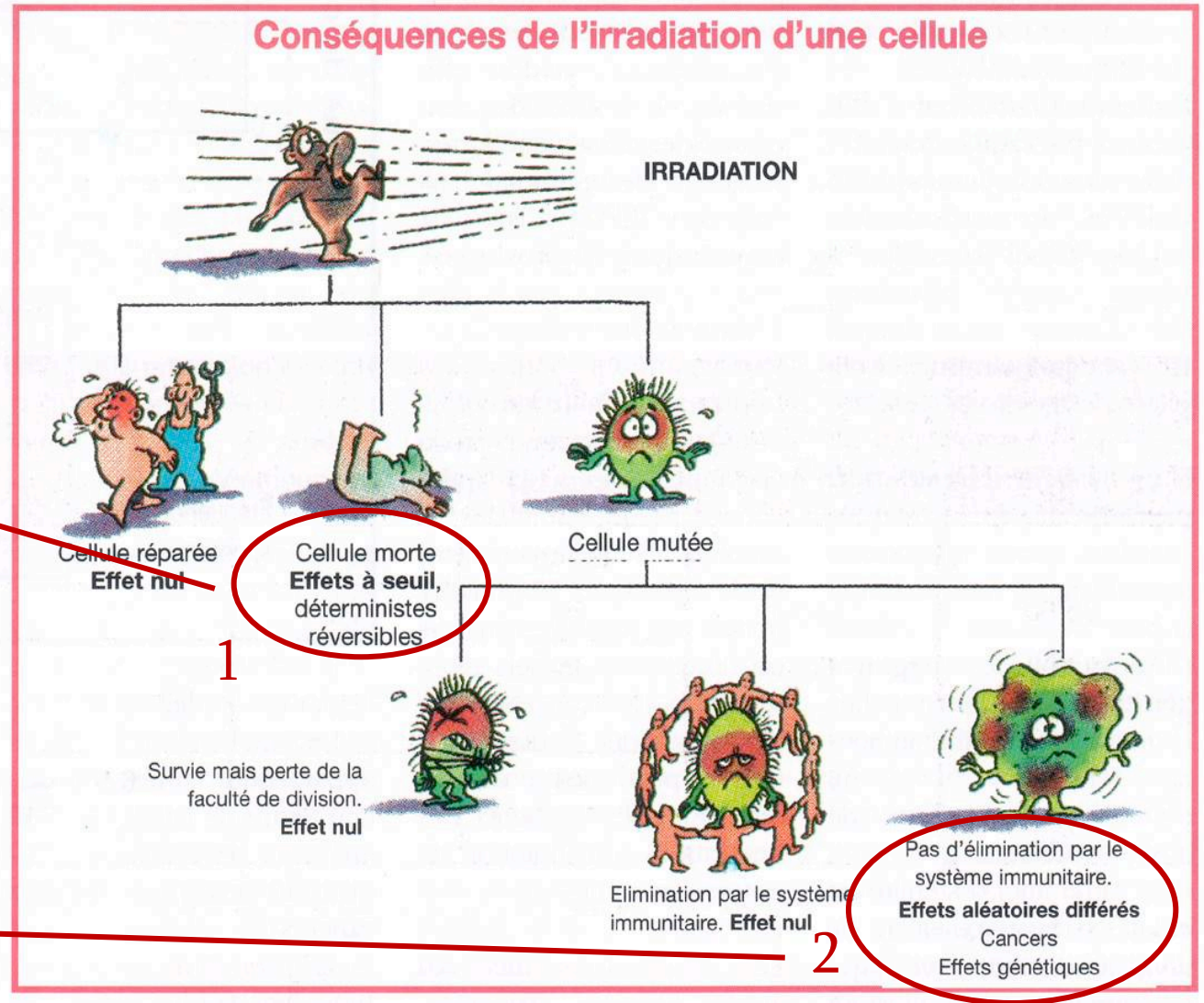
FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

Rappel : 2 effets potentiels

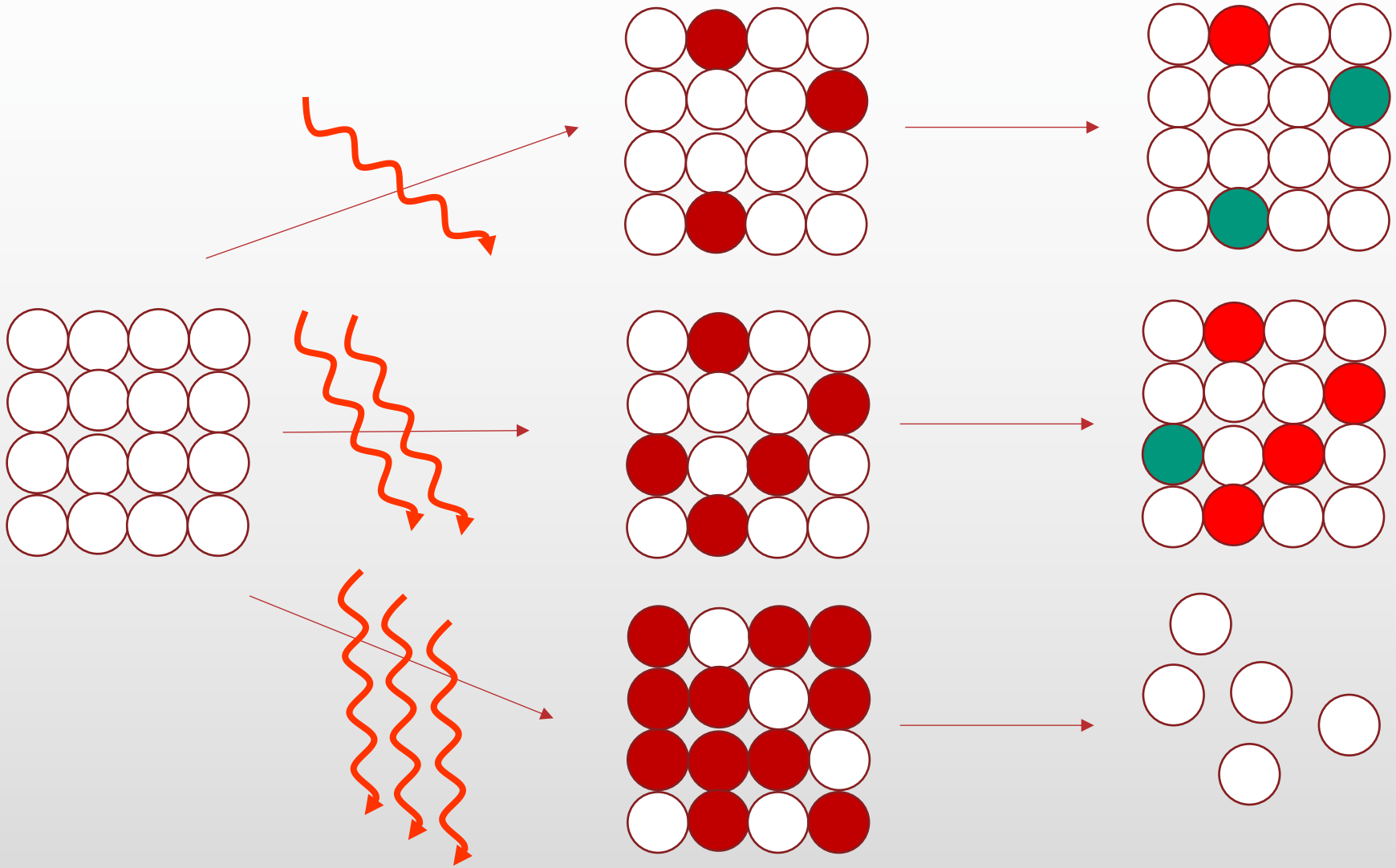


Lyse cellulaire

Mutation potentielle ADN



Effet déterministe lié aux effets cellulaires et tissulaires



Pas d'effet clinique

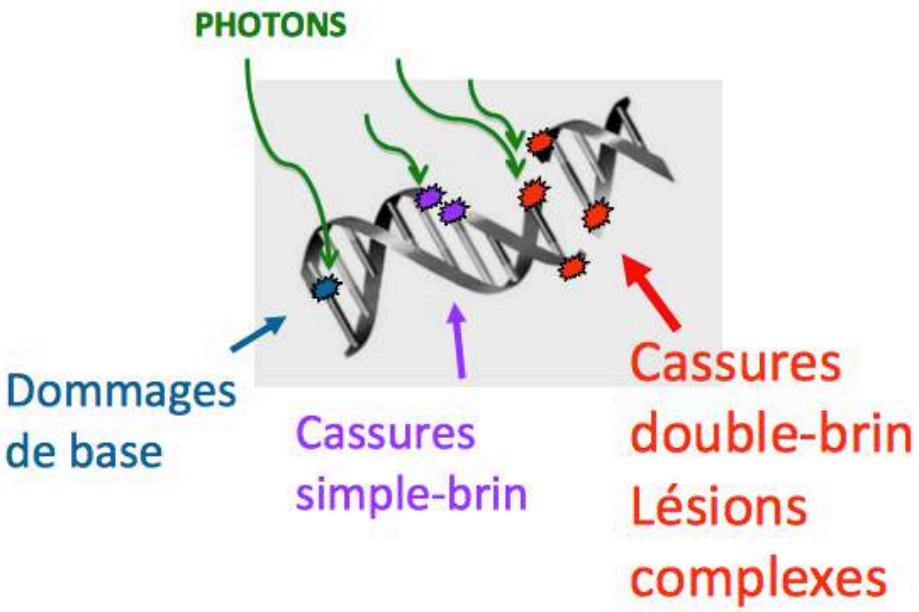
Dysfonctionnement temporaire : effet clinique réversible

Perte des fonctions physiologiques du tissu : effet irréversible

Définition effet déterministe

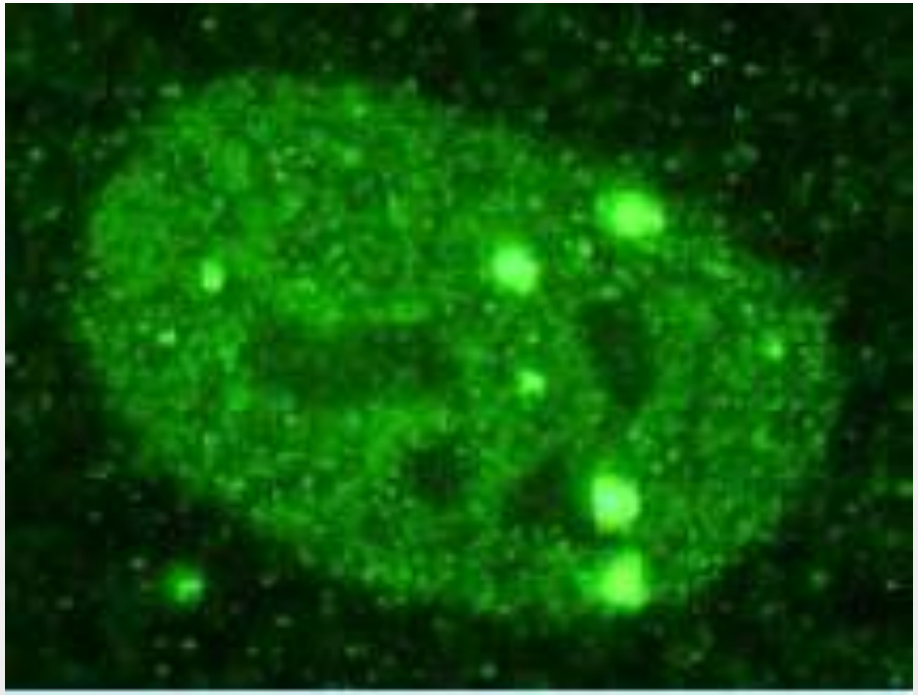
- Effet néfaste sur la santé
- Lié à la mort d'un certain nombre de cellules d'un tissu
- Apparaît lorsqu'un nombre important de cellules mortes est atteint (effet à seuils fonction du tissu)
- Effets cliniques en général précoces
- Gravité fonction de la dose reçue
- Symptômes généralisés ou localisés
- Liés à une dose absorbée exprimée en Gray (Gy)

Effet déterministe : concrètement sur la cellule



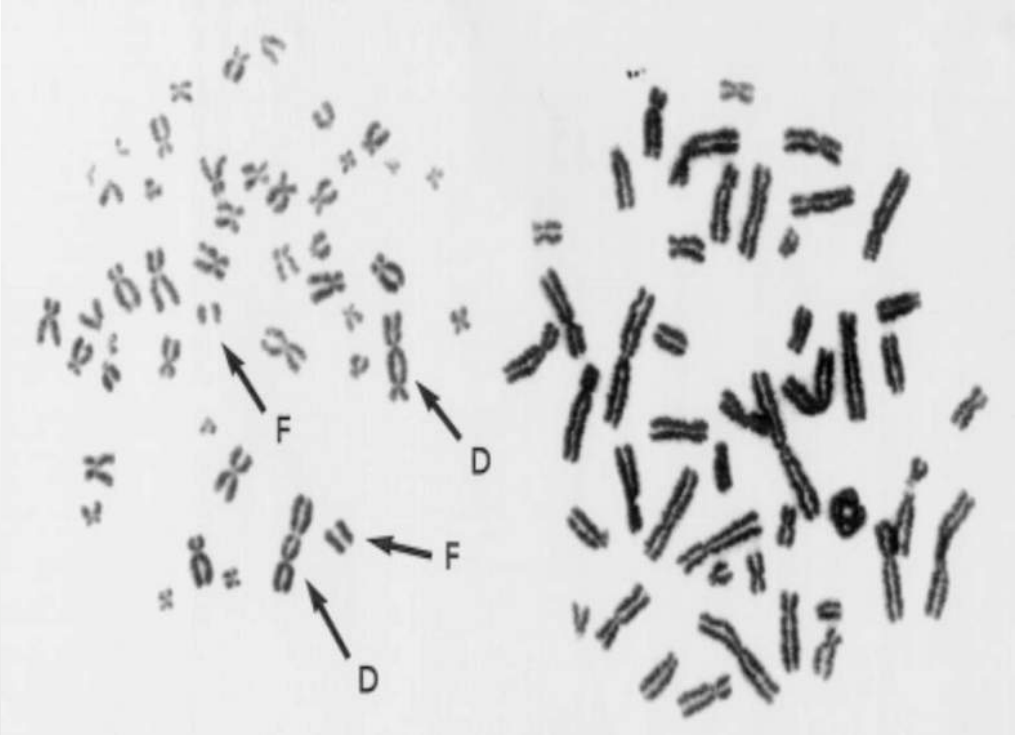
Types de lésions	Naturel (24 h)	+ 1Gy	Rapport 1 Gy/naturel
Cassures simple brin	20.000 à 40.000	1.000	1/30
Cassures double brin	8	40	Très fort : 5
Lesion de base	20.000	2.000	1/10
Autres lesions	5.000	200	1/25
TOTAL	≅ 50.000	≅ 3000	≅ 1/20

Effet déterministe : concrètement sur la cellule



© Inserm, Nicolas Foray

Noyau d'une cellule fibroblastique humaine de peau irradiée à 100 mSv de rayons X . Vingt-quatre heures après irradiation il subsiste au moins 4 cassures double-brin de l'ADN (coloration en vert brillant).



A plus forte dose encore :
Caryotype de cellule non viable

Effet déterministe : concrètement sur le tissu

Tissu conjonctif de cellules souches non exposées

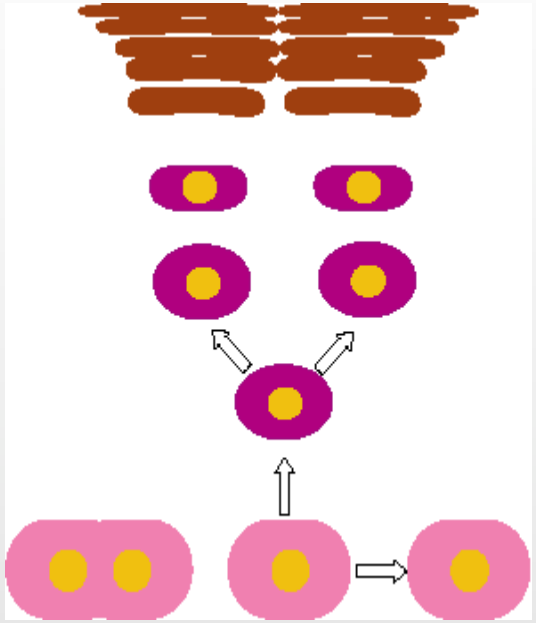
Tissu conjonctif irradié, composé de cellules souches « fibrosées »

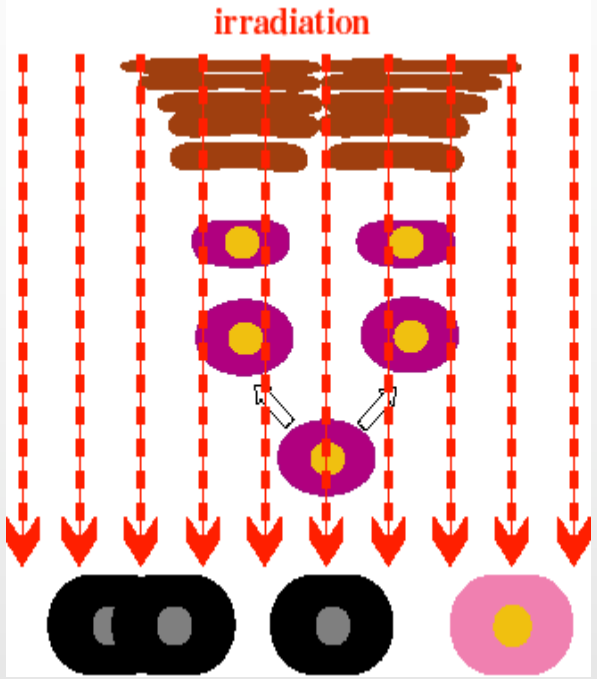
Exemple de l'exposition localisée sur la peau

cellules différenciées

maturation et différenciation

cellules souches





résistance

sensibilité moindre

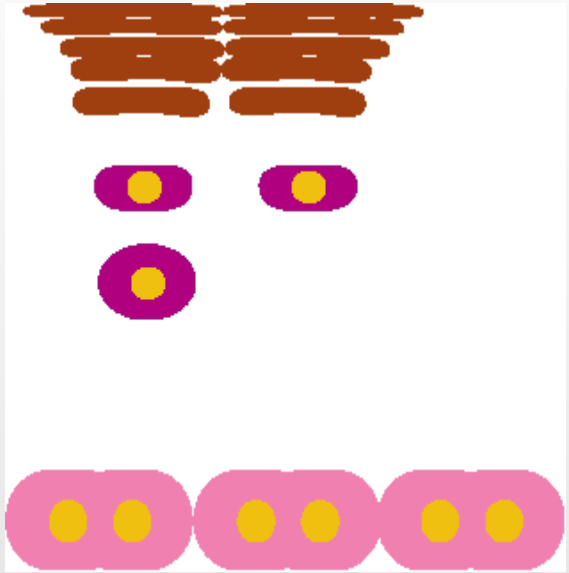
vulnérabilité des cellules souches

Exemple de l'exposition localisée sur la peau

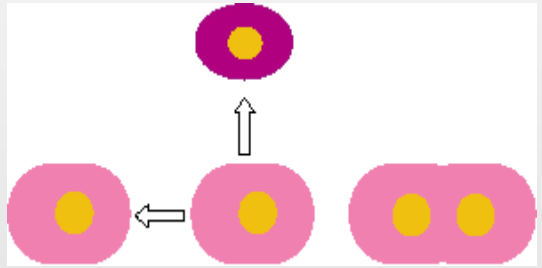
élimination naturelle

disparition progressive

priorité de reconstitution des cellules souches



disparition des cellules différenciées : acmé des symptômes



reprise de maturation

reconstitution des cellules souches

Exemple de l'exposition localisée sur la peau (Scanner)

Scanner cérébral
de perfusion

3 à 4 Gy

Scanner pédiatrie :
erreur utilisation

2,8 à 5 Gy

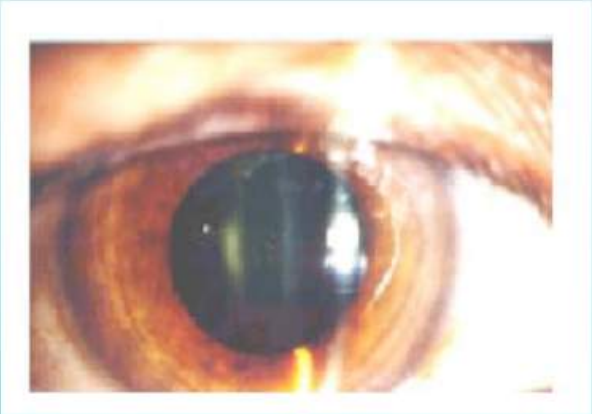
Exemple de l'exposition localisée sur la peau (Radiologie interventionnelle)

Image 4a. Radionécrose chronique à 3 ans d'évolution après radiologie interventionnelle cardiaque.

Image 4b. Couverture par lambeau musculo-cutané de grand dorsal.

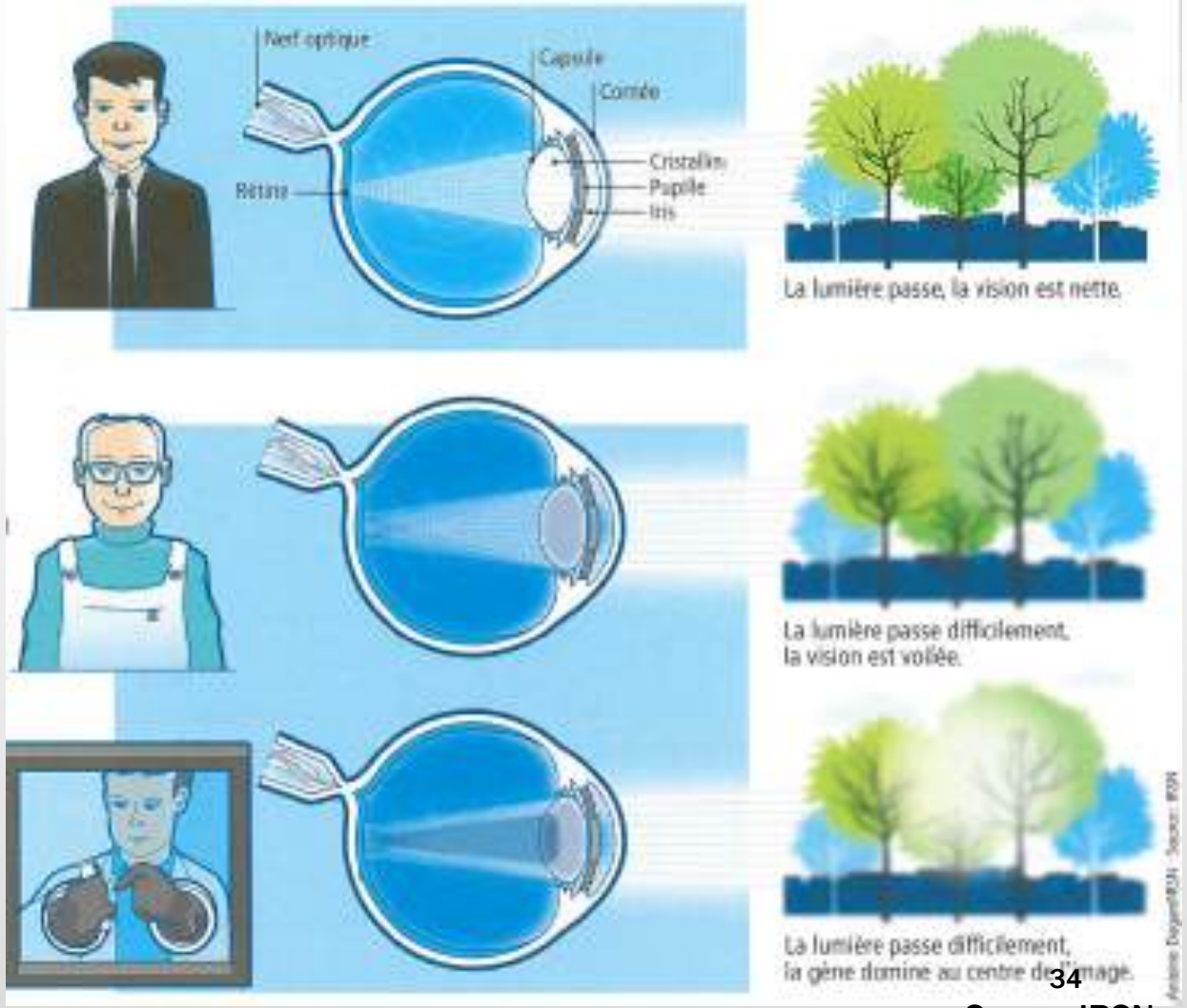
Exemple de l'exposition du cristallin

ICRP 85



Radiation induced opacities in the lens of an interventional radiology specialist subjected to high levels of scatter radiation from an over-table X Ray tube. (Photograph from Vañó et al. (1998)).

IAEA

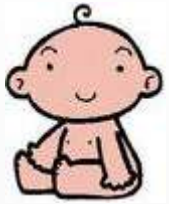


Source IRSN

Exemple de l'exposition des gonades

Tissu et effet	Seuil	
	Dose absorbée (Gy)	Débit de dose annuel ($Gy.an^{-1}$)
	Exposition unique et brève	Fractionné ou étalée sur plusieurs années
Testicules Stérilité temporaire Stérilité permanente	**0,2** **5,0**	**0,4** **2,0**
Ovaires Stérilité	**3,0**	**> 0,2**

Exemple de l'exposition de l'embryon



Conception

Naissance

J0 J9

1/ Multiplication

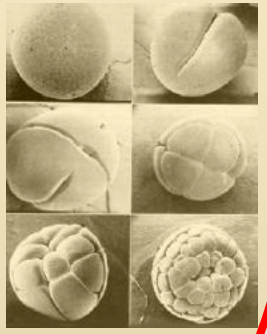
S9

3/ Développement

J9

2/ Organogenèse

S9



1/ morula

2/ embryon

3/ fœtus

Objectif général n°1

Reconnaitre les composants des risques inhérents aux RI dans le domaine médical

MODULE 1.2

THOMAS LEMOINE, INGENIEUR RADIOPROTECTION

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

Objectif pédagogique :
Identifier les risques associés aux RI

Effets biologiques des rayonnements ionisants sur l'homme

Effets stochastiques

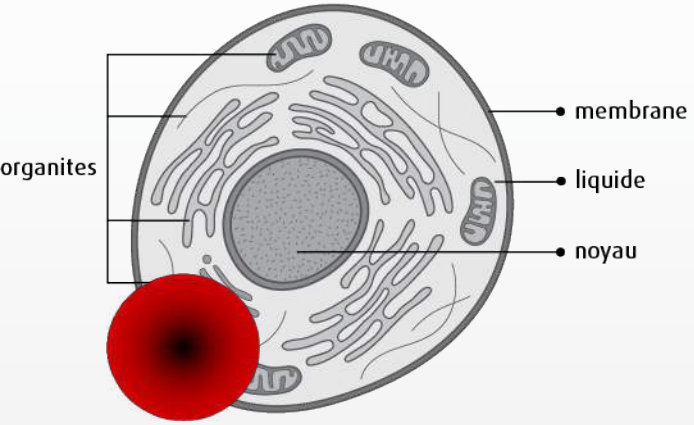
THOMAS LEMOINE

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

Sommaire

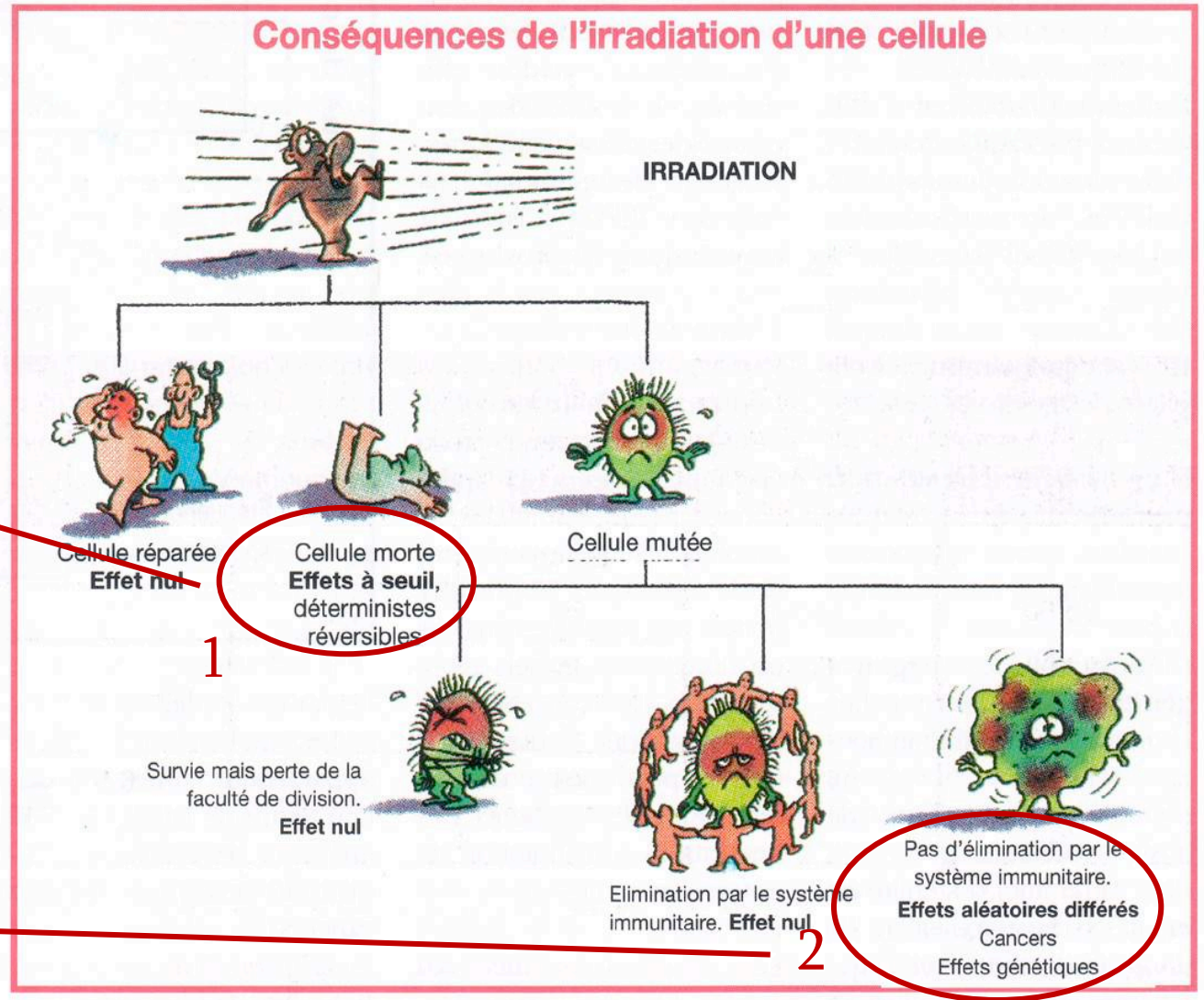
1/ Des rayonnements qui créent des ions
2/ Les réactions biochimiques et moléculaires
3/ Les effets déterministes
4/ Les effets stochastiques
5/ Quelques résultats d'études épidémiologiques

Rappel : 2 effets potentiels

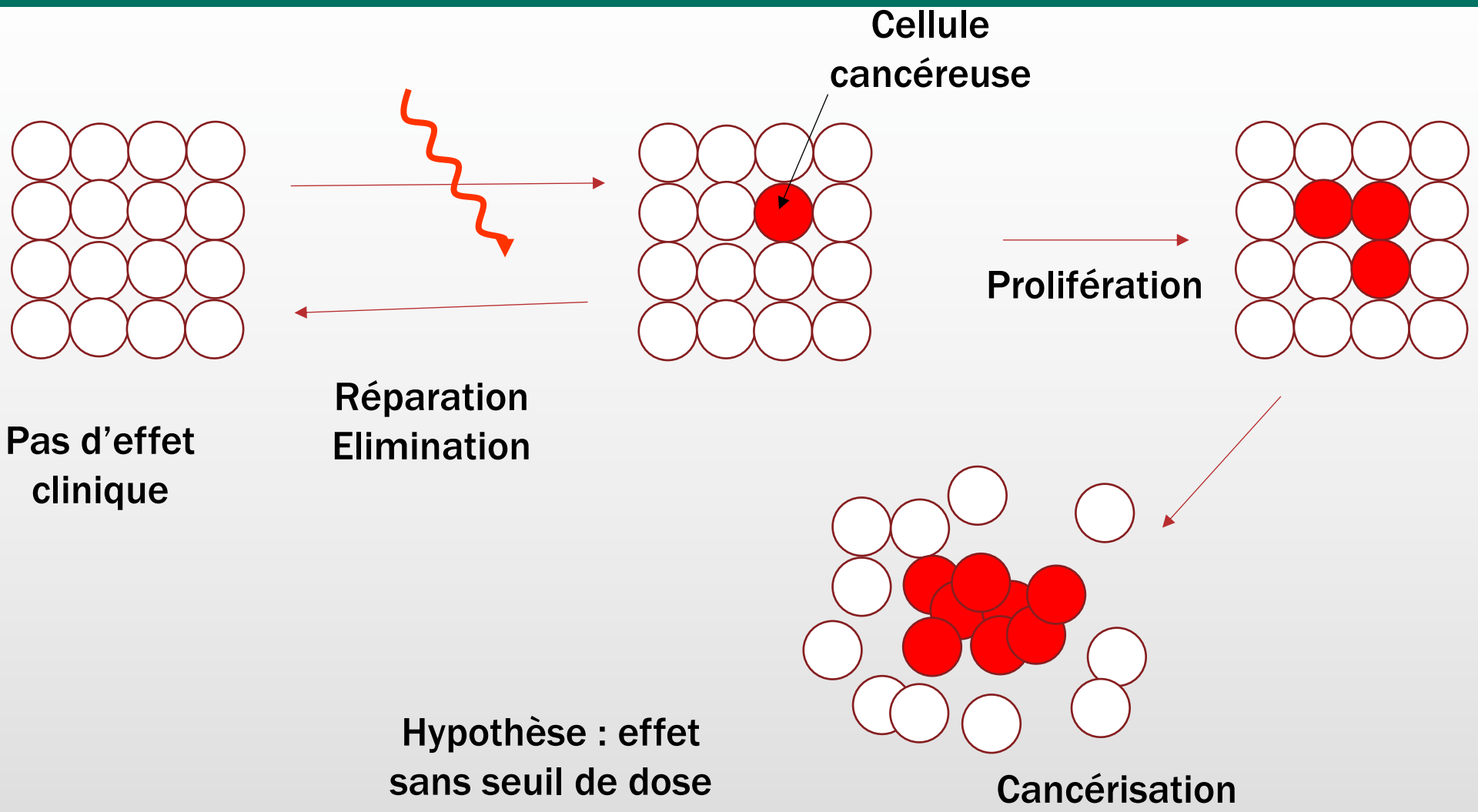


Lyse cellulaire

Mutation potentielle ADN



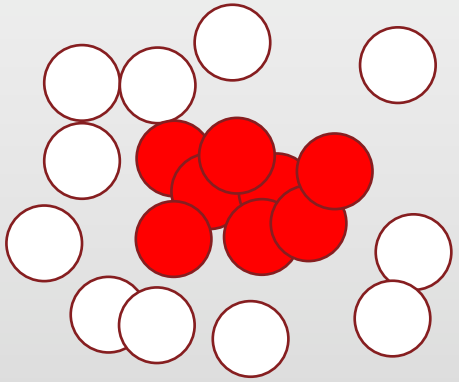
Effet stochastique lié aux mutations cellulaires



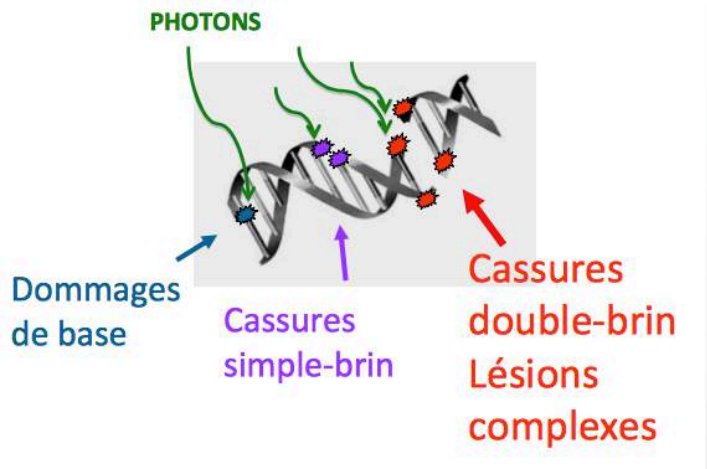
Hypothèse : effet sans seuil de dose

Définition effet stochastique

- Effet néfaste sur la santé
- Lié à la mutation d'une ou plusieurs cellules
- Apparition n'est pas strictement liée au nombre de cellules mutées (hypothèse d'apparition sans seuil, mais seuil devient significatif au-delà de 100 mSv)
- Effets cliniques en général tardifs (plusieurs dizaines d'années)
- Gravité n'est pas fonction de la dose reçue
- Lié à une dose exprimée en Sievert (Sv)
- Cancers – Leucémies – Effets héréditaires



Effet stochastique : concrètement sur l'homme



Doses pour lesquelles a été prouvée l'augmentation de la fréquence des cancers	DOSES	TEMPS DE LATENCE
Leucémies	> 200 mGy	2 à 20 ans
Cancer du sein	> 200 mGy	22 à 25 ans
Cancer de la thyroïde	> 100 mGy	
Cancer cutané	> 15000 mGy	40 ans
Cancer osseux	> 8000 mGy	20 ans

Comment exprimer la radiosensibilité d'un tissu ?

Facteur de pondération tissulaire Wt

Tissu ou organe	w_T
Gonades	0,20
Moelle rouge	0,12
Côlon	0,12
Poumons	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Seins	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Foie	0,05
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres	0,05

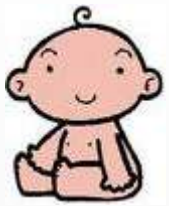
CIPR 60 de 1990

organe ou tissu t	Wt
foie	0,04
oesophage	0,04
tyroïde	0,04
vessie	0,04
cerveau	0,01
glandes salivaires	0,01
peau	0,01
surface osseuse	0,01
moelle osseuse	0,12
côlon	0,12
poumons	0,12
estomac	0,12
sein	0,12
autres	0,12
gonades	0,08
corps entier	1,00

CIPR 103 de 2007

Effet stochastique : concrètement sur l'homme

Qu'en est-il de l'exposition du fœtus ?



Conception

Naissance

J0 J9

1/ Multiplication

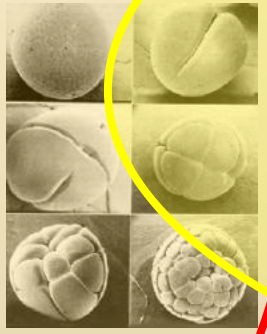
S9

3/ Développement

J9

2/ Organogenèse

S9



1/ morula

2/ embryon

3/ fœtus

Qu'en est-il des effets stochastiques héréditaires ?

Parent

Enfant

Transmission mutation génétique à la descendance,

mais pas d'effet pathogène observé

Objectif général n°1

Reconnaitre les composants des risques inhérents aux RI dans le domaine médical

MODULE 1.5

THOMAS LEMOINE, INGENIEUR RADIOPROTECTION

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

Objectif pédagogique :
Identifier avec précision les différentes situations à risque

Effets biologiques des rayonnements ionisants sur l'homme

Epidémiologie

THOMAS LEMOINE

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

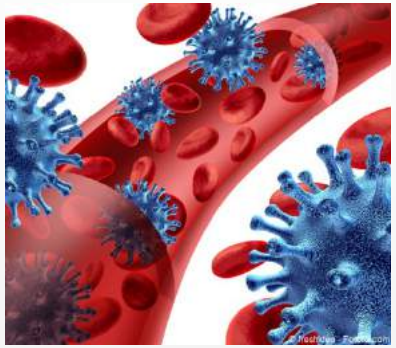
Sommaire

1/ Des rayonnements qui créent des ions
2/ Les réactions biochimiques et moléculaires
3/ Les effets déterministes
4/ Les effets stochastiques
5/ Quelques résultats d'études épidémiologiques

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

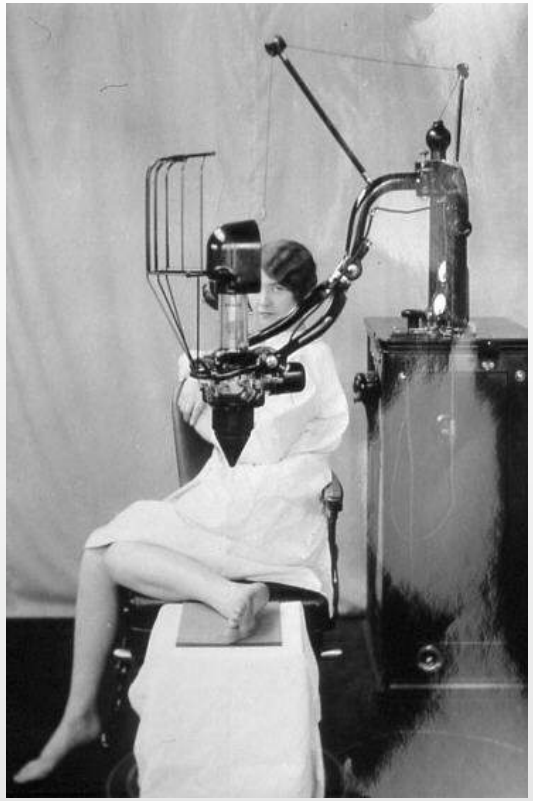
Les premières observations cliniques à grande échelle

1896

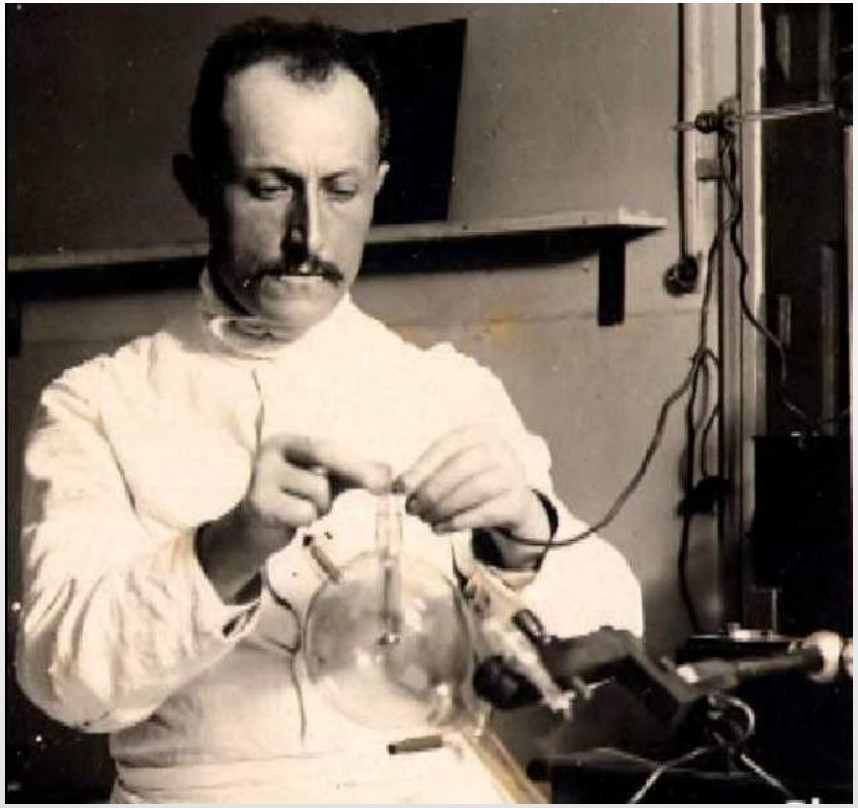


1902

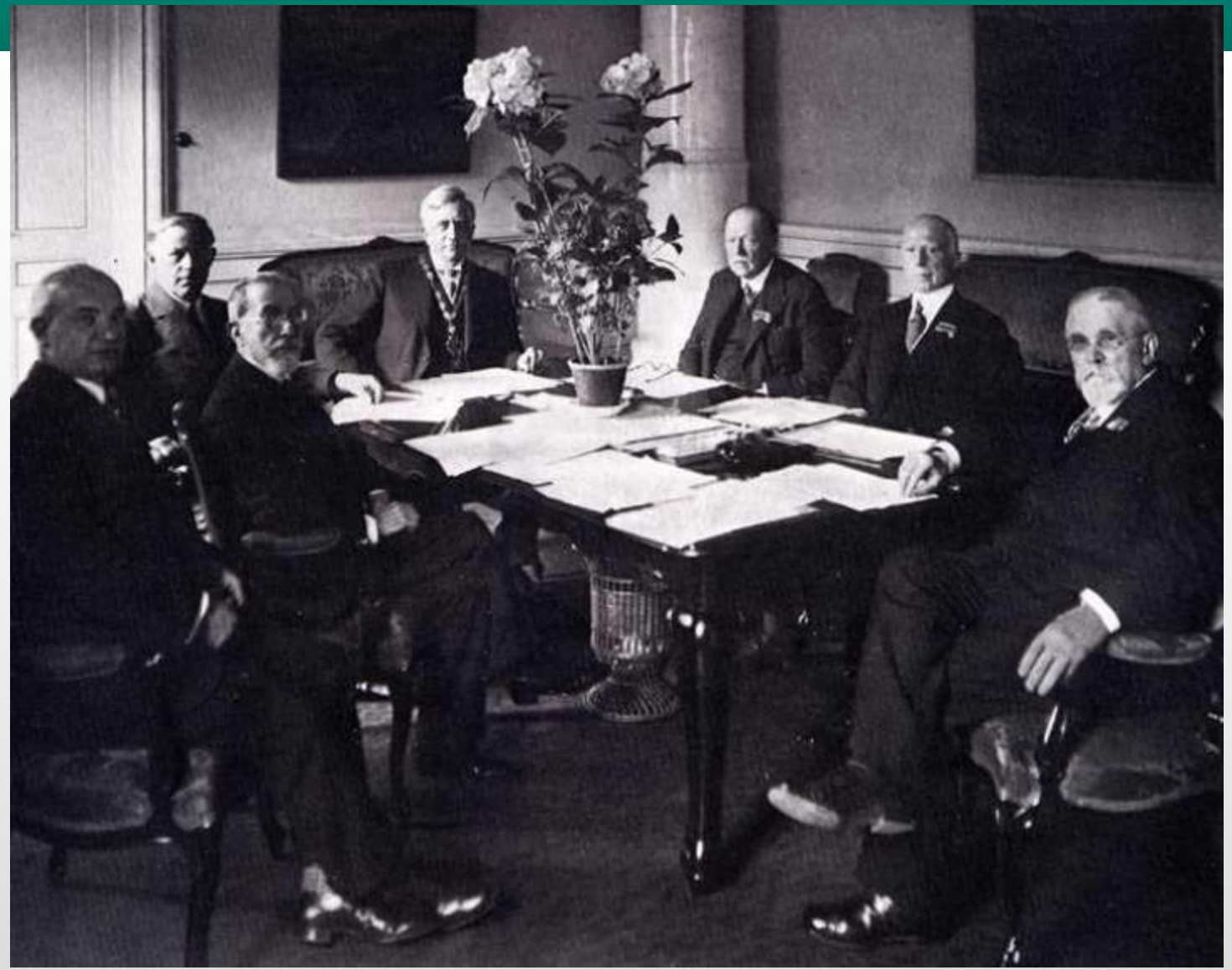
1911



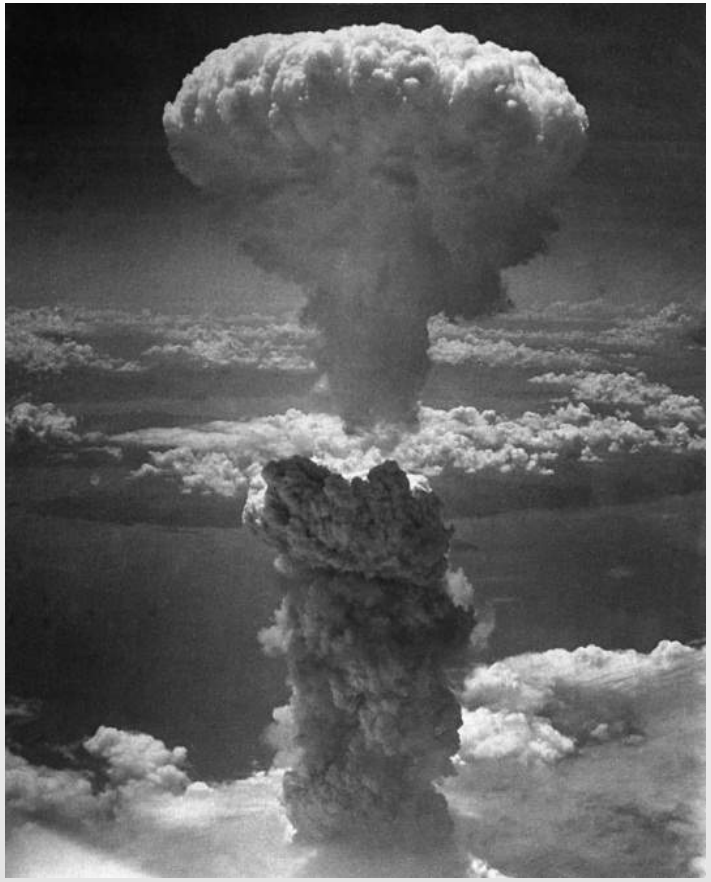
Les premières observations cliniques à grande échelle



Les premières observations cliniques à grande échelle



La confirmation des premières observations cliniques



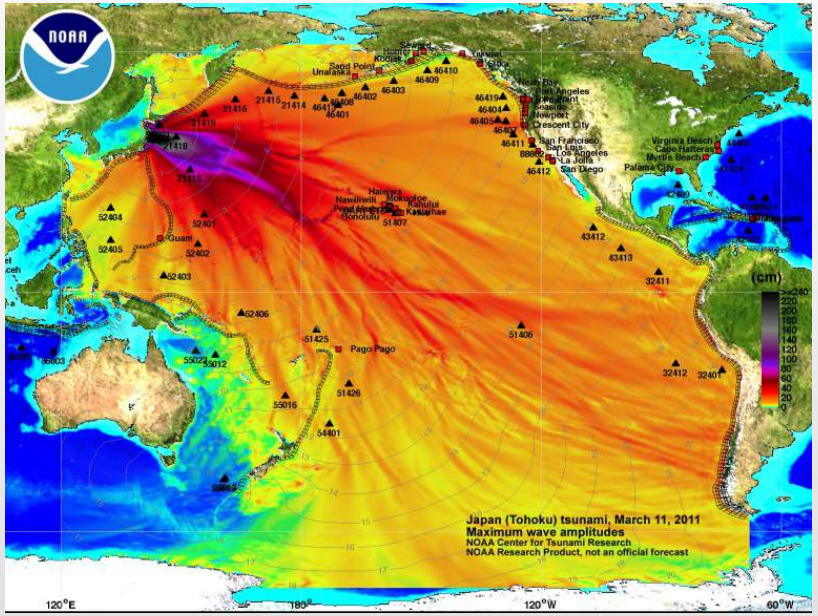
1945

1954

1966

Les études épidémiologiques contemporaines

1986



2011

2015-2020

Etude épidémiologique de référence : « Life Span Study » Hiroshima-Nagasaki

Hiroshima
300 000 habitants
06/08/45 - 15 kt
90-120 000 décès

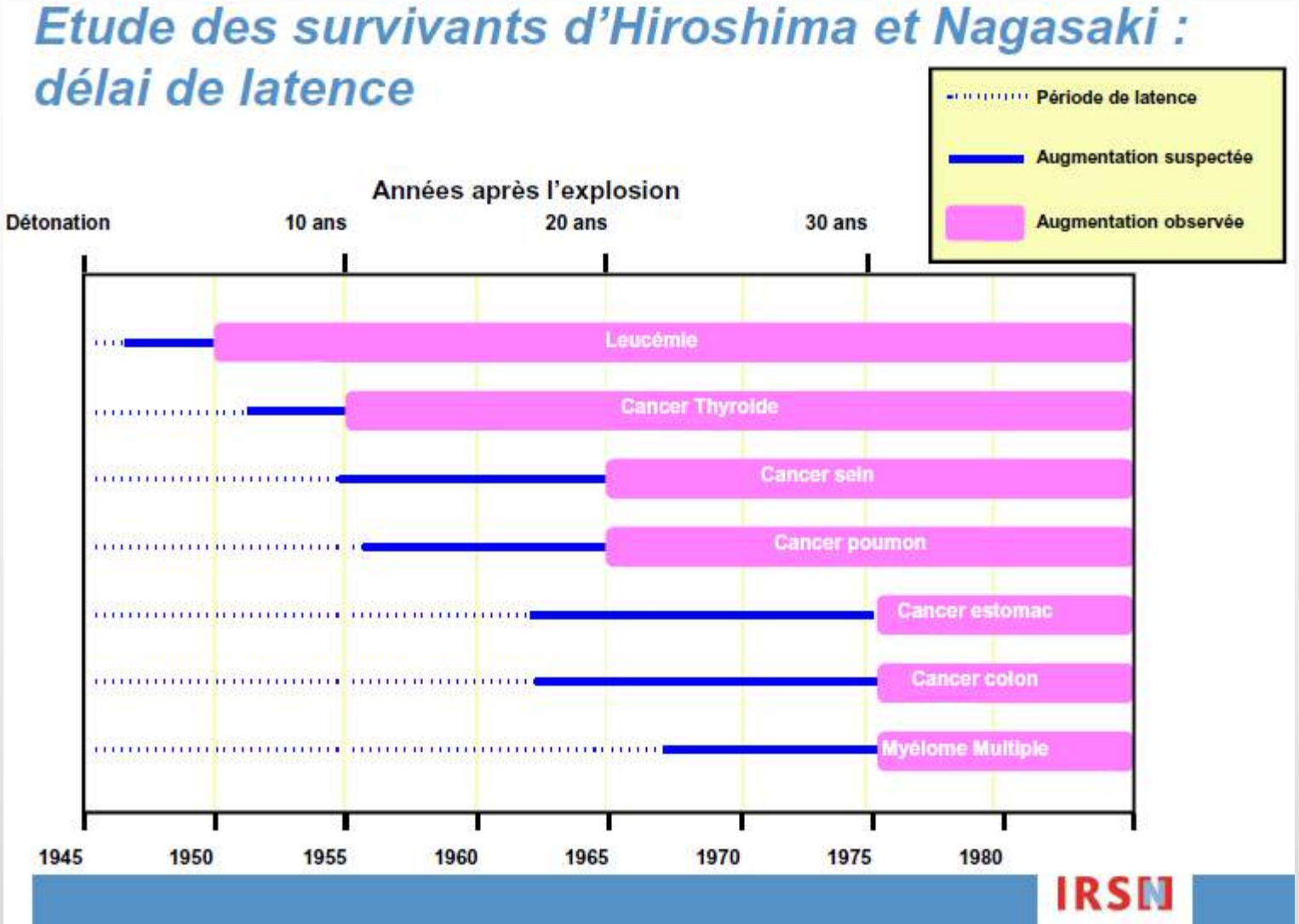
Nagasaki
330 000 habitants
09/08/45 - 21 kt
60-80 000 décès

les 2 sexes – tous les ages (+ *in utero*)
débit de dose élevé

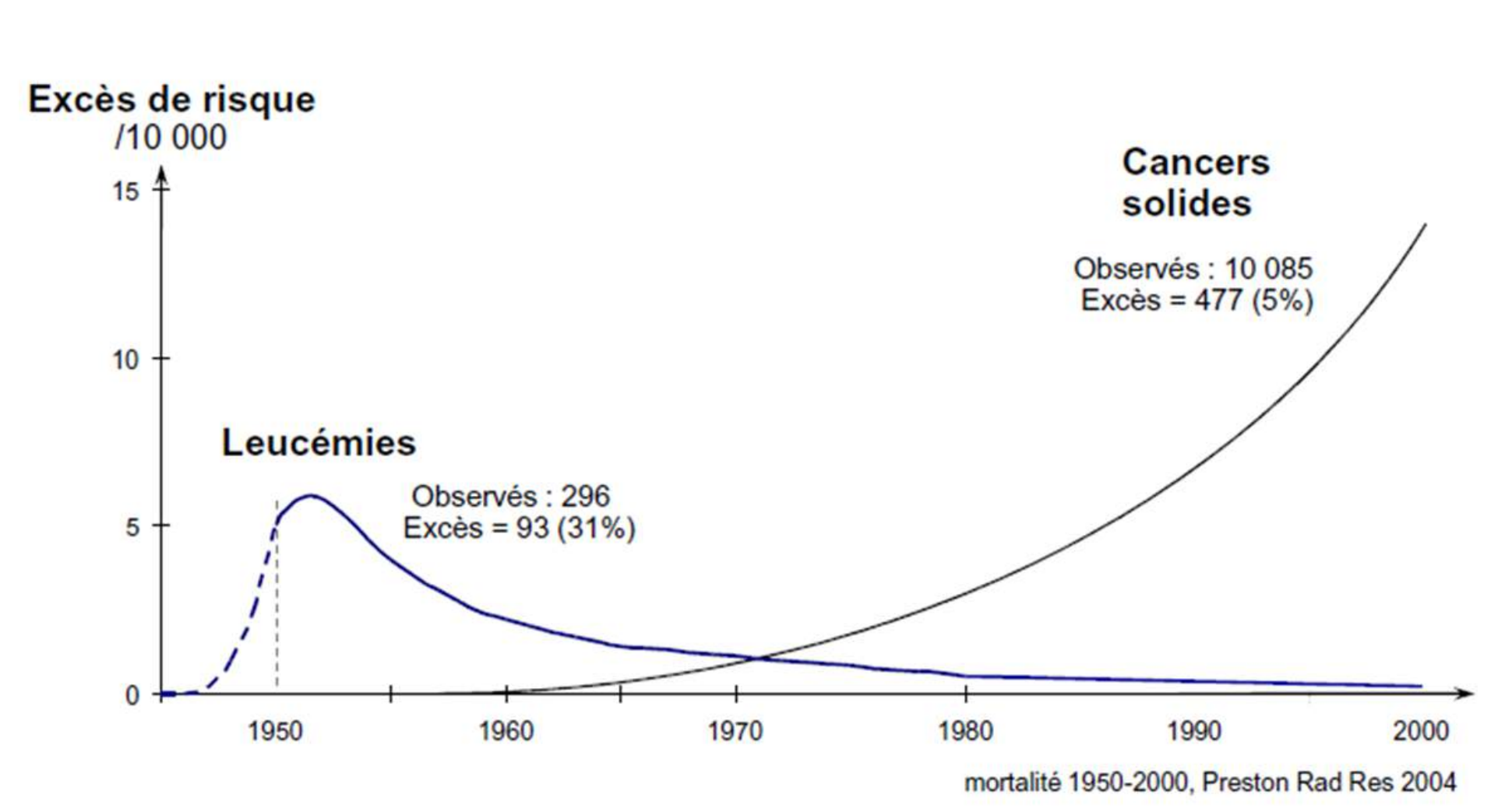
Life Span Cohort Study
suivi depuis 1950
étude de mortalité + incidence
86 600 individus avec dose reconstituée
50 620 décès (58%) en 2003

Etude épidémiologique de référence : « Life Span Study » Hiroshima-Nagasaki

3ème analyse et dernière (2009) : 992 cancers solides associés à une exposition aux RI

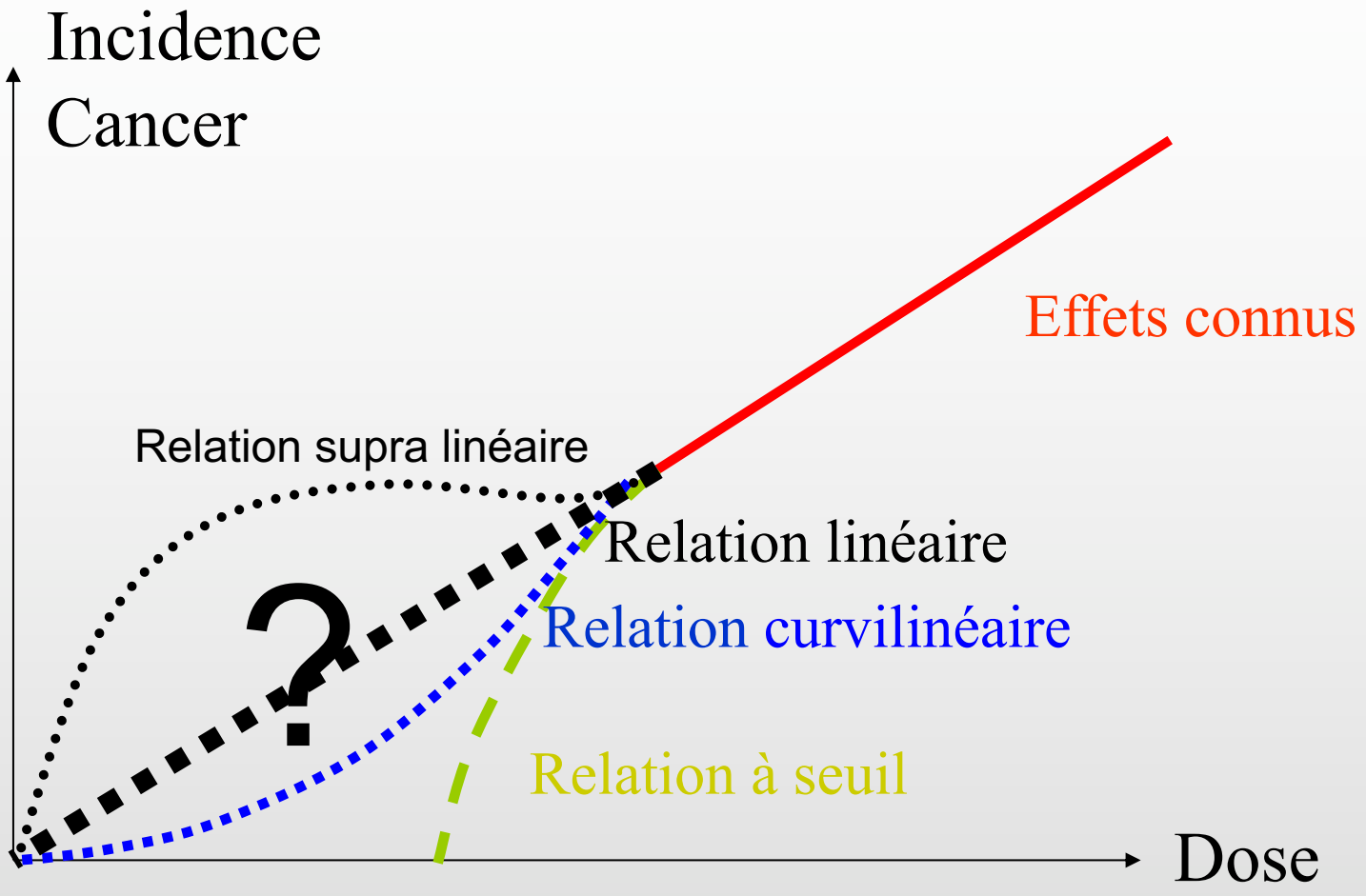


Etude épidémiologique de référence : « Life Span Study » Hiroshima-Nagasaki

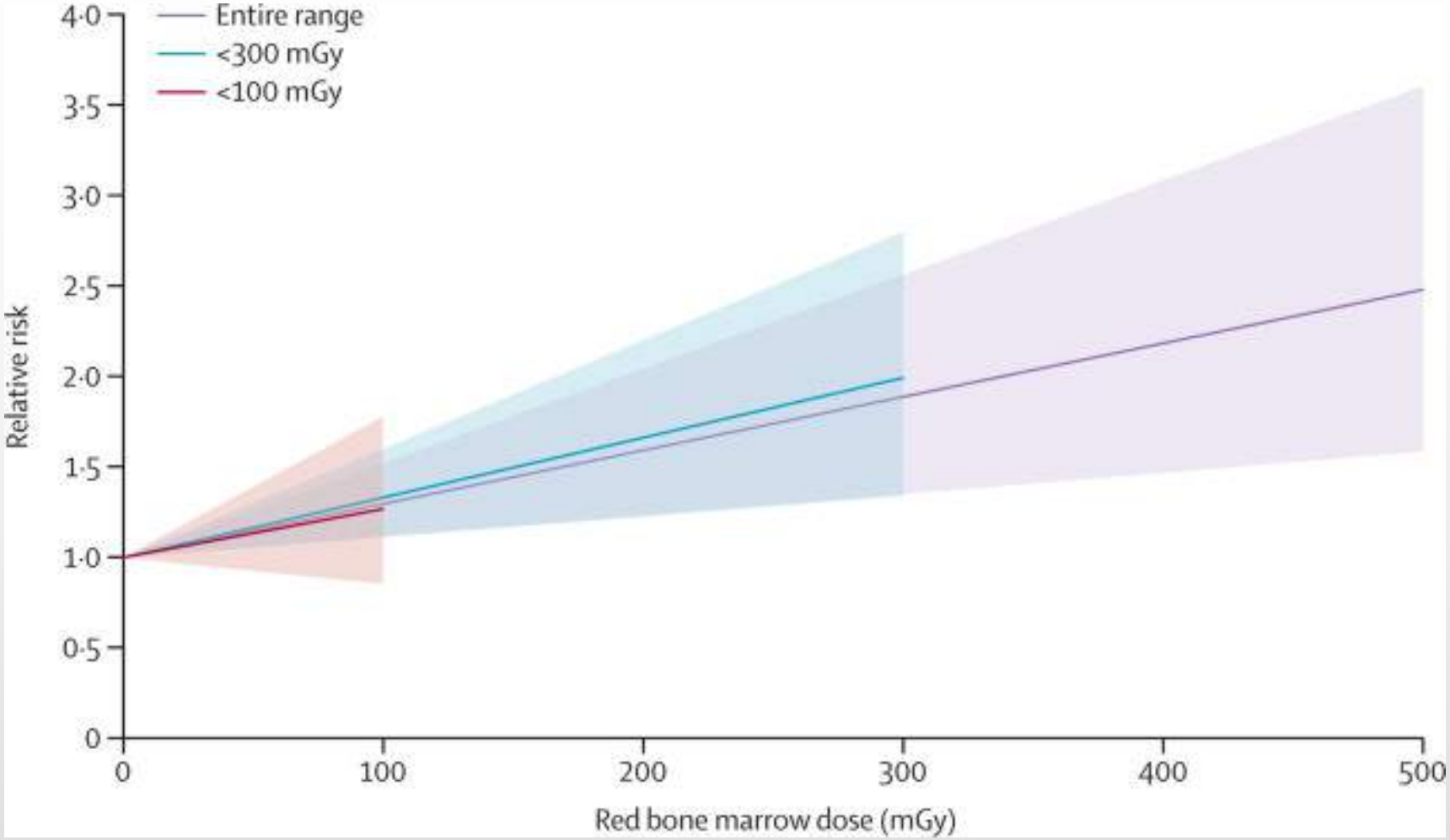


Etude épidémiologique de référence : « Life Span Study » Hiroshima-Nagasaki

Extrapolation des risques aux faibles doses



Etudes épidémiologiques : la problématique des faibles doses



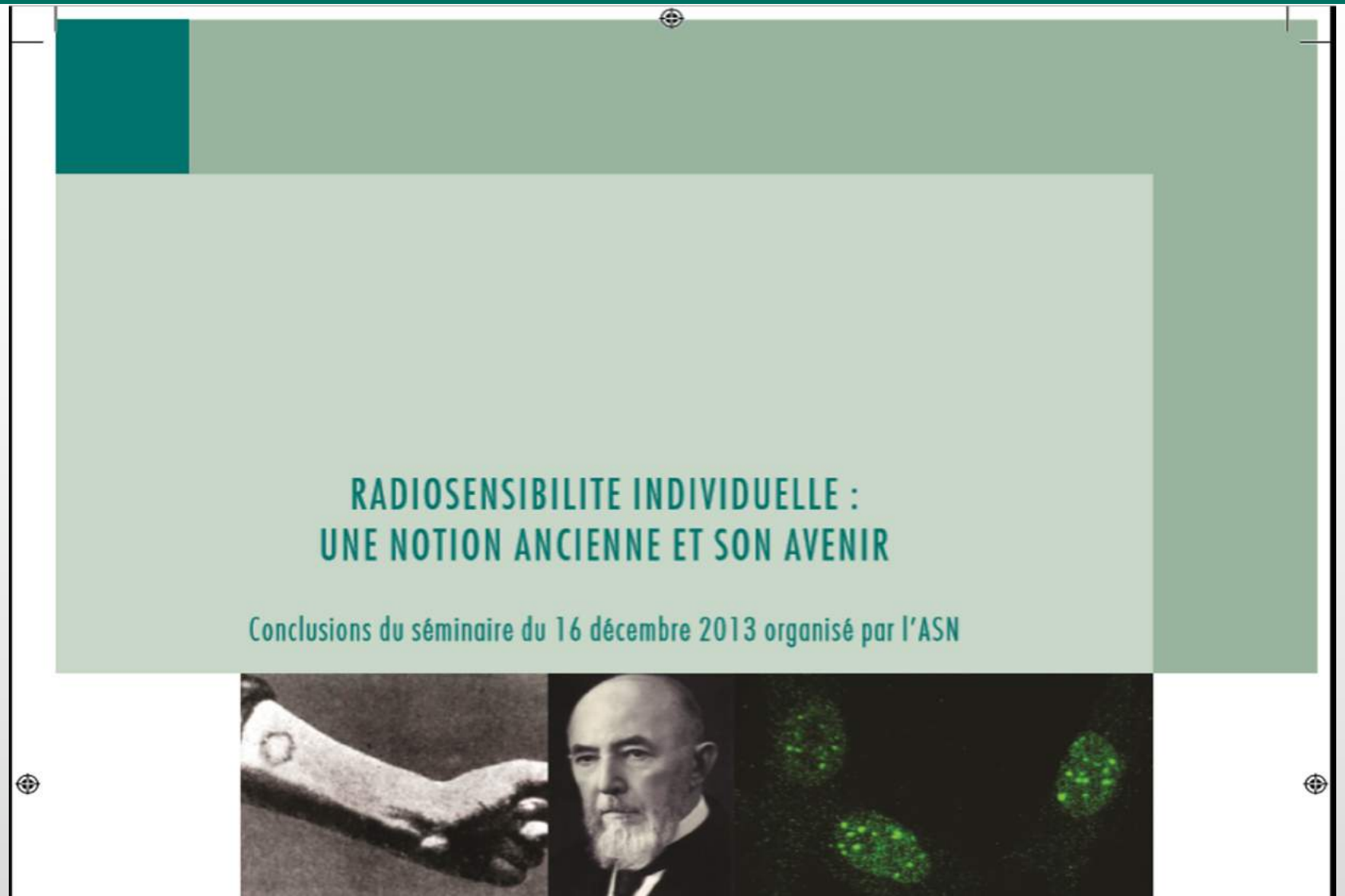
Etude INWORKS internationale France/USA/UK (308 297 travailleurs)

D'après Leuraud, Lancet, 2015

	Pierce	Mathews	Huang	Krille	Journy
Publication	UK, 2012	Australie, 2013	Taïwan, 2014	Allemagne, 2015	France, 2015
Période étudiée	1985-2008	1985-2007		1980-2010	2000-2012
Cohorte	180 000	700 000	24 000	44 000	67 000
Age population	< 22 ans	< 20 ans	< 18 ans	< 15 ans	< 10 ans
Période de suivi	7 à 10 ans	7 ans	8 ans		4 ans
Résultats bruts	74 leucémies 135 tumeurs cérébrales	3150 cancers 246 leucémies 283 tumeurs cérébrales	Etude exclusive des TDM cérébraux		27 tumeurs cérébrales 25 leucémies 27 lymphomes
Risque relatif	**x 3** (leucémie pour 50 mGy à la moëlle, soit 5 à 10 TDM)	**1,2** tous cancers (dose moëlle = 4,7 mGy)	**x 2,6** pour tumeurs bénignes (pas d'estimation de la dose au cerveau) **+ 30%** tous cancers	**1,87** tous cancers **Résultats non significatifs** pour leucémies et tumeurs cérébrales (dose moëlle = 11 mGy)	**Résultats non significatifs** pour leucémies et tumeurs cérébrales
Interprétation % LSS	Cohérent pour leucémie Incohérent pour tumeurs cérébrales	Cohérent pour leucémie Incohérent pour tumeurs cérébrales Incohérent pour tumeurs seins			

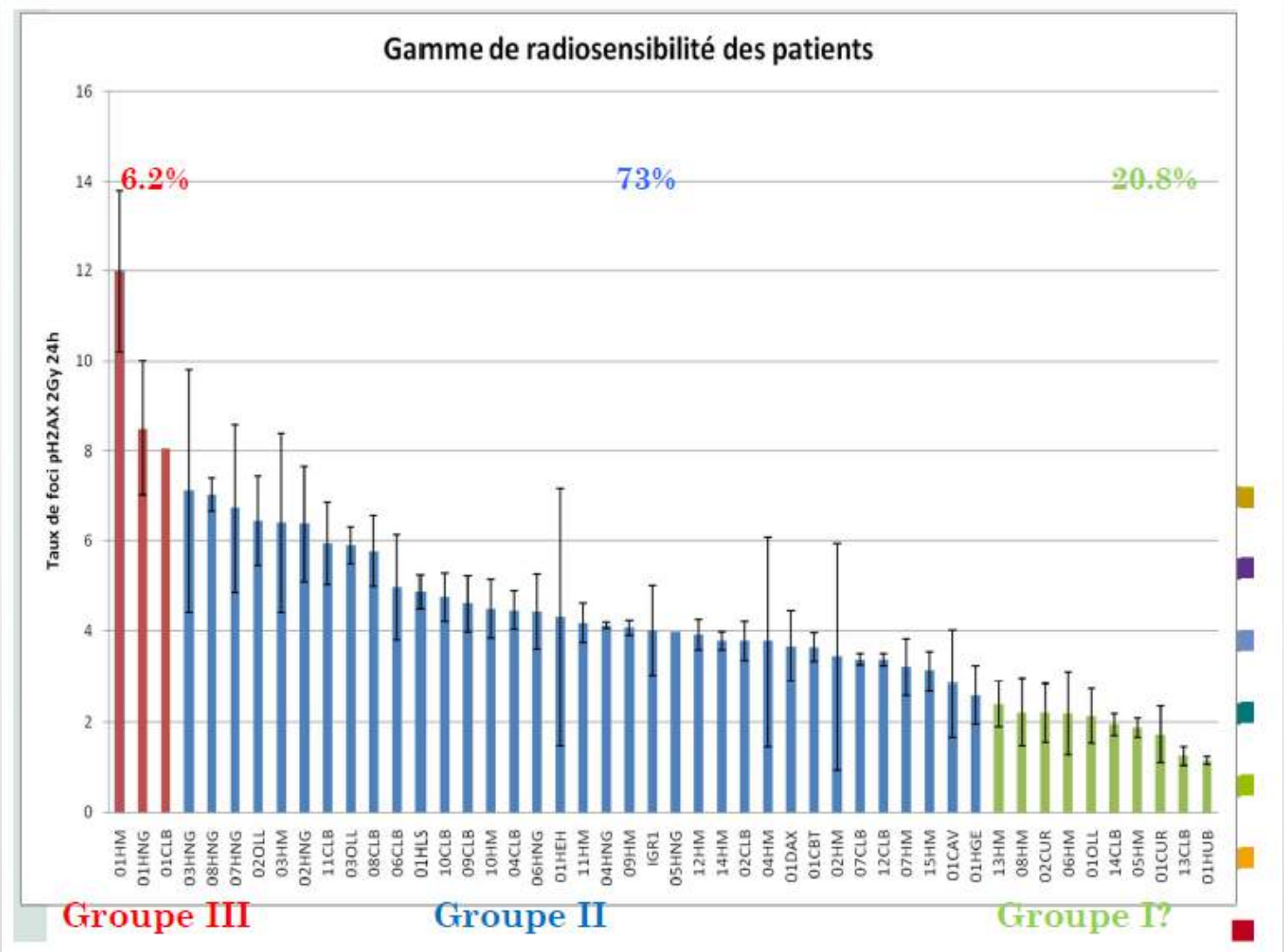
Dernières études épidémiologiques pédiatrie et jeune adulte

Les dernières avancées !



Actualisé en décembre 2014

Les dernières avancées !
Sensibilité individuelle aux rayonnements ionisants



Les dernières avancées !
Sensibilité individuelle aux rayonnements ionisants

- Connue pour les fortes doses depuis longtemps en radiothérapie (effets déterministes)

- Découverte récemment pour faibles doses (défaut réparation ADN) = effets stochastiques et risque cancer

- Concernerait 10 % de la population
- Mise en évidence très particulière enfant (thyroïde < 15 ans), glande mammaire en période prépubertaire et avant 40 ans)

Importance information professionnels de santé (demandeurs examens+++) sur sensibilité particulière enfants et jeune adulte aux RI

Les dernières avancées !
Scanner chez enfant et cancers radio-induits ? Hubert Ducou le Pointe

- Contexte : augmentation exposition médicale RI

2013 : scanner représente **2% actes** radiologiques pédiatriques mais **27% exposition** (IRSN)

- Effets biologiques des faibles doses reste sujet débat

Estimation nombre cancers radio-induits par TDM pédiatriques avec RLSS ne sont pas convaincants, voire polémique…

- 2001 : Brenner : 500 morts imputables aux TDM pédiatriques (sur 600 000 scanners)
- 2007 : Berrington de Gonzales et al : 29000 nouveaux cancers imputables aux scanners aux EU

Fait nouveau : épidémiologie pourrait démontrer effet faibles doses

Les dernières avancées !
Scanner chez enfant et cancers radio-induits ?

Population avec radiosensibilité particulière

Troubles réparation ADN (AT, maladie Fanconi....)
Certaines maladies héréditaires (polypose familiale, Sd Gardner...)
Certaines maladies à risque augmenté de cancer (neurofibromatose, Sd Li-Frauméni...)
Pathologies auto-immunes (sclérodermie...)

Populations avec explorations fréquentes dues à pathologie chronique

Balance bénéfice/risque

SYNDROMES GENETIQUES	GENE IMPLIQUE	ROLE DU GENE DANS LA REPARATION	SF2 (%)
Ataxie telangiectasie	ATM	Signalisation, contrôle NHEJ et MRE11	1-5
Syndrome Ligase IV	LIG4	NHEJ	2-6
Syndrome de Nimègue	NBS1	Voie MRE11	5-9
Progeria (Hutchinson-Gilford)	Lamin A	transport d'ATM	8-19
Ataxie telangiectasie (mutations homozygotes variantes)	ATM	Signalisation, contrôle NHEJ et MRE11	10-15
Syndrome d'Usher	Gènes USH	?	15-20
Syndrome de Cockayne	Gènes CS	Hélicases, nucléases NER	15-30
Xeroderma Pigmentosum	Gènes XP	Hélicases, nucléases NER	15-30
Syndrome ATLD	MRE11	Endonucléase, Voie MRE11	15-40?
Chorée de Huntington	IT15	?	18-30
Syndrome de Gardner	APC ?	MMR?	20-30
Syndrome de Turcot	hMSH2 ?	MMR?	20-30
Anémie de Fanconi et BRCA2	Gènes FANC	Protéine support	20-40
Syndrome BRCA1	BRCA1	Protéine support	20-40
Syndrome Artémis	Artémis	NHEJ	20-40
Syndrome Cernunnos	XLF/Cernunnos	NHEJ	20-40
Syndrome d'Omenn	RAG1, RAG2	NHEJ ?	30-50 ?
Syndrome Rothmund-Thomson	RecQ4	Hélicase	30-50
Syndrome de Werner	WRN	Hélicase	30-50
Syndrome de Bloom	BLM	Hélicase	30-50
Syndrome de Seckel	ATR	Signalisation	60-80
Témoins radiorésistants		60-80	60-80

% survie à 2 Gy

Les dernières avancées !
Le cas des mammographies, Catherine Colin

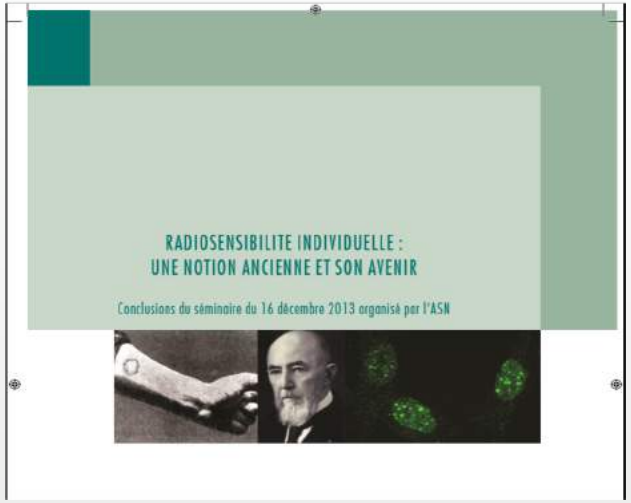
Contexte

- Examen de dépistage, donc population en majorité indemne de pathologie mammaire (justification +++)
- Dépistage controversé
- Lien entre cancer et RI démontré

  Pour population mutée BRCA 1 ou 2

  Sein = organe le plus radiosensible

  Radiosensibilité inversement proportionnel à âge



Questions

- Les RI induisent elles cancers ?
- Existe-t-il populations à risque y compris pour doses à organe de 2 mGy ?

RECHERCHE

Cancer du sein

Les mammographies ne laissent pas l'ADN indifférent

Les irradiations mammographiques induisent-elles des dommages dans l'ADN des cellules épithéliales mammaires ? C'est une des questions auxquelles a tenté de répondre une équipe de chercheurs français dans une étude publiée dans l'*International Journal of Radiation Biology* [1].

Etude radiobiologique ex-vivo

Mise en culture cellules épithéliales mammaires (biopsie 30 femmes dont 19 à faible risque et 11 à haut risque)

Reproduction conditions mammographie dépistage (2 clichés/sein, soit DGM de 2 mGy/sein)

DNA double-strand breaks induced by mammographic screening procedures in human mammary epithelial cells

Catherine Colin [1, 2], Clément Devic [3], Alain Noel [4, 5], Muriel Rabilloud [2, 6], Marie-Thérèse Zabot [2], Sylvie Pinet-Isaac [2], Sophie Giraud [7], Benjamin Riche [6], Pierre-Jean Valette [2], Claire Rodriguez-Lafrasse [1, 2, 8], Nicolas Foray [3] Détails

1 Laboratoire de Radiobiologie Cellulaire et Moléculaire

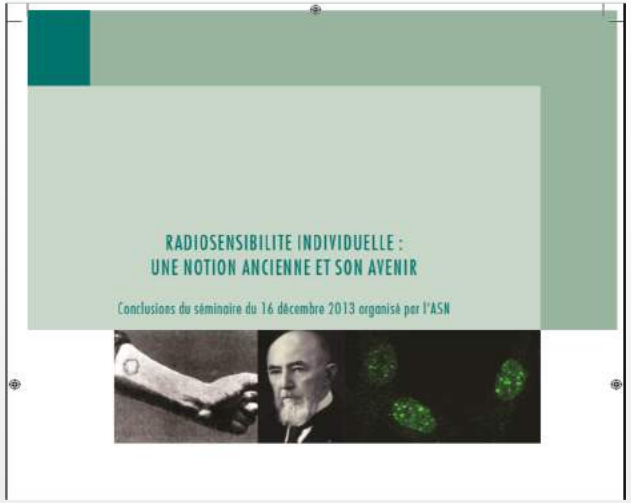
Les dernières avancées !
Le cas des mammographies, Catherine Colin

Résultats

Dommages existent dès 2 mGy

Effet-dose (défauts réparation à 24h)

Effet dose faible et répétée = plus de dommage avec 2 + 2 mGy qu'avec 4 mGy (les cassures double brin n'ont pas le temps de se réparer avant 2ème dose)



Incidence dans prise en charge des femmes à haut risque

Colin C et all. DNA double stand breast induced by mammographic screening procedures in human mammary epithelial cells, international journal of Radiation Biology, 2011, 87 : 1103-12

Annals of Internal Medicine

ORIGINAL RESEARCH

Radiation-Induced Breast Cancer Incidence and Mortality From Digital Mammography Screening

A Modeling Study

Diana L. Miglioretti, PhD; Jane Lange, PhD; Jeroen J. van den Broek, MSc; Christoph I. Lee, MD, MSHS; Nicolien T. van Ravesteyn, PhD; Dominique Ritley, MPH; Karla Kerlikowske, MD; Joshua J. Fenton, MD, MPH; Joy Melnikow, MD, MPH; Harry J. de Koning, PhD; and Rebecca A. Hubbard, PhD

Ann Intern Med. 2016;164:205-214. doi:10.7326/M15-1241 **www.annals.org**
For author affiliations, see end of text.
This article was published at www.annals.org on 12 January 2016.

Patients: Women aged 40 to 74 years.

Intervention: Annual or biennial digital mammography screening from age 40, 45, or 50 years until age 74 years.

Conclusion: Radiation-induced breast cancer incidence and mortality from digital mammography screening are affected by dose variability from screening, resultant diagnostic work-up, initiation age, and screening frequency. Women with large breasts may have a greater risk for radiation-induced breast cancer.

Les dernières avancées !
Prédisposition génétique risque cancer et susceptibilité individuelle aux RI

- Pas de gène connu spécifiquement impliqué dans cancers radio-induits

- Il existe facteurs de risques génétiques pour certaines tumeurs (ostéosarcome, cancer de la peau, lymphome)

- Existence susceptibilité individuelle face à une exposition aux rayonnements (mécanismes non identifiés).

Les dernières avancées !
Prédisposition génétique risque cancer et susceptibilité individuelle aux RI

- RLSS ne reflète pas forcément la réalité
- Mais absence argument suffisant pour remettre en question son l'utilisation car

- Ce qui n'est pas visible en population n'empêche pas la possibilité d'atteinte de certains individus

- Résultats ne sont pour le moment obtenus qu'au niveau cellulaire

- Recherches indispensable à échelle tissulaire et de l'organisme

Effets biologiques des rayonnements ionisants sur l'homme

Conclusion

THOMAS LEMOINE

FORCOMED
Association de formation des médecins spécialistes et de leurs collaborateurs

Conclusion : positionner les effets déterministes et stochastiques

- Symptômes aiguës (qq jours–semaines)
  - Exposition globale unique à forte dose (>1Gy) — Perturbation NFS, nausées, asthénie, diarrhées…
  - Exposition localisée à forte dose (>3Gy) — Erythème cutané, perte cheveux-poils, stérilité
- Effets sur embryon-foetus
  - Pré-implantatoire (J0-J8) (>>100mGy) — Fausse couche
  - Organogénèse (J9-S9à25) (>>100mGy) — malformation
- Effets à long terme
  - Cataracte
  - Leucémie
    Cancer
- Effets héréditaires — Pas d'observation clinique chez l'homme

Effets déterministes

Effets stochastiques

Reconnaitre les composants des risques inhérents aux RI dans le domaine médical

MODULE 1.3

ALAIN NOEL, PHYSICIEN MÉDICAL

Objectif pédagogique :
Identifier les risques associés aux RI

Contenu :

- Notion de bénéfice/risque & risques associés par rapport aux autres risques dans le domaine médical
- Expositions médicales par rapport aux autres sources d'exposition

Objectifs

- Être capable de :
  - Identifier la notion de bénéfice/risque liée aux expositions à des fins médicales et la positionner par rapport aux autres risques dans le domaine médical
  - Détailler l’exposition médicale et la comparer aux autres sources d’exposition aux RI
  - Identifier les actes à risques

Notion de bénéfice/risque

Perception du risque

- La perception du risque est sensible à une variété de facteurs psychologiques et sociaux et peut être subjective voire irrationnelle
  - Avion vs automobile
  - Anesthésie
- Malgré les efforts constants pour rendre nos vies plus sures :
  - Principe de précaution
  - Progrès médicaux
  - Accès illimités à l’information
  - …

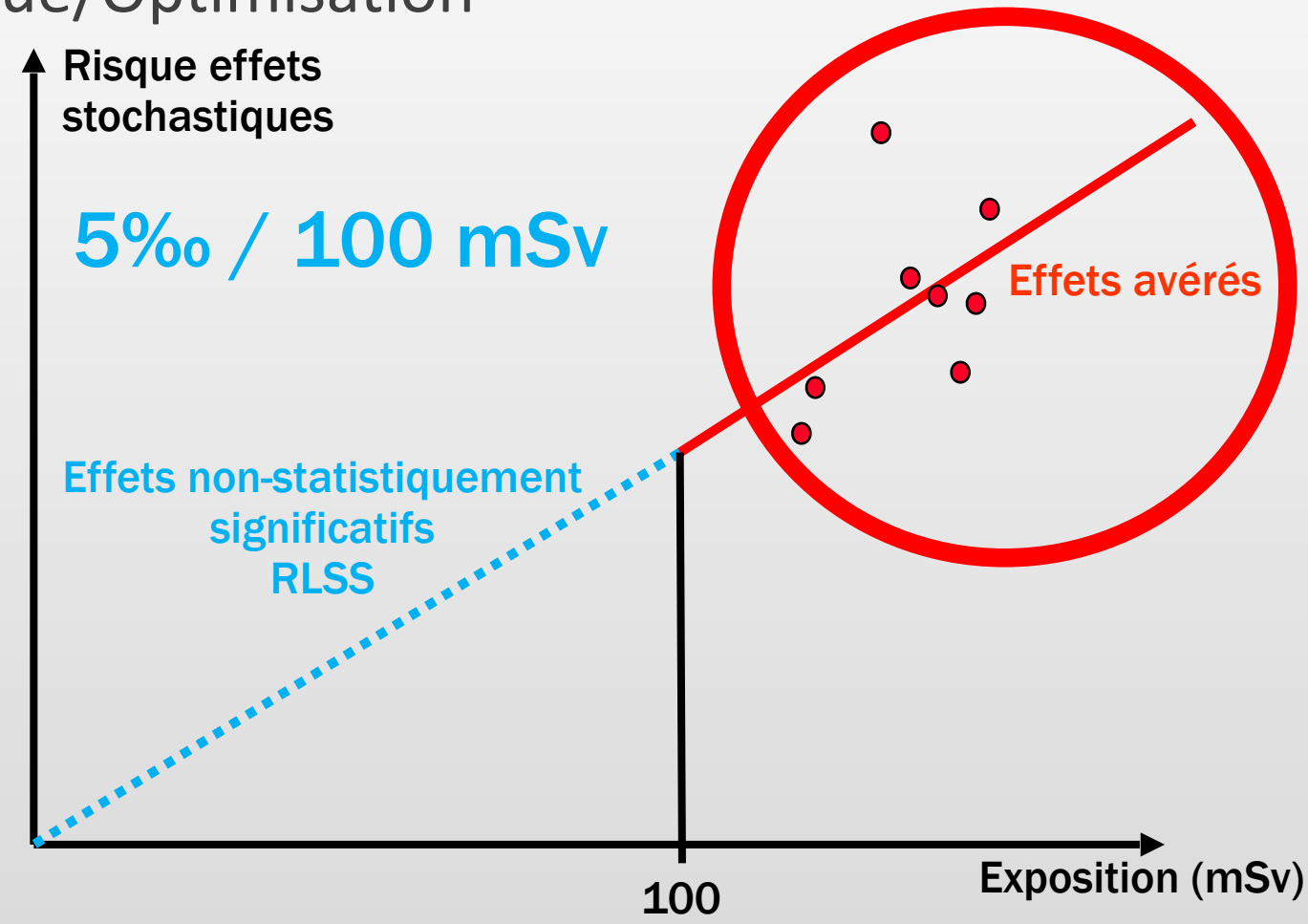
On constate une préoccupation grandissante du risque

Notion Bénéfice/Risque

- Bénéfice/Risque (Justification)
  - Garantir que les avantages que procure une pratique sur le plan individuel ou pour la société l'emportent sur le détriment qu'elle pourrait causer
    - Bénéfices :
      - Prise en compte des risques et avantages que présentent d'autres techniques, moins irradiantes, non-irradiantes (substitution)
      - Nombreux exemples de bénéfices nets pour le patient (urgences, suivi de traitement, …)
      - Réponse à une question clinique
    - Risques :
      - Théoriquement faible, le risque ne peut toutefois pas être négligé
      - S'il n'est pas nul mais il faut aussi prendre en compte le risque de ne pas faire l'examen
  - Le patient reçoit les informations adéquates sur les avantages et les risques liés à la dose absorbée résultant de l'exposition à des fins médicales

Notion Bénéfice/Risque

- Risque/Optimisation



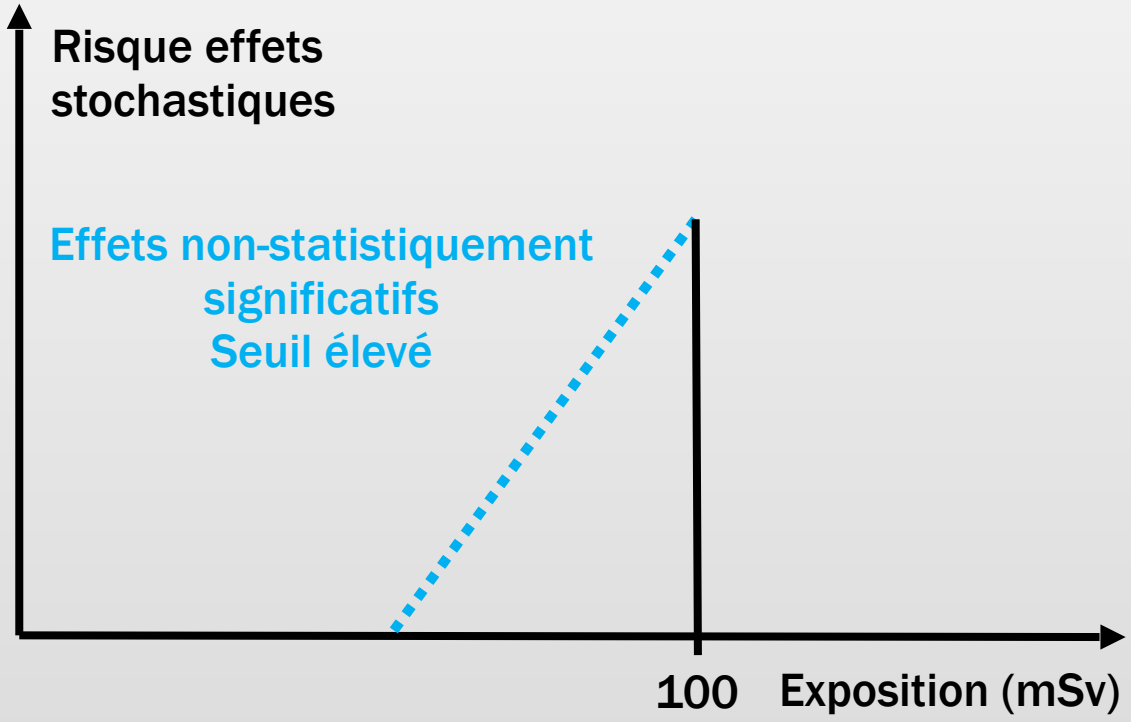
8

Exposition médicale : 1,6 mSv/an

- Avec un risque de décès de 5‰ pour 100 mSv (CIPR)
- Exposition médicale 1,6 mSv/an
- Population française de 66,5 millions d'individus
- Estimation du **risque hypothétique** :
  - Entre 0 et 5 300 décès (> 3 700 CT et < 1 000 RD)

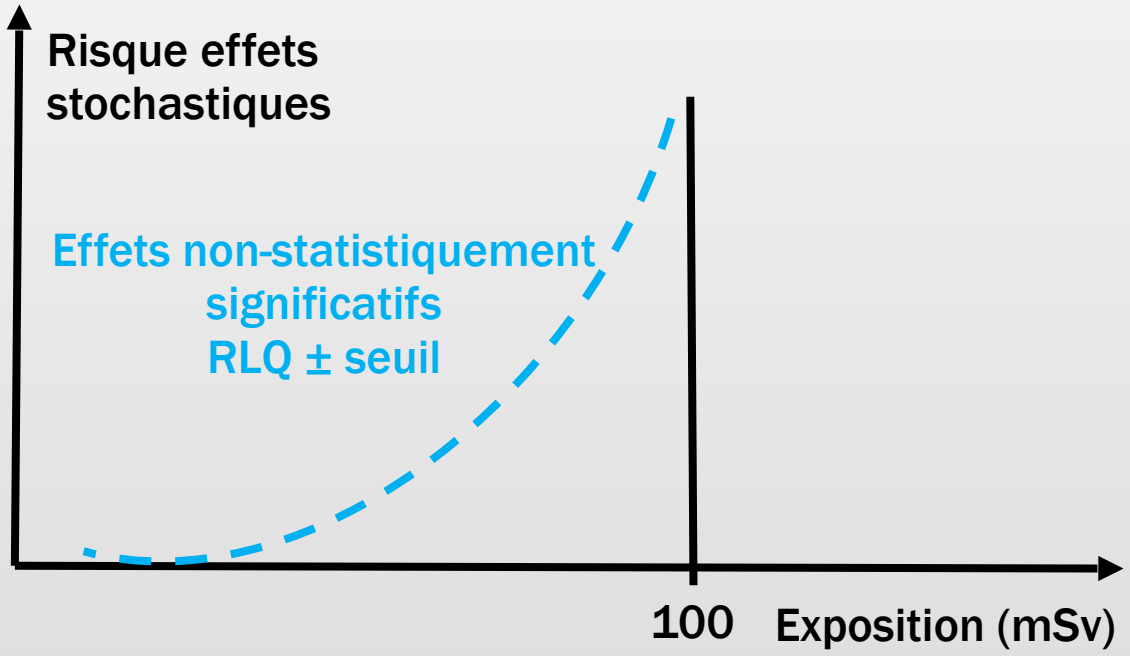
Notion Bénéfice/Risque

- Risque nul/très faible (pas ou peu de décès) : pas d'effet des faibles doses (seuil élevé, hormésis, …)



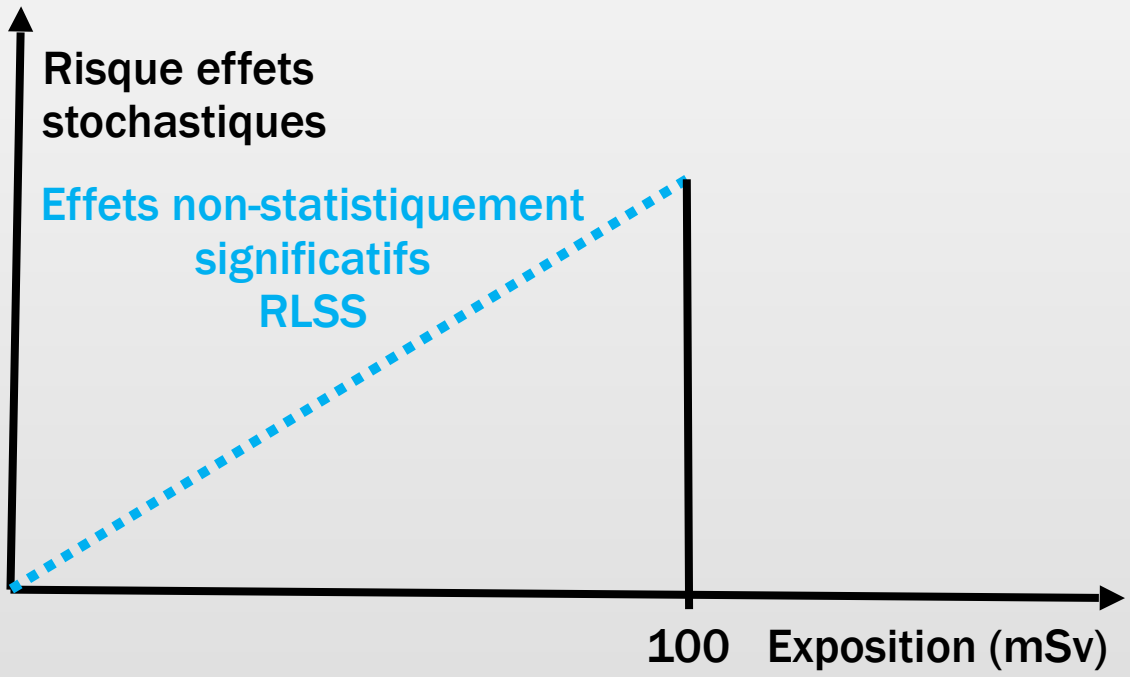
Notion Bénéfice/Risque

- Risque intermédiaire (de 0 à 5 300 décès) : suivant la valeur du seuil, la relation dose-effet non linéaire (linéaire quadratique, …)



Notion Bénéfice/Risque

- Risque maximal (5 300 décès) : dans le cas de l'extrapolation RLSS



12

Notion Bénéfice/Risque

- **Optimisation**
  - **Obtenir l'information médicale** requise pour une exposition la plus faible que raisonnablement possible
  - En pratique :
    - Choix de l'équipement et formation des utilisateurs
    - Procédures radiologiques : Guide des procédures radiologiques de la SFR
    - Appel de manière approprié à un Physicien Médical
    - Assurance de qualité y compris le contrôle de qualité
    - Évaluation et analyse des doses délivrées : NRD
    - Déclaration des expositions accidentelles et non intentionnelles : Guide n°11 de l'ASN

Notion Bénéfice/Risque

- Autres risques dans le domaine médical
  - Infections nosocomiales
    - 5% des patients hospitalisés soit 600 000 personnes/an (InVS-2006)
    - 4 000 décès/an soit **0,30‰**
  - Anesthésie
    - 1 décès/140 000 anesthésies (**0,007‰)** – cause principale à 60% étant l'allergie au curare
  - Produit de Contraste
    - PdC ionique – Haute osmolalité
      - Réactions 13%
      - Décès **0,012‰**
    - PdC non ionique – Basse osmolalité
      - Réactions 3%
      - Décès **0,004‰**

Notion Bénéfice/Risque

Risque de décès par …	
AVP piéton	1,6 ‰
Noyade	0,9 ‰
Cancer dû à scan TAP (10 mSv)	0,5 ‰
Infections nosocomiales	0,3 ‰
Cancer dû Expositions médicales (3,6 mSv*)	0,2 ‰
Injection PdC	0,012 – 0,004 ‰
Anesthésie	0,007 ‰

** Exposition moyenne annuelle de la population exposée*

L'essentiel

- La perception du risque peut-être subjective voire irrationnelle
- Risque dû aux faibles doses (< 100 mSv) est estimé par une relation linéaire sans seuil à partir des risques avérés aux doses élevées (> 100 mSv)
- Risque de décès est estimé à 5‰ pour 100 mSv (CIPR)
- Risque dû à l'exposition médicale arrive loin derrière les AVP piéton, les noyades par exemple

24 October 2025 - FORCOMED

Actes à risque

Actes à risque

- Existe-t-il des actes radiologiques présentant des expositions conséquentes au-delà du seuil des effets déterministes ?
  - Les actes complexes de radiologie interventionnelle principalement en cardiologie, rythmologie et neuroradiologie
  - Les scanners de perfusion
- Voyons cela sur 2 exemples

Un exemple : Angioplastie

- En bref : Homme de 69 ans, 2 angioplasties de l'artère coronaire G en moins de 48h.

- Ulcération au niveau de la zone de recouvrement des incidences pratiquées *(Photo prise 1 à 2 mois après les interventions)*

Un exemple : Scanner de perfusion

- En bref : scanner de perfusion cérébrale, 206 patients ont reçu des doses comprises entre 3 – 4 Gy (dose max normale attendue 0,5 Gy)

- Alopécie temporaire (dose < 6 Gy)

Et la tératogenèse ?

- Risque déterministe avec un seuil bas habituellement retenu de 100 mSv
- Un examen radiologique ne délivre de dose significative (> 10 mSv) que si le volume exploré contient l'utérus.
- Si l'utérus est dans le champ, en général, la dose équivalente est :
  - En radiologie (UIV, Hystérographie, …) : < 30 mSv
  - En scanographie :
    - < 12 - 15 mSv/séquence (TAP, AP)
    - < 45 mSv/séquence pour le rachis lombaire (RL)

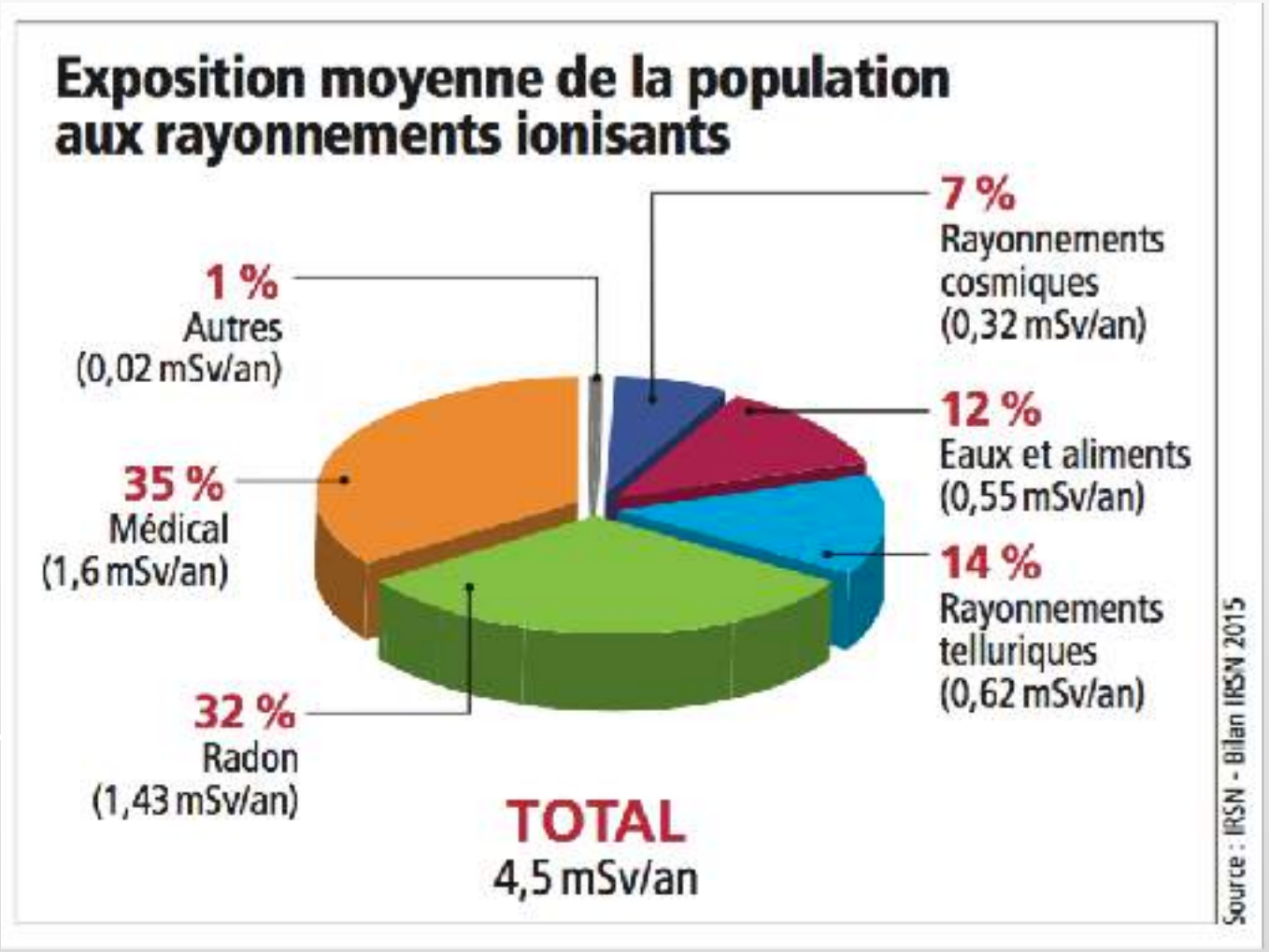
Exposition médicale et autres sources d'exposition

Exposition moyenne de la population aux RI

Totale* : 4,5 mSv/an moy

- Naturelle :
  2,9 mSv/an (≈ 65%)

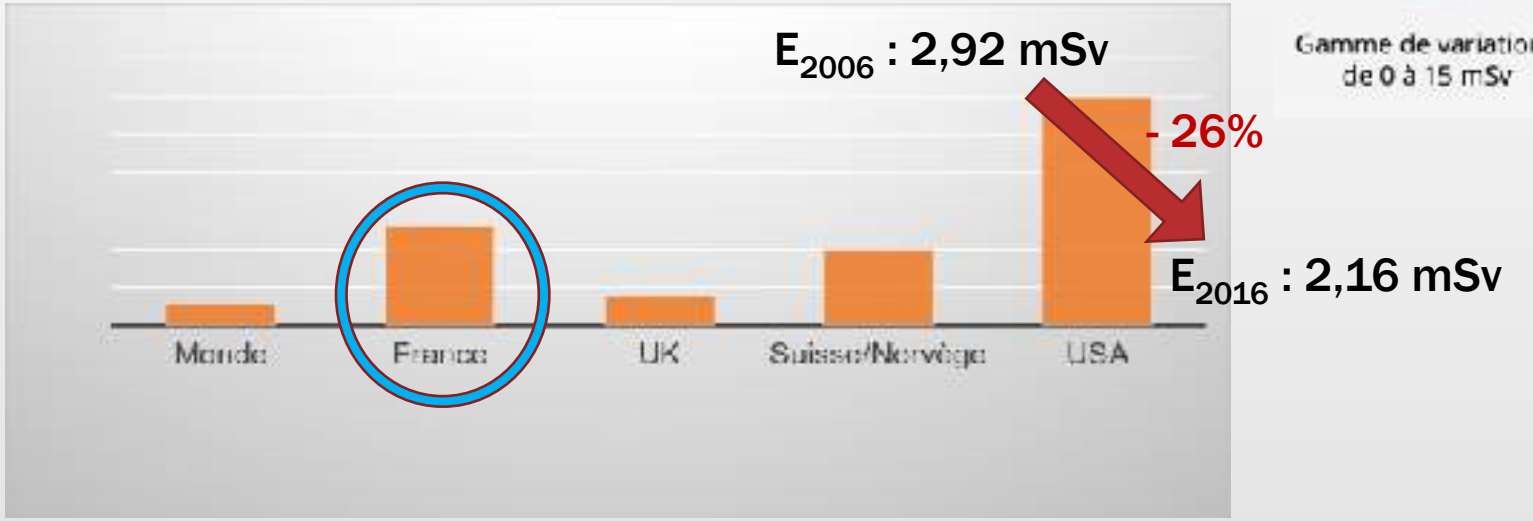
- Artificielle :
  1,6 mSv/an (≈ 35%)



Exposition naturelle : 2,9 mSv/an

Exposition artificielle :1,62 mSv/an

- Exposition Médicale : 1,6 mSv/an/habitant (≈ **35%)**



- *Autres (industrielles et militaires) : 0,02 mSv/an (1%)*
  - *Tests d'armes nucléaires (520 tirs aériens)*
  - *Rejets des installations nucléaires (CPN, INB, INBS)*
  - *Accidents nucléaires : Kysthym, Winscale, TMI, Tchernobyl, Fukushima*

Exposition médicale : 1,6 mSv/an

- Dose moyenne/an/habitant = 1,6 mSv

1,6 mSv (2015)

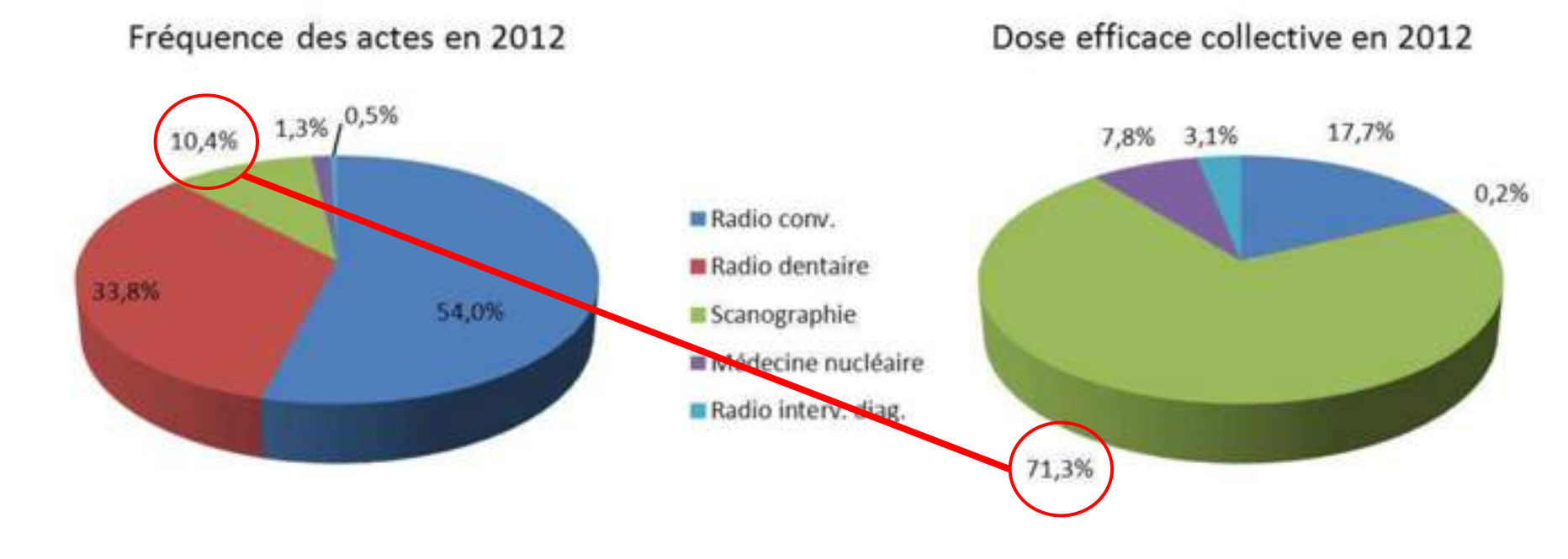
+ 23%

1,3 mSv (2007)

- **Dose moyenne/an/individu exposé = 3,6 mSv**

E annuelle individuelle	Proportion (%)
< 1 mSv	70%
1 – 10 mSv	18
10 – 50 mSv	11
> 50 mSv	1

Exposition médicale* : 1,6 mSv/an



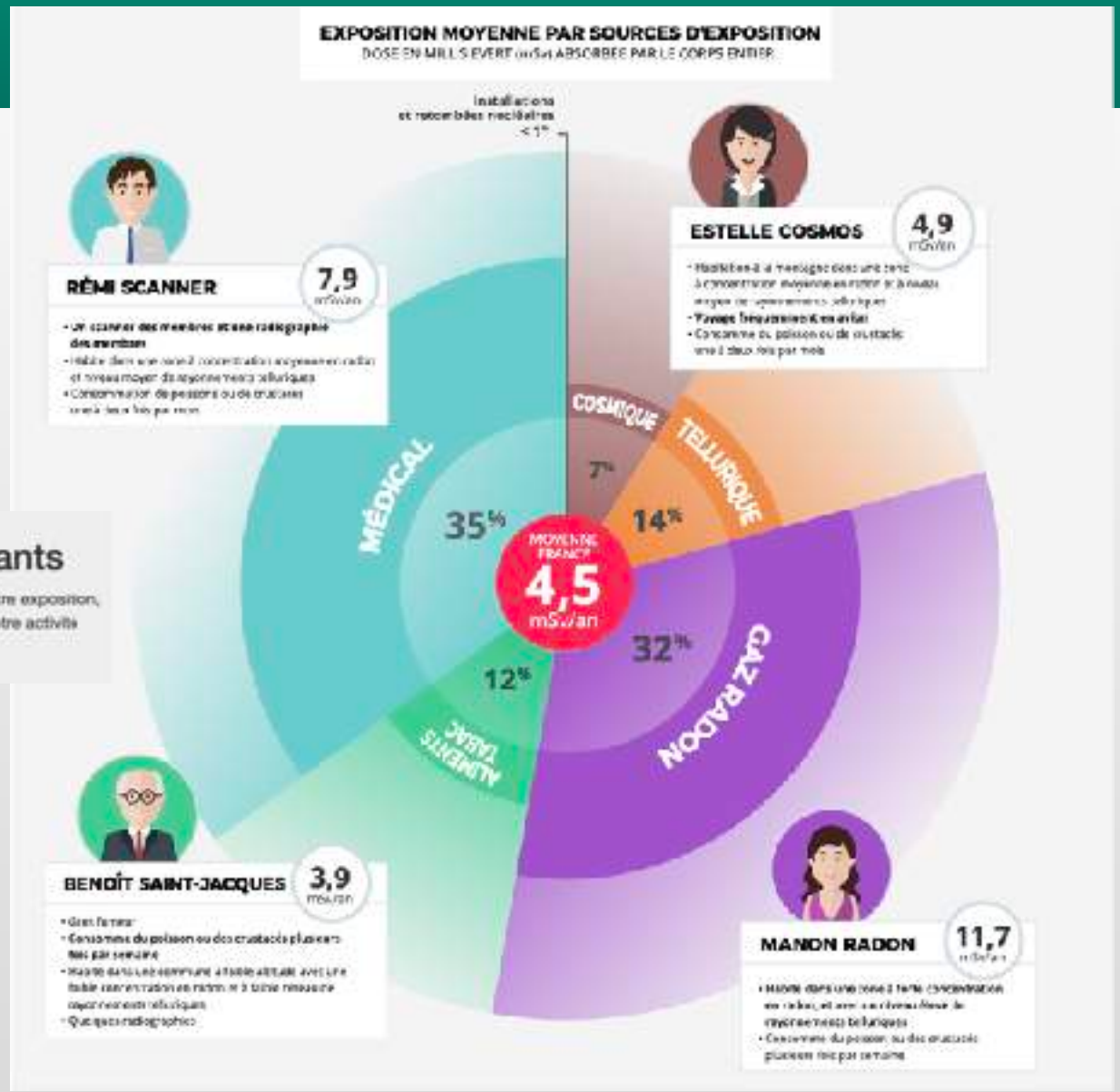
IRSN – Exposition médicale aux RI en 2012

Exposition artificielle : 1,62 mSv/an

- *Exposition Médicale : 1,6 mSv/an/habitant (35%)*
- **Autres (industrielles et militaires) : 0,02 mSv/an (1%)**
  - Tests d'armes nucléaires (520 tirs aériens)
  - Rejets des installations nucléaires (CPN, INB, INBS)
  - Accidents nucléaires : Kysthym, Winscale, TMI, Tchernobyl, Fukushima

Le complexe industriel de Maïak (Russie)
1957 : 100 Tonnes libérées dans l'atmosphère

Mais tous différemment



Estimez votre exposition aux rayonnements ionisants

Cette estimation ne peut être considérée que comme une valeur indicative fournissant un ordre de grandeur de votre exposition, compte tenu des données qui ont été renseignées. Elle ne couvre pas l'exposition pouvant être reçue lors de votre activité professionnelle.

expo.irsn.fr

Quelques sources d'exposition pour l'homme	E (mSv)
Uro-scan	30-40
Scanner TAP	8-10
Scintigraphie cardiaque dynamique	6
Irradiation naturelle/an en France	2,9
À 3660 m d'altitude à La Paz (Bolivie)	2
Exposition médicale moyenne	1,6
Radon en France	1,4
Irradiation à bord de ISS	1
Vol AR Paris – Tokyo	0,1
Radiographie dentaire	0,006
Rejet centrales nucléaires	0,002

À retenir 1/2

1. Le risque de décès liés aux faibles doses, estimé théoriquement à partir d'une extrapolation linéaire sans seuil, est de 5‰ / 100 mSv
2. L'exposition d'origine médicale a augmenté de façon importante. Elle est de 1,6 mSv/an pour la population et de 3,6 mSv/an/individu exposé (≈ 0,6 mSv/an en radiologie et ≈ 2,4 mSv/an en scanographie)
3. Le scanner contribue à plus de 70% à la dose efficace collective

À retenir 2/2

4. Il existe peu d'actes délivrant des expositions conséquentes pour lesquels le seuil des effets déterministes pourrait être dépassé (Radiologie interventionnelle, scanner de perfusion)

5. Le risque tératogène ne peut exister que si l'utérus est directement exposé. Il faut être vigilant car le seuil de 100 mSv pourrait être dépassé en scanographie (RL, TAP, AP)

Merci pour votre écoute

Reconnaitre les composants des risques inhérents aux RI dans le domaine médical

MODULE 1.4

ALAIN NOEL, PHYSICIEN MÉDICAL

Objectif pédagogique :
Identifier les risques associés aux RI

Contenu :

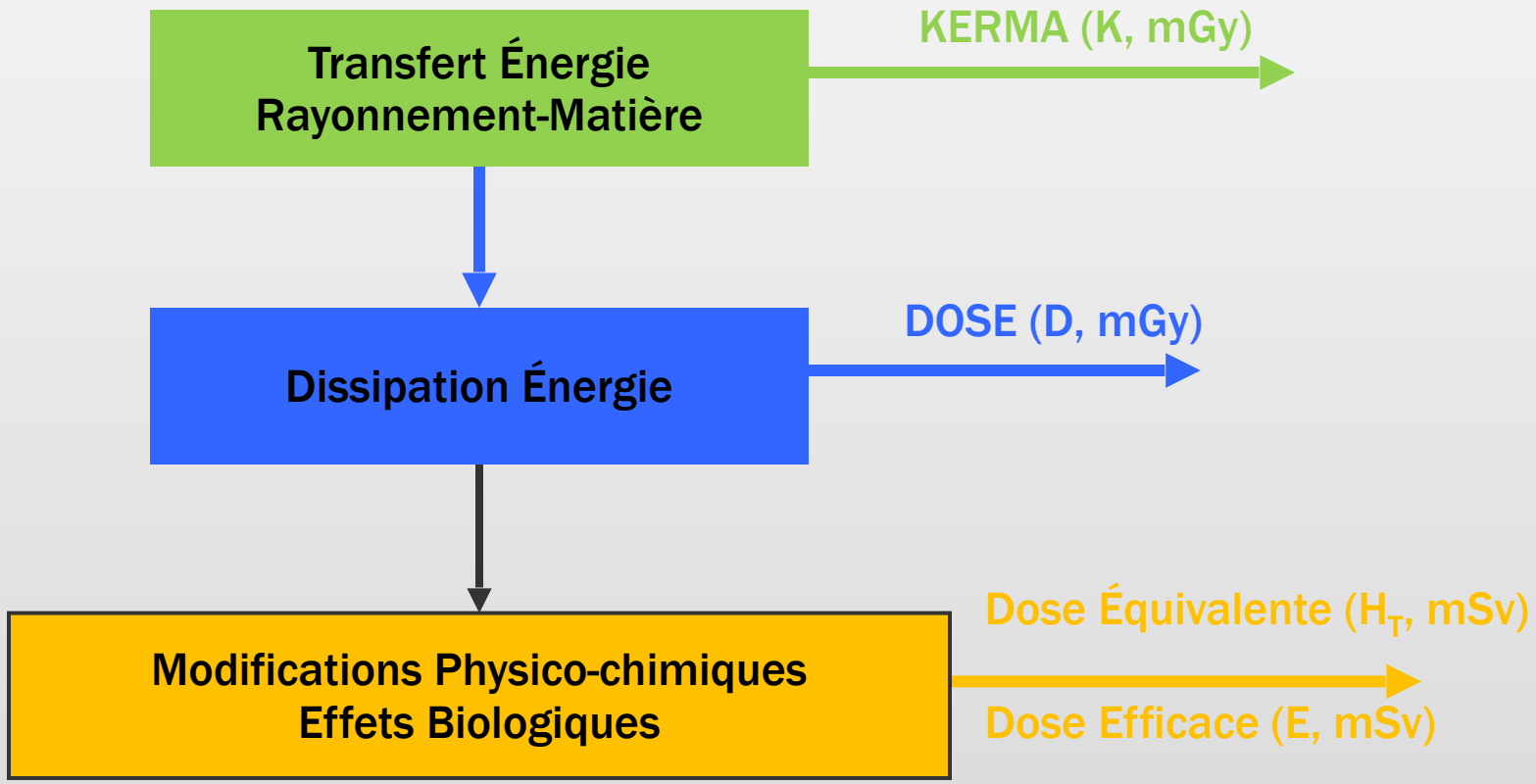
- Grandeurs et unités en RP
- Évaluation des doses en RC et CT

Objectifs

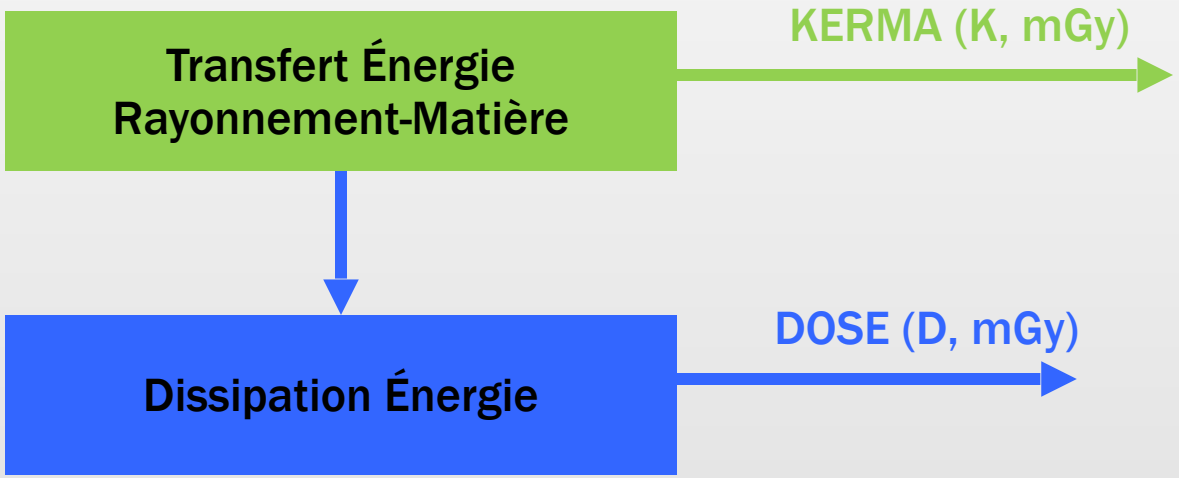
- Être capable de :
  - Décrire les grandeurs et unités utilisées en radiologie et en radioprotection
  - Évaluer les doses délivrées en radiologie conventionnelle et tomodensitométrie

Grandeurs et unités en radiologie et en radioprotection

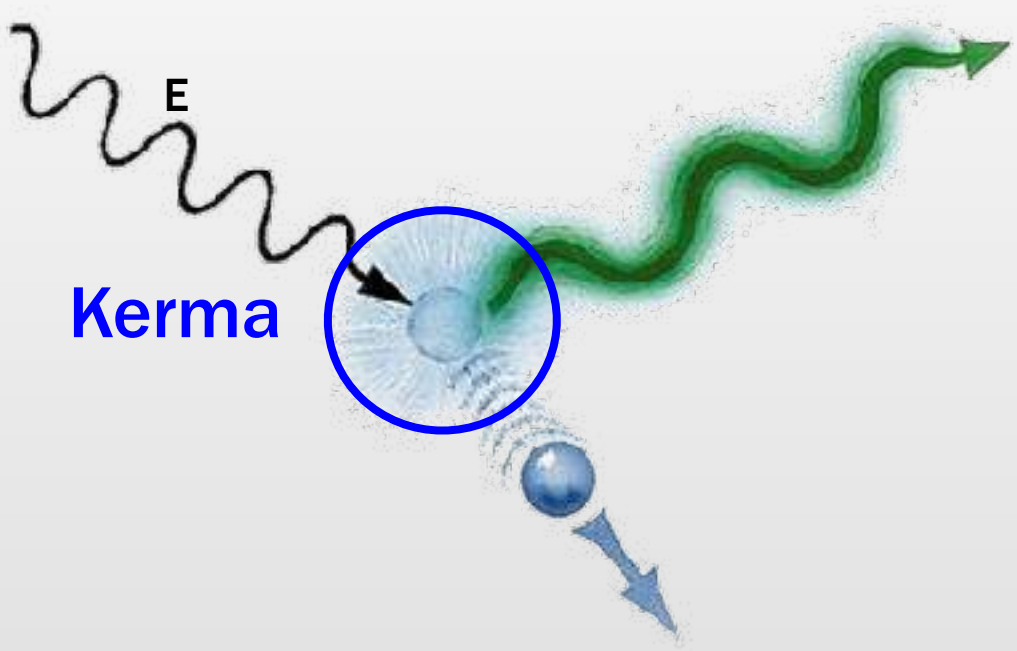
Interaction Rayonnement-Matière



Interaction Rayonnement-Matière

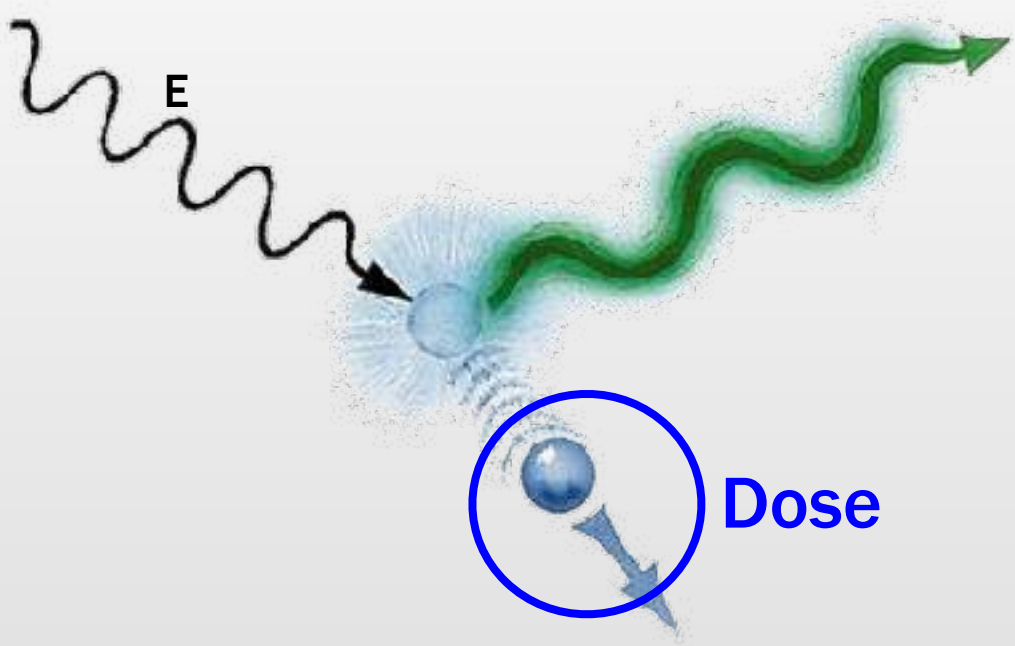


Grandeurs dosimétriques



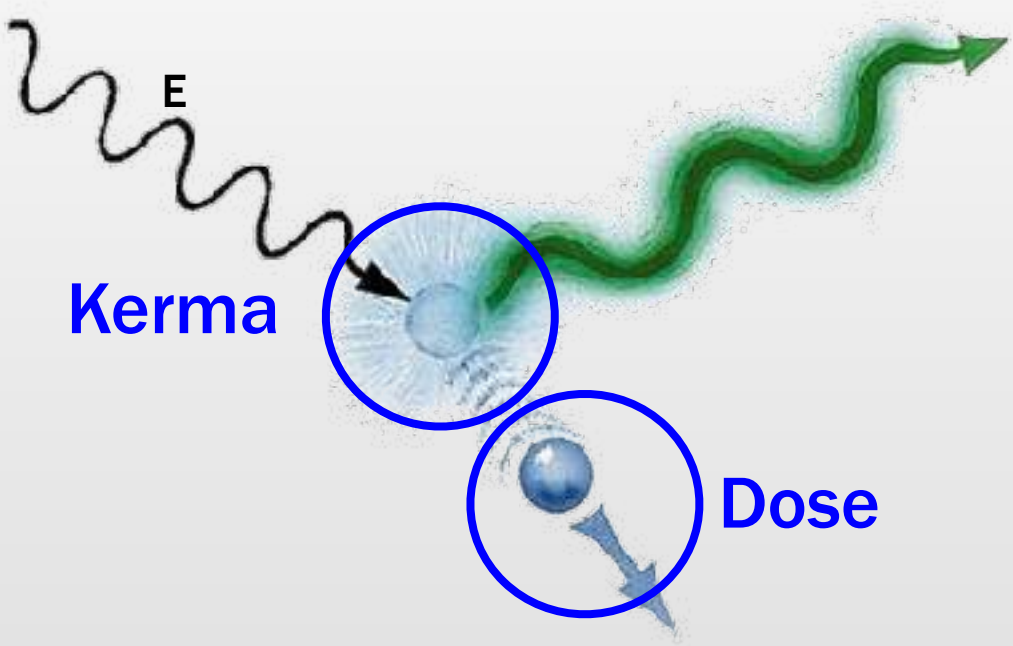
$$\text{Kair (mGy)} = dE_{tr}/dm$$

Grandeurs dosimétriques



$$\text{Dair (mGy)} = dE_{abs}/dm$$

Grandeurs dosimétriques

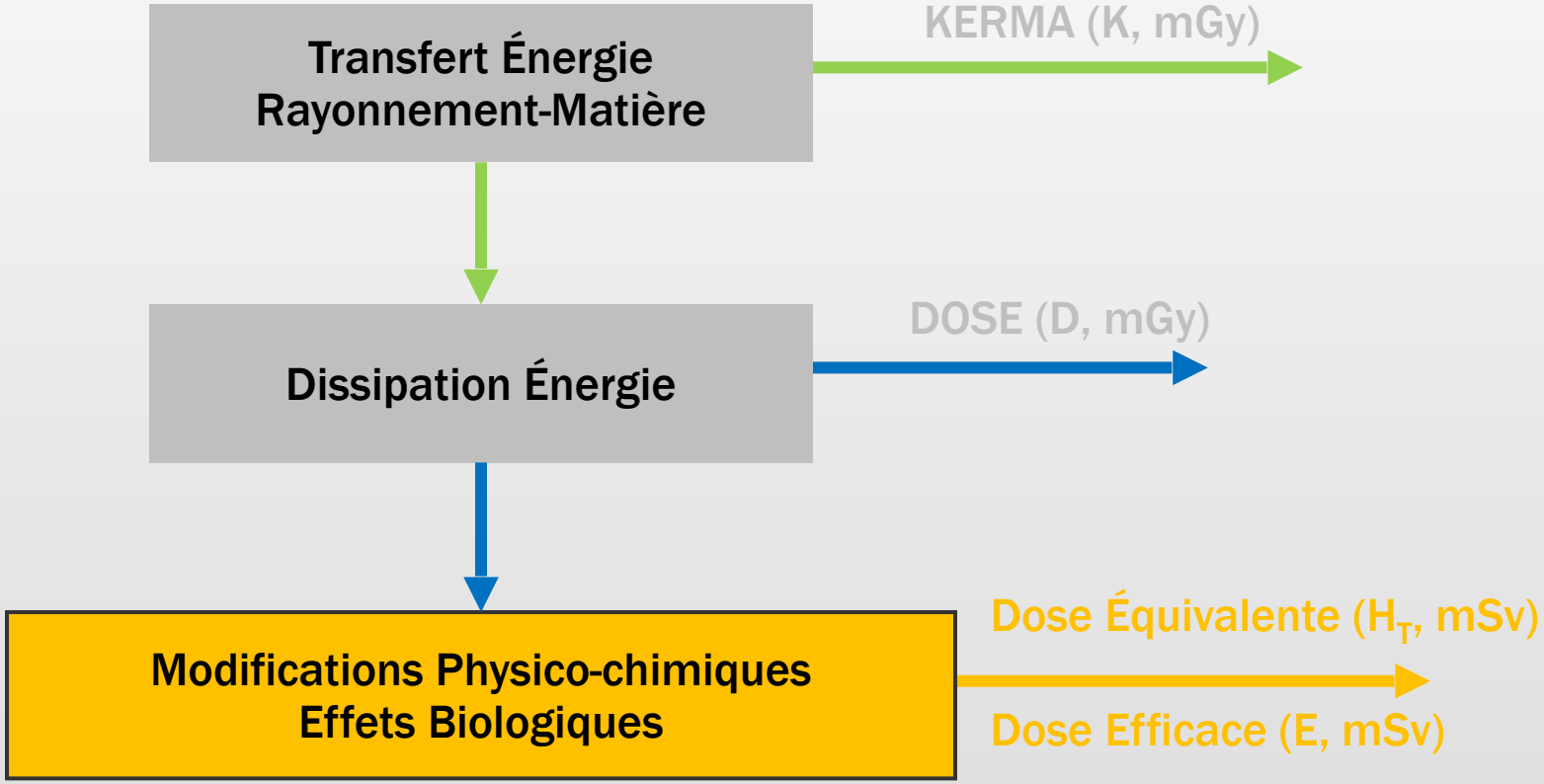


En radiologie : Kair (mGy) = Dair (mGy)

L'essentiel

- Des interactions rayonnement-matière résultent :
  - L'énergie transférée au milieu (**Kerma, mGy**) qui conduira au dépôt de dose (**Dose absorbée, mGy**)
  - Le rayonnement diffusé qui provoque :
    - Dégradation de la qualité image
    - Exposition à distance de la zone anatomique explorée
    - Risque d'exposition des opérateurs à proximité des patients (procédures interventionnelles radioguidées (PIR))

Interaction Rayonnement-Matière



Grandeurs de Protection (mSv)

- **Dose équivalente** au tissu ou à l'organe (mSv)

$$H_T = D_{T,R} \times w_R$$

- **Dose efficace** relative au corps entier (mSv)

$$E = \sum w_T \times H_T$$

Aucune des deux grandeurs n'est mesurable

Grandeurs de Protection : Dose Équivalente (H_T mSv)

Effet biologique = f(dose, qualité rayonnement, ...)

«nocivité relative des rayonnements»

$$H_T = D_{T,R} \times w_R$$

Rayonnement	W_R CIPR 60 (1990)	W_R CIPR 103 (2007) (1)
X, γ, électrons	1	1
Protons	5	**2**
Neutrons	Fonction discontinue : 5 à 20	**Fonction continue (E)**
Particules α	20	20

(1) *[Wrixon 2008]*

Grandeurs de Protection : Dose Équivalente (H_T mSv)

- **Exemples :**
  - Scanner cérébral : D_{abs} moyenne dans le volume exploré= 40 mGy
    - $H_{Cerveau}$ = 40 mSv
  - Scanner Thoraco-Abdomino-Pelvien : D_{abs} moyenne dans le volume exploré = 10 mGy
    - $H_{Poumons}$, H_{Seins}, $H_{Oesophage}$, $H_{Estomac}$, H_{Foie}, H_{Colon}, … = 10 mSv

Grandeurs de Protection : La Dose Efficace (E, mSv)

Dose fictive, qui serait uniformément délivrée au corps entier et qui causerait le même dommage global que la distribution non uniforme des doses réelles délivrées aux différents tissus/organes exposés.

$$E = \Sigma_T \, w_T . H_T$$

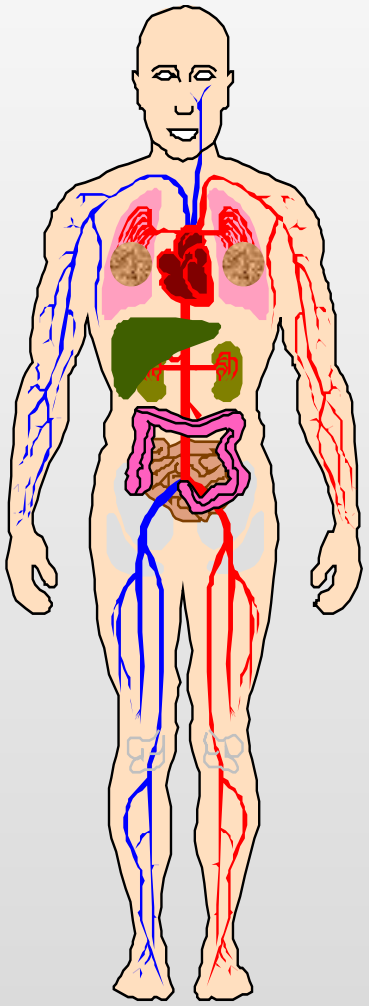
w_T : facteur de pondération tissulaire

- toutes les modalités d'exposition
- tous les rayonnements ionisants
- exposition externe ou interne
- expositions globales ou partielles

E ne concerne que les effets stochastiques

- Hypothèses, Approximations, Simplifications
- Valide aux faibles doses < 100 mSv
- Exprimée pour un individu de référence
- Conçue pour les travailleurs
- Probabilité de détriment et non d'effet
- Ne peut pas être utilisée pour estimer un risque individuel

W_T : facteurs de pondération tissulaire



Tissu ou Organe	Arrêté du 01/09/03 (CIPR 60)	CIPR 103 (2007) (1)
Cerveau	-	**0.01**
Glandes salivaires	-	**0.01**
Thyroïde	0.05	0.04
Poumons	0.12	0.12
Seins	0.05	**0.12**
Œsophage	0.05	0.04
Estomac	0.12	0.12
Foie	0.05	0.04
Côlon	0.12	0.12
Vessie	0.05	0.04
Gonades	0.20	**0.08**
Peau	0.01	0.01
Moelle osseuse (rouge)	0.12	0.12
Surfaces osseuses	0.01	0.01
Reste de l'organisme	0.05	**0.12**

Influence des nouveaux facteurs

- E_{Thorax} : augmentation
- E_{AP} : diminution

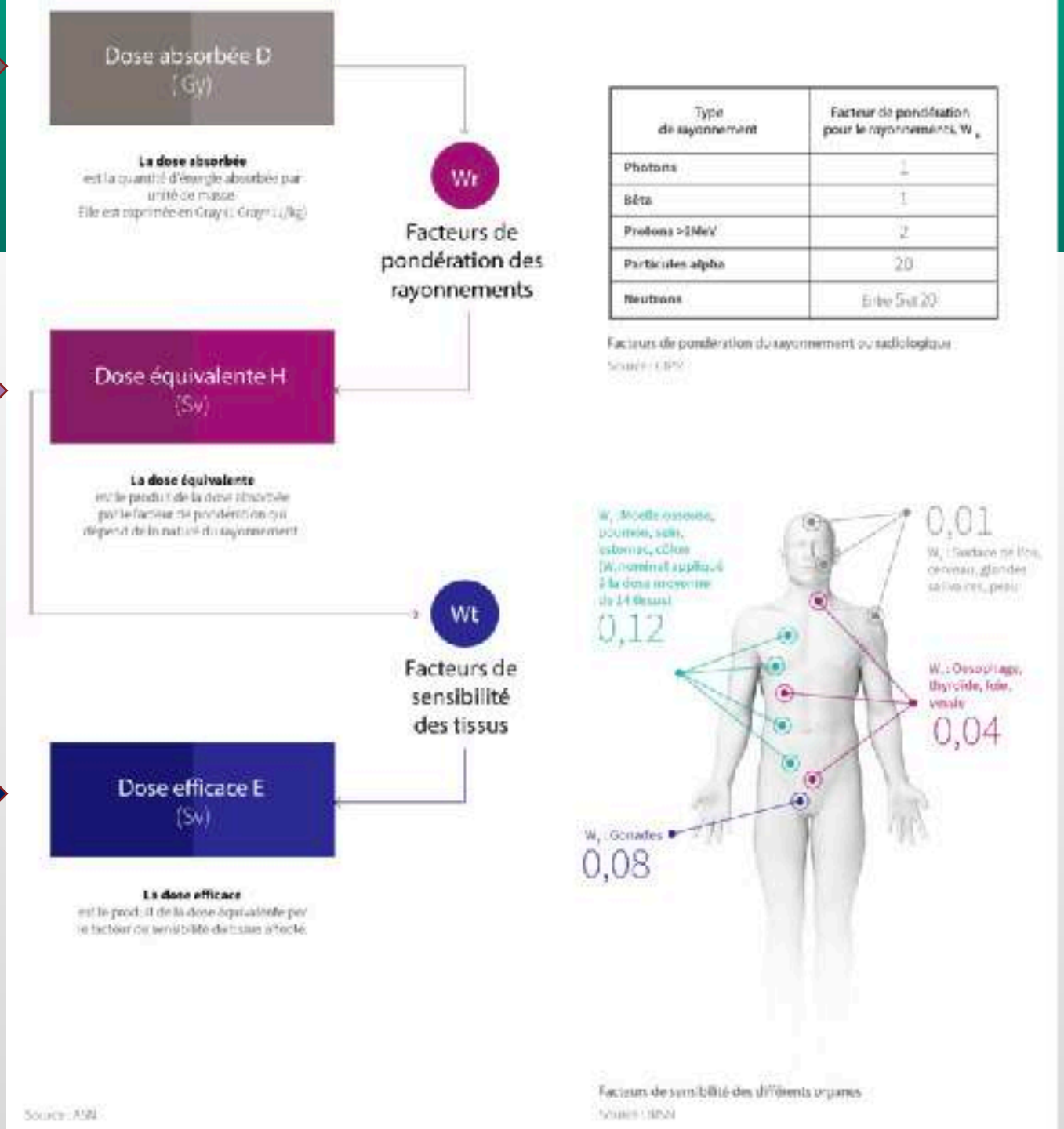
(1) D'après Wrixon AD, New ICRP recommandations, J. Radiol. Prot. 2008, 28, 161-168

Grandeurs de Protection : La Dose Efficace (E, mSv)

- **Exemples :**
  - Scanner cérébral : D_{abs} moyenne dans le volume exploré= 40 mGy
    - E ≈ 2 mSv
    - Même dommage qu'une exposition uniforme corps entier à une dose de 2 mGy
  - Scanner Thoraco-Abdomino-Pelvien : D_{abs} moyenne dans le volume exploré = 10 mGy
    - E ≈ 8 mSv
    - Même dommage qu'une exposition uniforme corps entier à une dose de 8 mGy

- **Dommage scan TAP = 4 x Dommage scan cérébral**

Pour résumer

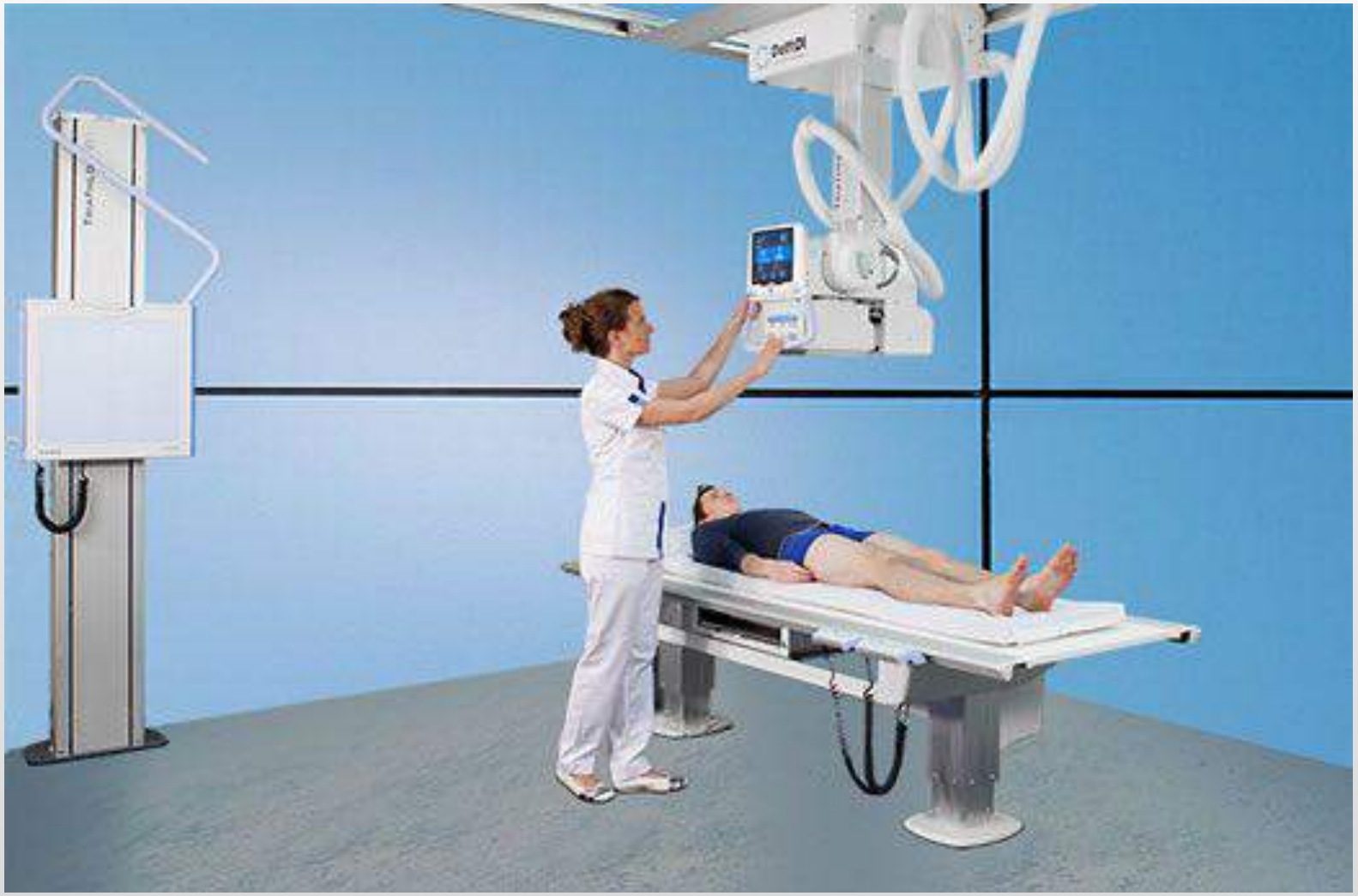


L'essentiel

- Dose équivalente – H_T (mSv)
- Dose efficace – E (mSv)
- **Aucune des deux quantités n'est mesurable.**

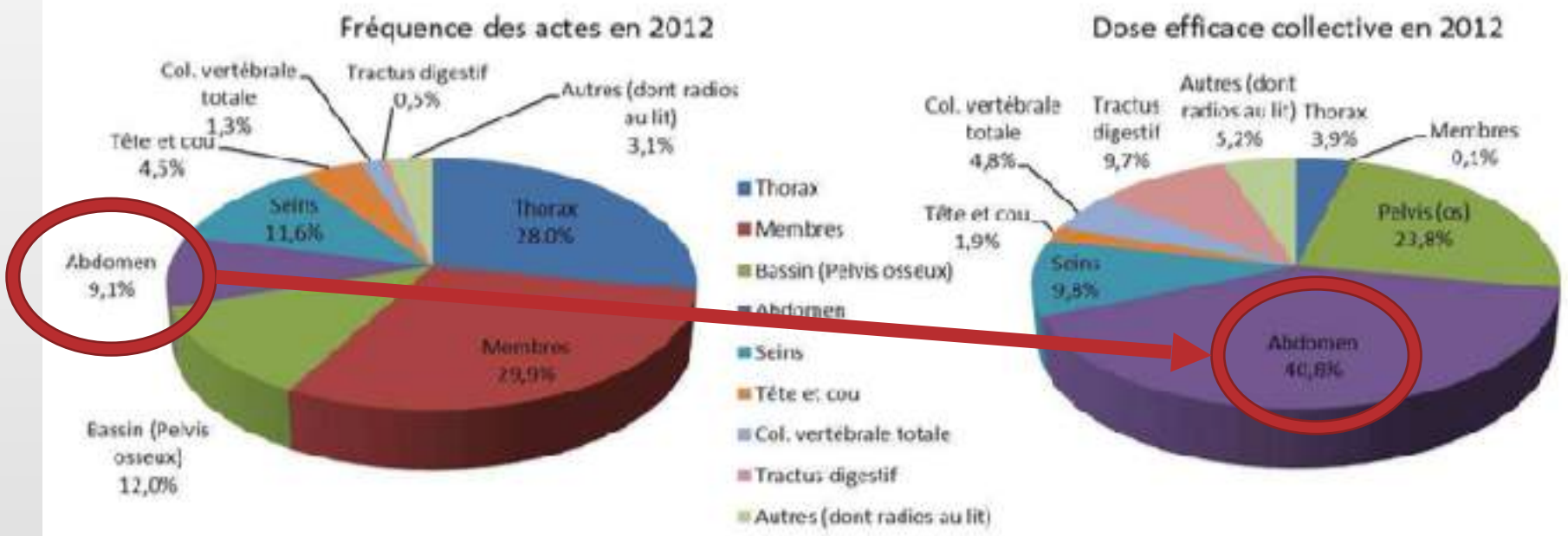
Évaluation des doses en radiologie et scanographie

Grandeurs et unités en radiologie



Exposition en Radiologie*

0,6 mSv/an/individu exposé



**IRSN – Exposition médicale aux RI en 2012*

Chambre Produit-Dose.Surface (PDS, cGy.cm2)

Quelques Exemples de valeurs de PDS (cGy.cm²)

Type d'examen	N 2015 (2013-2015)	Poids moyen (kg)	PDS (cGy.cm²) NRD	PDS (cGy.cm²) 75°	PDS (cGy.cm²) 50°	Rapport (75°/25°)	% NRD	> NRD	Variation
Thorax de face (PA)	564 (1576)	70,5	25	20,2	14,8	2,14	-19 %	9,9 %	-18 %
Thorax de profil	226 (614)	70,8	100	59,8	45,1	1,98	-40 %	1,3 %	-16 %
Abdomen sans préparation	167 (488)	70,9	700	374	283	2,15	-47 %	1,8 %	-8 %
Bassin de face (AP)	460 (1357)	70,7	700	425	313	1,82	-39 %	2,2 %	-8 %
Hanche (face ou profil)	191 (505)	71,2	300	149	106	2,01	-50 %	0,5 %	-16 %
Rachis cervical (face ou profil)	199 (645)	69,6	75	39,0	27,6	2,10	-48 %	1,0 %	-6 %
Rachis dorsal de face	118 (313)	69,8	175	108	81	1,70	-38 %	0 %	-2 %
Rachis dorsal de profil	55 (142)	70,3	275	130	93	2,10	-53 %	0 %	-29 %
Rachis lombaire de face	287 (877)	70,1	450	282	222	1,82	-37 %	1,4 %	-22 %
Rachis lombaire de profil	149 (476)	71,7	800	425	295	2,11	-47 %	1,3 %	-21 %
Orthopantomographie	50 (137)	-	20	13,6	11	2,11	-32 %	0 %	+6 %

IRSN – Bilan NRD 2013-2015

Calcul de D_e (mGy) à partir du PDS (mGy.cm²)

$$D_e = (PDS/S_e) \times FRD$$

- S_e : surface du champ en cm² à la peau du patient
- FRD : Facteur de rétrodiffusion
  - ➢1,35 (60 - 80 kV) et 1,5 RP (≥ 120 kV)

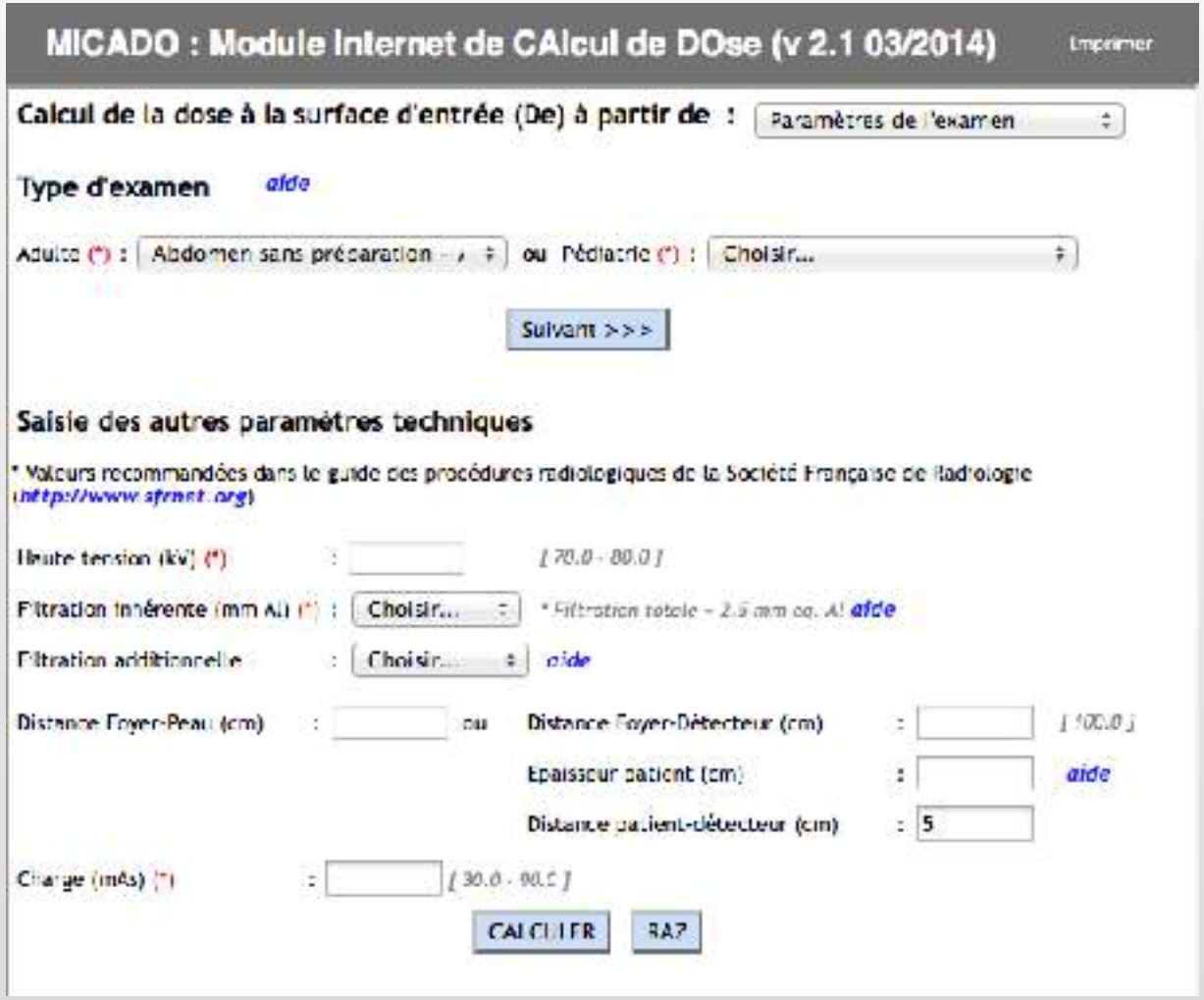
Quelques exemples de dose à l'entrée du patient

Type d'examen	N (2013-2015)	Poids moyen (kg)	De (mGy)			Rapport (75e/25e)	% NRD	> NRD	Variation
			NRD	75e	50e				
Thorax de face (PA)	213	71,0	0,3	0,32	0,24	1,93	+8 %	30 %	+2 %
Thorax de profil	99	70,1	1,2	1,14	0,87	1,99	-5 %	19 %	+2 %
Abdomen sans préparation	62	70,3	8	6,6	4,8	1,86	-18 %	11 %	-9 %
Bassin de face (AP)	151	70,2	9	7,8	5,8	1,89	-13 %	15 %	-12 %
Hanche (face ou profil)	87	71,0	9	6,4	4,4	2,37	-29 %	3,4 %	+3 %
Rachis cervical (face ou profil)	77	69,9	4	2,2	1,4	2,27	-45 %	1,3 %	+16 %
Rachis dorsal de face	49	69,4	5	4,8	3,7	1,59	-4 %	22 %	+11 %
Rachis dorsal de profil	34	69,0	7	8,2	6,0	1,84	+17 %	32 %	-7 %
Rachis lombaire de face	130	69,8	10	9,1	6,9	1,74	-9 %	18 %	-6 %
Rachis lombaire de profil	64	70,1	25	21,0	16,3	1,66	-16 %	4,7 %	-8 %

IRSN – Bilan NRD 2013-2015

CALCUL DOSE entrée

- MICADO : nrd.irsn.fr
  - Paramètres de l'examen
  - PDS



Dose efficace (E, mSv) en radiologie

A partir du PDS :

- Des logiciels de calcul permettent d'obtenir la dose efficace E pour la procédure effectuée (pour chaque cliché)

- Il existe aussi une méthode approchée :

$$E(mSv) = k \times PDS\ (Gy.cm^2)$$

avec k ($mSv/Gy.cm^2$) donné par des tables (NRPB)

Coefficients de conversion k PDS E dose efficace

Région explorée	kV	Coeff. k de conversion PDS → E
Thorax F	130	0.33 / 3
Thorax P	130	0.15
Abdomen	70	0.17
Abdomen	90	0.22 / 5
Bassin	70	0.20
Tête F	80	0.04
Rachis cervical F	70	0.21
Rachis cervical P	70	0.03
Rachis thoracique F	70	0.27
Rachis thoracique P	80	0.10
Rachis lombaire F	80	0.21 / 5
Rachis lombaire P	90	0.13

E_{moy}/an/individu exposé en Radiologie

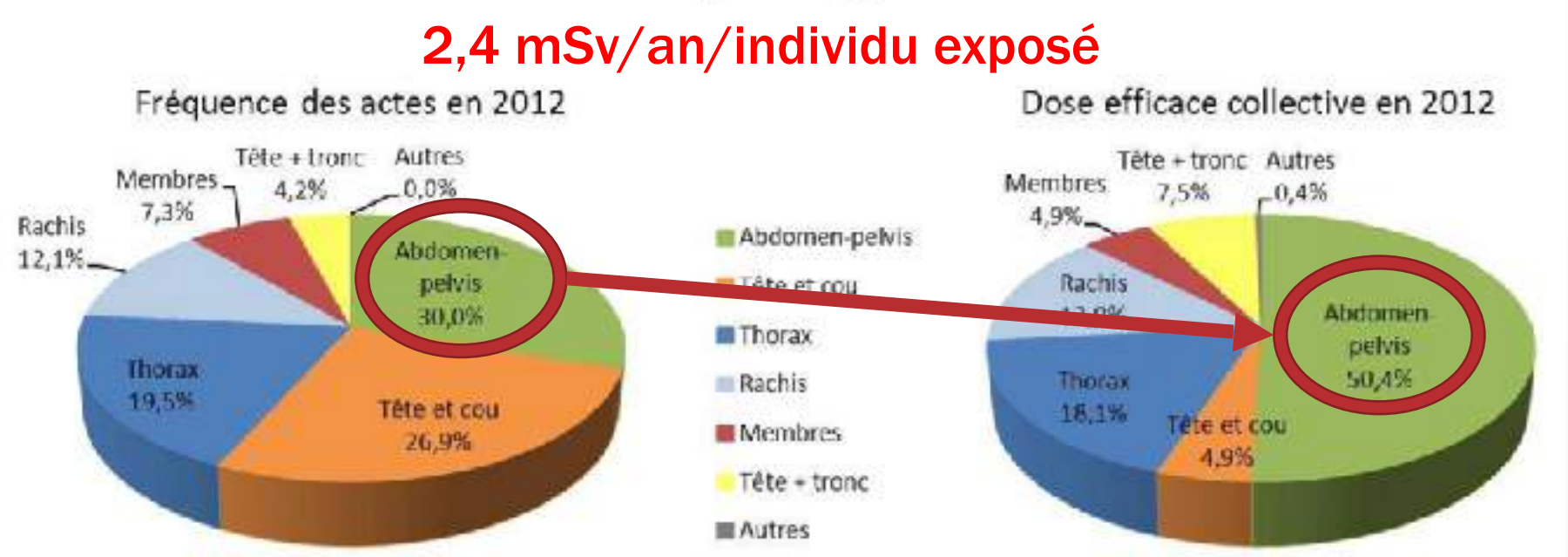
Examen *	E_{moy} (mSv)
Abdomen	0,45
Pelvis (os)	0,26
Seins	0,11
Tractus digestif	0,11
Autres (dont radio au lit)	0,06
Colonne vertébrale	0,06
Thorax	0,04
Tête et cou	0,02
Membres	< 0,01

$E_{radiologie} < 1$ mSv

**IRSN – Exposition médicale aux RI en 2012*

Grandeurs et unités en scanographie

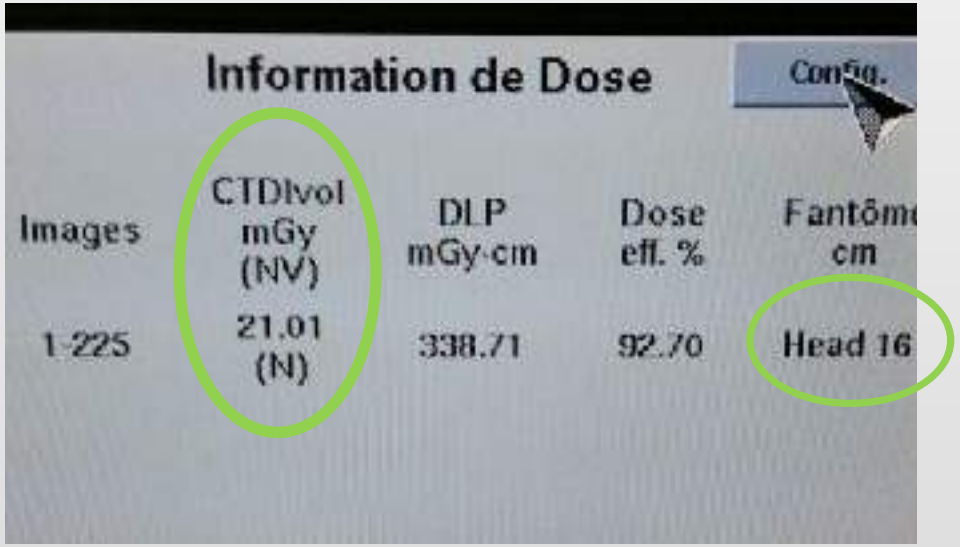
Exposition en scanographie*



**IRSN – Exposition médicale aux RI en 2012*

Exposition en scanographie

- **IDSV (CTDIvol) en mGy : Indice de Dose Scanographique du Volume :**
  - Dose moyenne dans le volume exploré affichée au pupitre de commande de la machine
  - Représente la dose qui aurait été délivrée sur un fantôme de diamètre standardisé
    - 16 cm pour la tête
    - 32 cm pour le corps

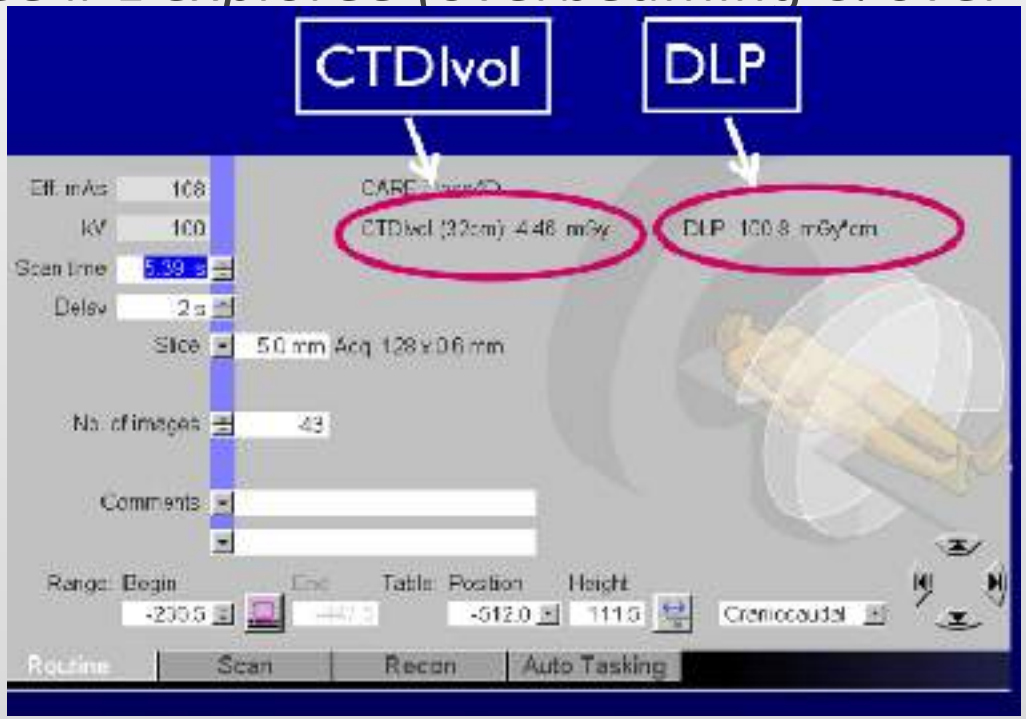


ATTENTION : Ce n'est pas la dose au patient car l'IDSV ne tient pas compte de sa corpulence réelle

Exposition en scanographie

- **PDL (DLP) en mGy.cm : Produit-Dose.Longueur**
- PDL (mGy.cm) = IDSV (CTDIvol) x L exposée*

  **L exposée # L explorée (overbeaming & over-ranging)*

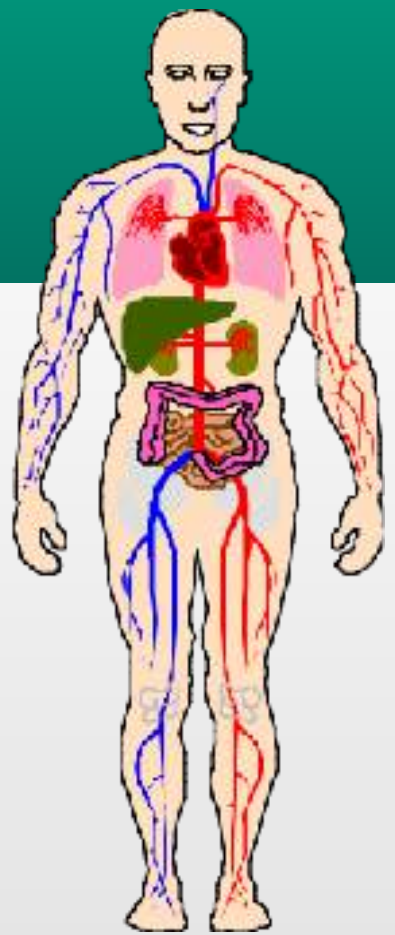


Quelques exemples de $CTDI_{vol}$ (mGy) et PDL (mGy.cm)

Type d'examen	N 2015 (2013-2015)	Poids moyen (kg)	IDSM (mGy)			Rapport (75°/25°)	% NRD	> NRD	Variation
			NRD	75°	50°				
Encéphale	369 (1168)	-	65	46,3	40,5	1,26	-29 %	0,3 %	-12 %
Thorax	329 (906)	72,3	15	9,2	7,6	1,58	-39 %	0,6 %	-19 %
Thorax-abdomen-pelvis	177 (533)	71,1	20	11,3	10,0	1,38	-44 %	0 %	-21 %
Abdomen-pelvis	304 (877)	72,2	17	12,8	11,2	1,42	-25 %	1,6 %	-14 %
Rachis lombaire	289 (822)	72,9	45	29,7	25,1	1,41	-34 %	0,3 %	-11 %

Type d'examen	N 2015 (2013-2015)	Poids moyen (kg)	PDL (mGy.cm)			Rapport (75°/25°)	% NRD	> NRD	Variation
			NRD	75°	50°				
Encéphale	371 (1185)	-	1050	834	745	1,27	-21 %	1,9 %	-9 %
Thorax	335 (925)	72,2	475	344	285	1,48	-28 %	2,1 %	-17 %
Thorax-abdomen-pelvis	180 (552)	70,9	1000	771	680	1,32	-23 %	5,6 %	-19 %
Abdomen-pelvis	308 (895)	72,0	800	641	541	1,36	-20 %	3,9 %	-10 %
Rachis lombaire	295 (843)	73,0	700	762	661	1,38	+9 %	35,6 %	-8 %

Dose efficace (E, mSv) en scanographie



- E relie la dose au risque (mSv)

$$E = \sum D_{\text{Tissu, Organe}} \times (1) \times W_T$$

  - Ne peut pas être mesurée
  - Est souvent difficile à calculer

- En pratique peut être approchée à partir du PDL

$$E = PDL \times FC^{\text{Sexe, Age}}_{\text{Région explorée}}$$

- Exemple FC : Adulte à 120 kV de **0,2 % à 1,5 % du PDL**
  - Tête = 0,0019 • Cou = 0,0051
  - Thorax = 0,0145 • Abdomen = 0,0153 • Pelvis = 0,0129

E_{moy}/individu exposé en scanographie/hélice

Examen*	Emoy (mSv)
Abdo-pelvis	10,0
Thorax	6,0
Rachis	4,5
Tête et tronc	2,5
Tête et cou	1,6
Membres	1,6

$E_{scanner} \leq 10$ mSv/Hélice

**IRSN – Exposition médicale aux RI en 2012*

L'essentiel

- Les grandeurs et unités utilisées sont :
  - De (mGy) et PDS (mGy.cm^2) en radiologie
    - E(mSv) ≈ PDS (Gy.cm^2) x k
  - IDSV (mGy) et PDL (mGy.cm) en scanographie
    - E(mSv) ≈ PDL (mGy.cm) x k

À retenir

1. La dose efficace est proportionnelle :
   - En radiologie au PDS (mGy.cm²) = De (mGy) x S (cm²)
   - En scanographie au PDL (mGy.cm) = IDSV (mGy) x $L_{exposée}$ (cm)
2. Le risque de décès liés aux faibles doses, estimé théoriquement à partir d'une extrapolation linéaire sans seuil, est de 5‰ / 100 mSv
3. La dose efficace est en général :
   - < 1 mSv en radiologie
   - < 10 mSv en scanographie /phase

- Le scanner contribue à plus de 70% à la dose efficace collective

Merci pour votre écoute