



Société française d'énergie nucléaire

Groupe Régional Rhône-Ain-Loire



*Applications médicales
du nucléaire*

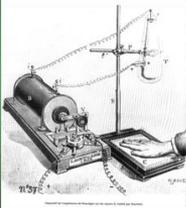


**Docteur J-C ARTUS
Professeur Emérite**

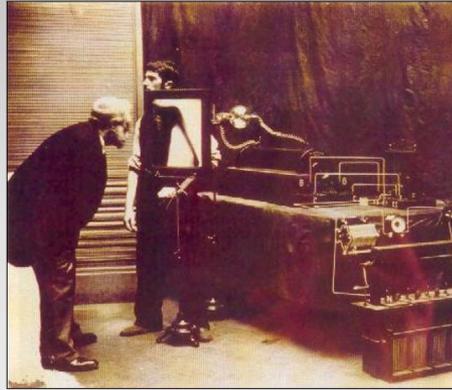


Le « Nucléaire » et la Santé

L'expérience de Roentgen
1895

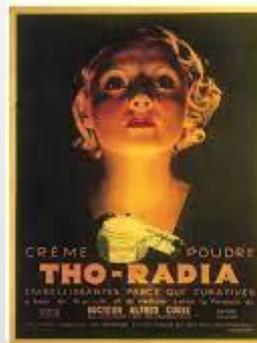


La radiographie



La radiothérapie

La santé par la
radioactivité 1920 - 1940



Les Fondamentaux

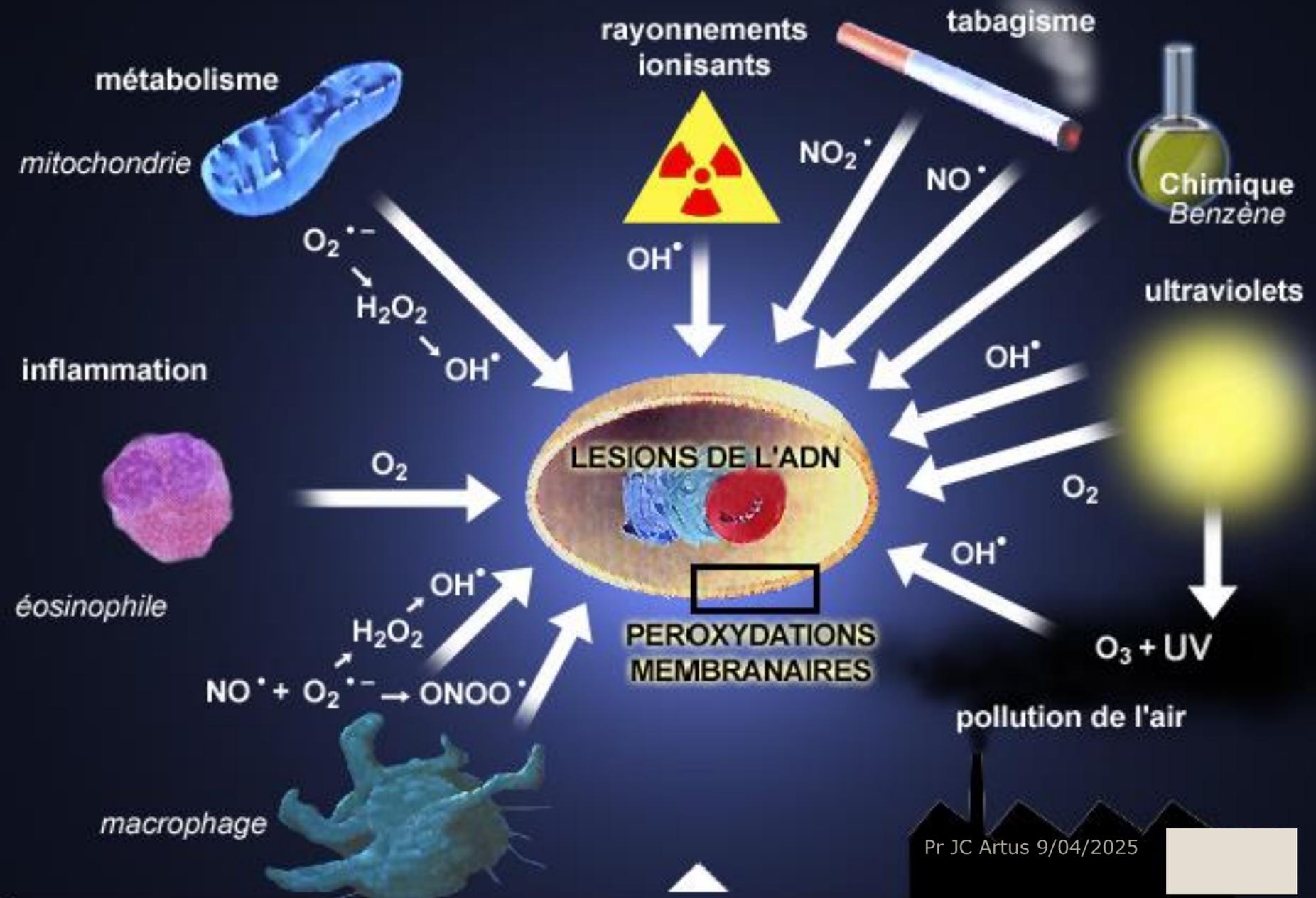
« Sans un minimum de culture scientifique, l'information du Public est ... impossible »



Un peu de sémantique Nucléaire ou Radioactivité ?

- **Nucléaire** « *noyau* », ... à celui de l'atome,
- Pour les **atomes**, certains noyaux **instables (facteur Temps)**
- **la stabilité** => **la radioactivité** (α, β, γ) (**période !**)
- **liée au noyau** : la **production de RX** (même nature que radioactivité γ)
- **l'énergie** sur la **matière vivante** => ionisations de nos cellules. **La radioactivité => RI**

Agents mutagènes



Les mesures du « Nucléaires »

Pour l'essentiel : 2 mesures fondamentales

- **source** : la quantité, en **becquerel (Bq)**
(1Curie = $3,7 \times 10^{10}$ Bq soit 37 milliards de Bq)
- Le **risque pour la santé**, la qualité, la « **dose efficace** », valeur **estimée**, exprimée en **millisievert (mSv)**, la plus importante pour juger du risque pour la santé
- **NB** : les « **grays** », mesures physiques quantifient l'énergie délivrée à la tumeur lors d'une **radiothérapie**.

Le corps humain : 10 000 Bq

Radioéléments incorporés

- inhalation : 2 à 5 10^5 Bq/an
- alimentation : 30 000 Bq/an

Radioéléments constitutifs

• potassium 40	4 500 Bq
• carbone 14	3 700 Bq
• rubidium 87	640 Bq
• uranium + thorium + radium	220 Bq



© OMIRIS 2006



© OMIRIS 2006

... serait-il plus risqué de dormir avec une personne que d'habiter proche d'une Centrale nucléaire ?!!

De l'énergie dont
la grandeur est la
dose

Des Doses !
Selon
leurs utilisations

Dose absorbée

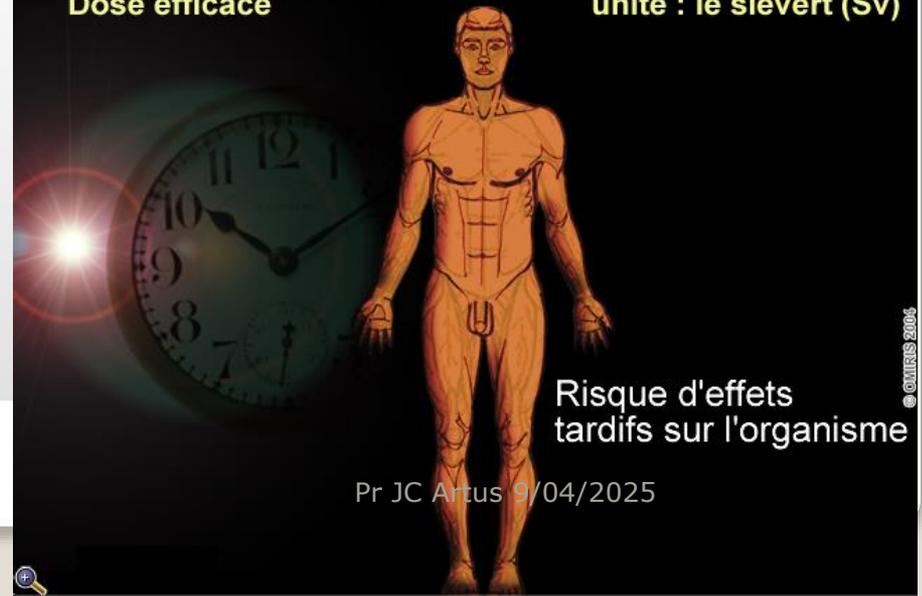
unité : le Gray (Gy)



$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J / kg}$$

Dose efficace

unité : le sievert (Sv)



Risque d'effets
tardifs sur l'organisme

Pr JC Artus 9/04/2025

De la dose absorbée à la dose efficace

Neutrons 100 keV à 2 MeV
particule α
Fragments de fission
Noyaux lourds de recul

Neutrons 10 à 100 keV
ou 2 à 20 MeV

Neutrons < 10 keV
ou > 20 MeV
Protons > 2 MeV

Photons X et γ
Electrons

Wr

1 Gy

réparation très probable absente ou fautive

dose équivalente pour une dose absorbée de 1 Gy
1 Sv 5 Sv 10 Sv 20 Sv

pour les effets
tissulaires tardifs ?

WT

Gonades	0,20
Moelle osseuse	0,12
Côlon	0,12
Estomac	0,12
Poumon	0,12
Foie	0,05
Thyroïde	0,05
Œsophage	0,05
Sein	0,05
Vessie	0,05
Peau	0,01
Os	0,01
le reste...	0,01

Facteur de pondération
©-EMIRIS-2004

voir aussi :
"Radiosensibilité
aux effets
stochastiques
tardifs"



La Dose Efficace (E) est la grandeur fondamentale de la radioprotection

C'est la grandeur estimée du risque, en mSv, pour l'organisme entier, de voir apparaître des effets tardifs (les **cancers**) ...

Grandeur de radioprotection permet de ramener ce risque, lors de l'exposition partielle, à un risque équivalent pour la totalité de l'organisme ; les **risques** itératifs, de ce fait, deviennent **cumulables**...

Dose efficace :

$$E = D_1 W_{R1} W_{T1} + D_2 W_{R2} W_{T2} + D_3 W_{R3} W_{T3} + \dots$$

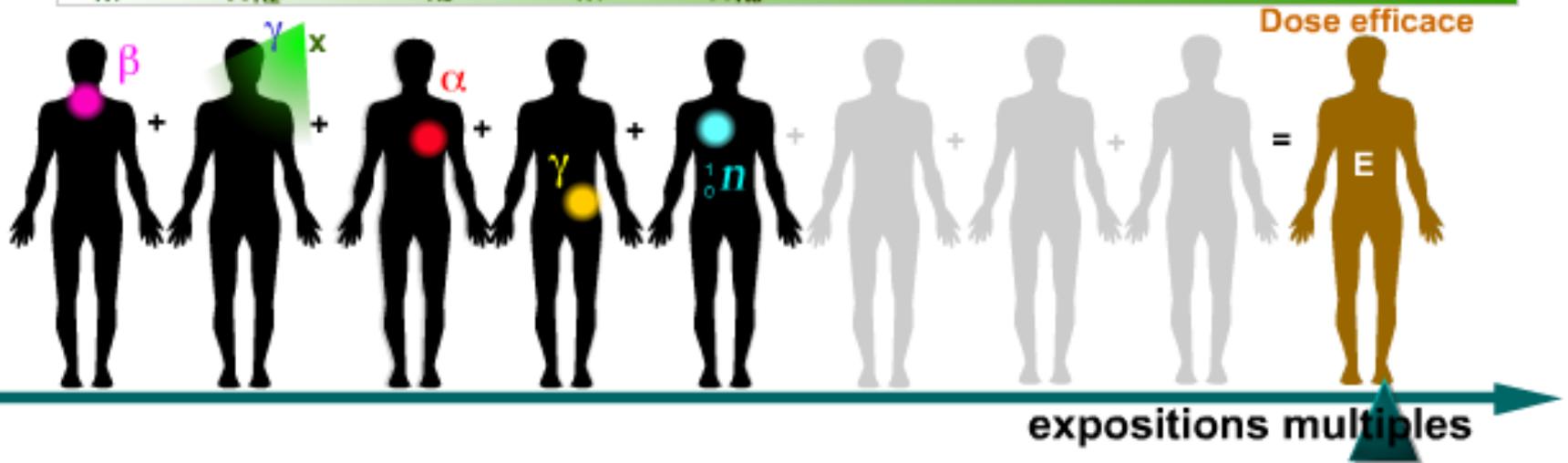
Dose absorbée



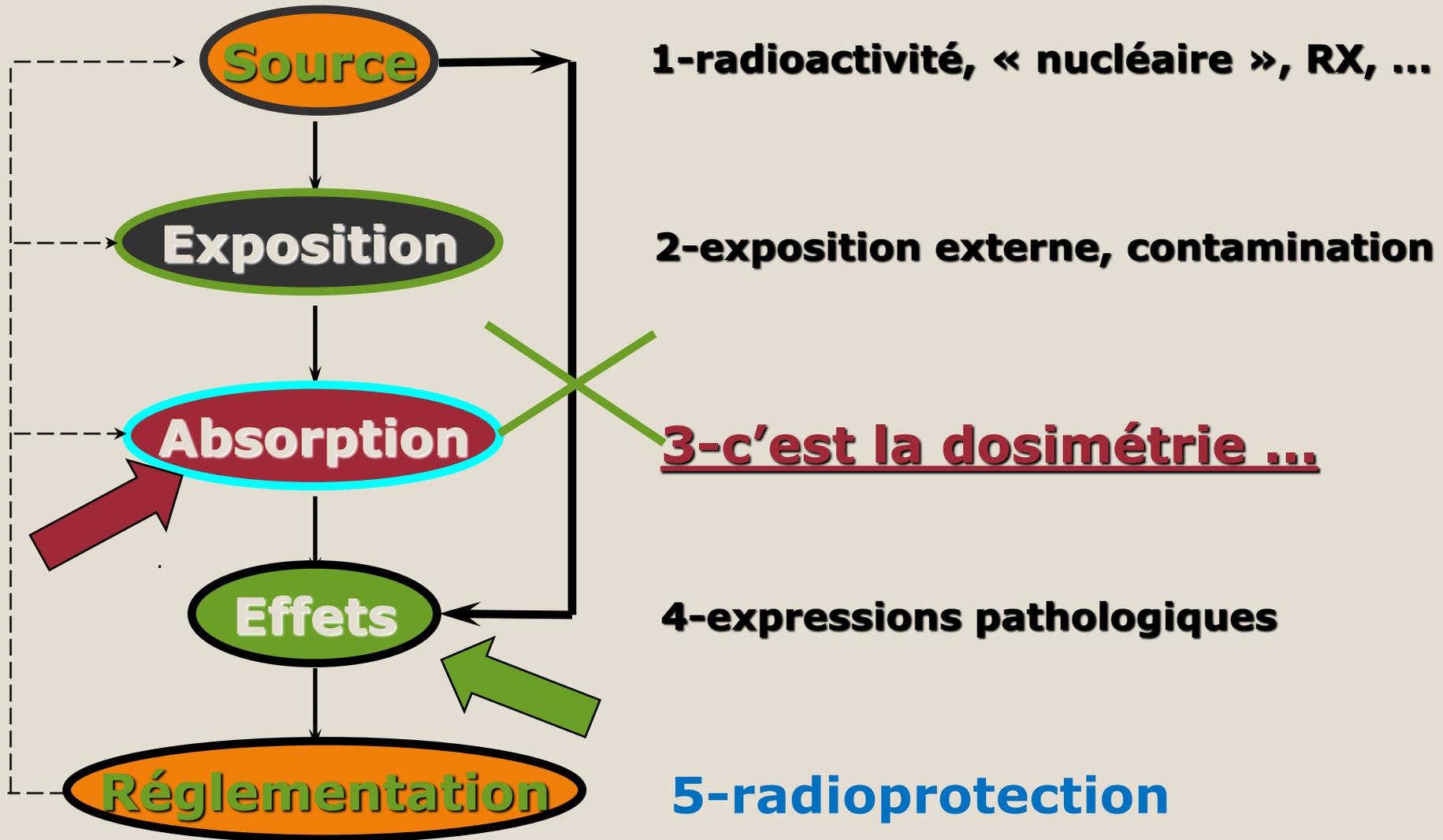
Pondération tissulaire



Pondération radiologique



De la Source à ses Effets sur le corps





Alors ça vient cette Médecine Nucléaire ?

La radiologie est une plus ou moins grande atténuation d'un faisceau de RX. Comme la radiothérapie une fois **l'exposition** interrompue, **le patient n'émet aucun risque pour les autres.**

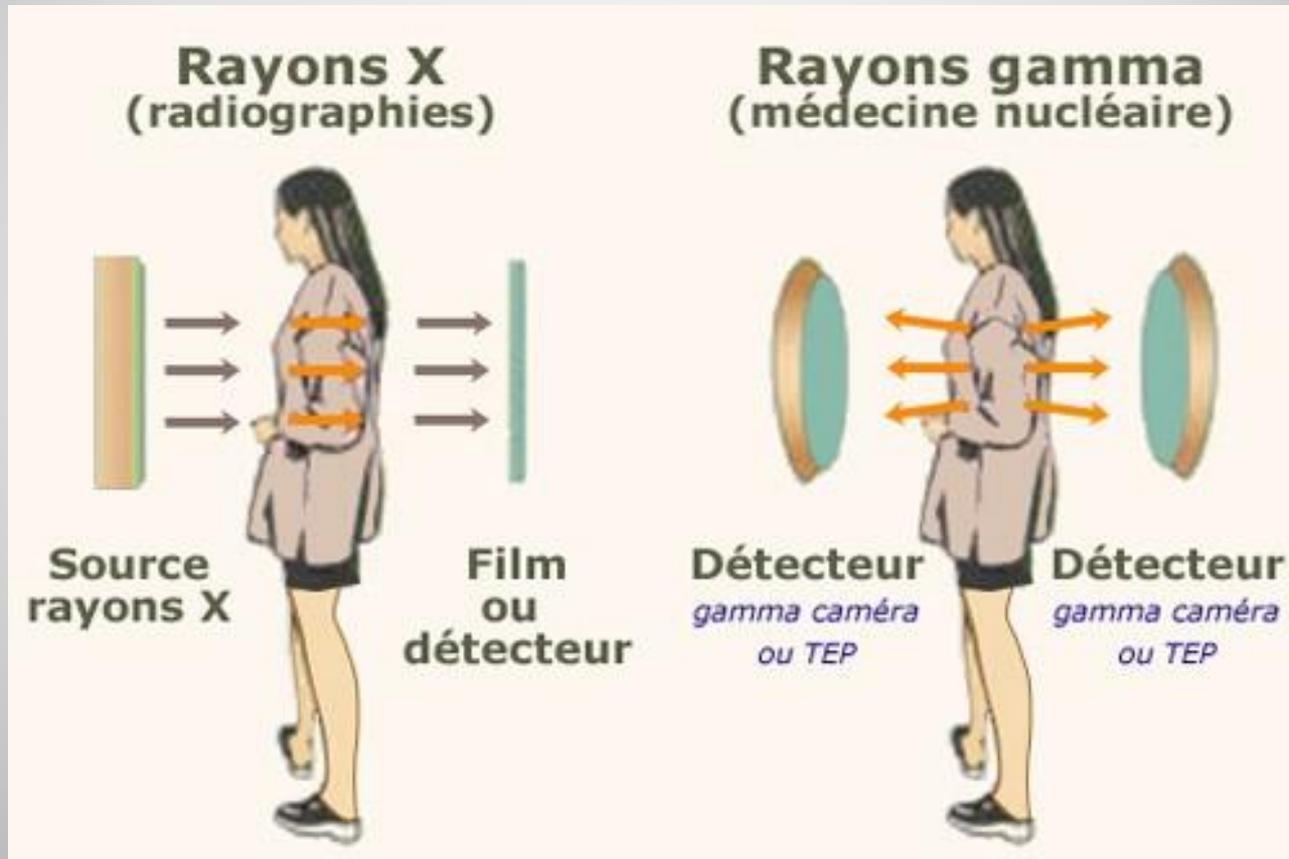
Pour un acte de médecine nucléaire, le patient est **contaminé, reste contaminé, et contaminant** jusqu'à l'élimination par l'urine et la décroissance selon la période du traceur ...

temps	$t = T$	$t = 3,3 T$	$t = 6,6 T$	$T = 9,9 T$
activité	50%	10%	1 %	1/1000

La Médecine Nucléaire depuis 1948 !

- Administration d'une molécule (**traceur**) marquée par des atomes radioactifs (**marqueur**) détectables à l'extérieur de l'organisme => « *le radiopharmaceutique* »
- Le suivi d'un **traceur** cellulaire de l'organisme reflète un fonctionnement, sans le perturber ...
- Le **marqueur** ne doit pas altérer le comportement du *traceur*, doit être émetteur gamma, avoir une demi-vie (**T**) assez courte pour une exposition acceptable de l'organisme. Tc99m (T=6h), F18 (T=110 mn), I131 (T=8j), etc...

La différence entre la radiologie et la Médecine Nucléaire





Année 1950
Comptages de la
de la thyroïde
dans le temps :
de 1h à 24 h !

Courbe ...

**hyper ou hypo
activité**



Détecteur à balayage (scanner) donnant une « cartographie » : la scintigraphie



Le champ de la gamma-caméra permet d'obtenir une image de la répartition fonctionnelle du radiotraceur.

Traitement et stockages des images numériques ...

NB : premiers ordinateurs dans le milieu médical ...

Evolution technique marquante 1972/3



Gamma-caméra, balayage corps entier

Appareil hybride, Gamma-caméra et Scan

Tomographie Emission Positron et Scan : TEP-Scan

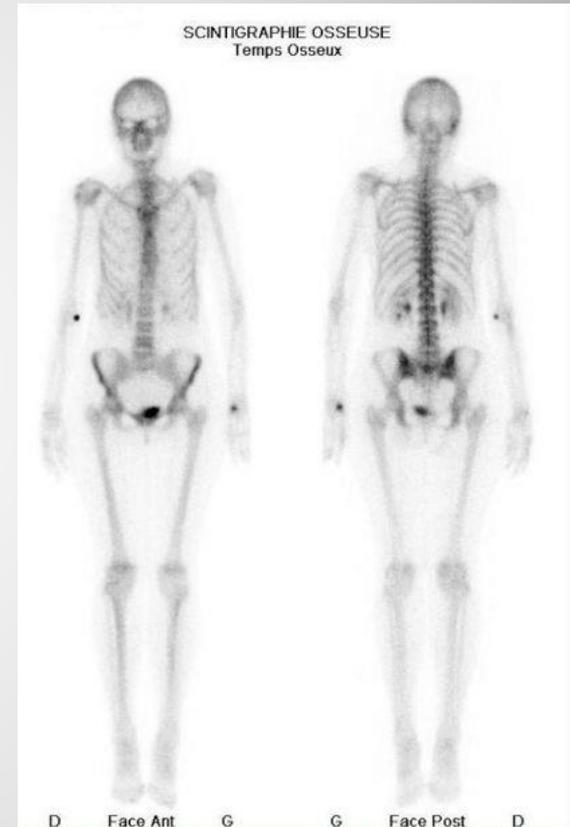
Evolution des détecteurs

La scintigraphie ...

La répartition du traceur dans un organe (ou du corps entier) donne un « **graphe** » des activités cellulaires. C'est un **graphe fonctionnel**.

La détection des « γ » du marqueur est obtenue par des détecteurs à **scintillations**

Le résultat de cette détection de la répartition du marqueur => **la scinti - graphie** : **image fonctionnelle** à un moment donné d'un organe, d'une tumeur, d'une fonction (respiratoire, rénale, etc. ...)

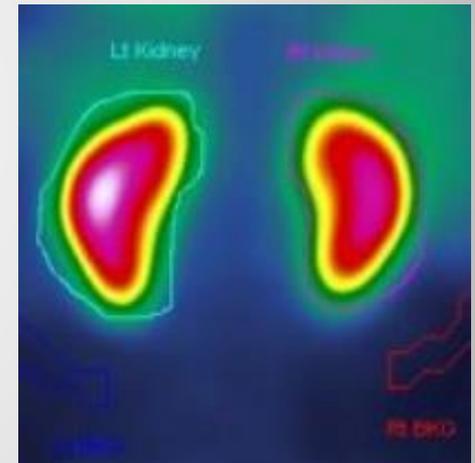
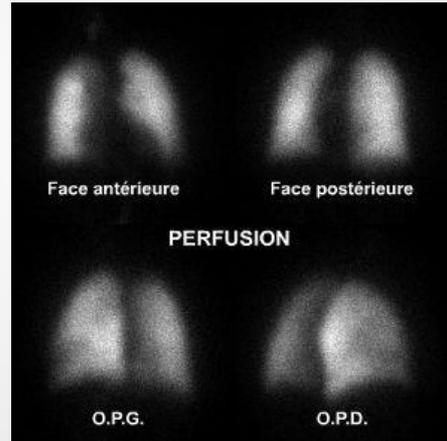
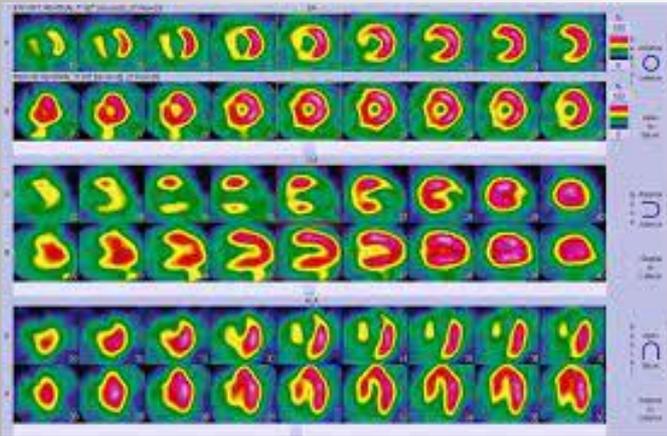
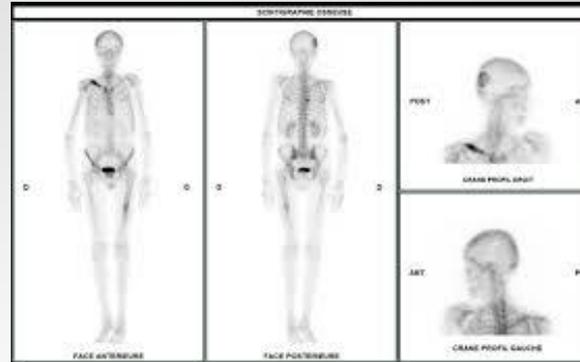
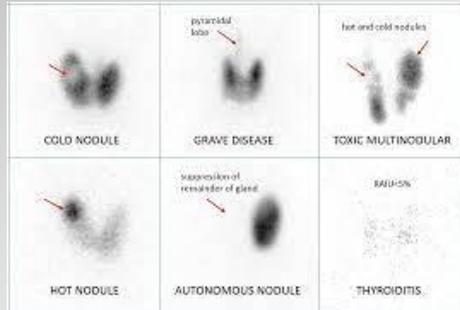
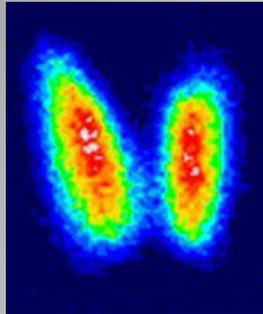


Quelques éléments pour caractériser les résultats scintigraphiques

L'examen analysé **en fonctions du radiotracteur** spécifique de l'organe (les os, les reins, le cerveau, le cœur, tumeurs, etc. ...) ou d'une fonction (cardiaque, rénale, pulmonaire, etc. ...)

Le « graphe » peut être **limité à l'organe** ou au **corps entier**.
Plan ou le plus souvent,, « **tomographique** » : images en coupe de la répartition de la « fonction » spécifique.

Les appareils sont devenus hybrides : les **détecteurs** et le **scanner à RX** sont couplés dans la même machine permettant de **superposer le graphe de la répartition traceur sur l'image radiologique pour mieux la situer**



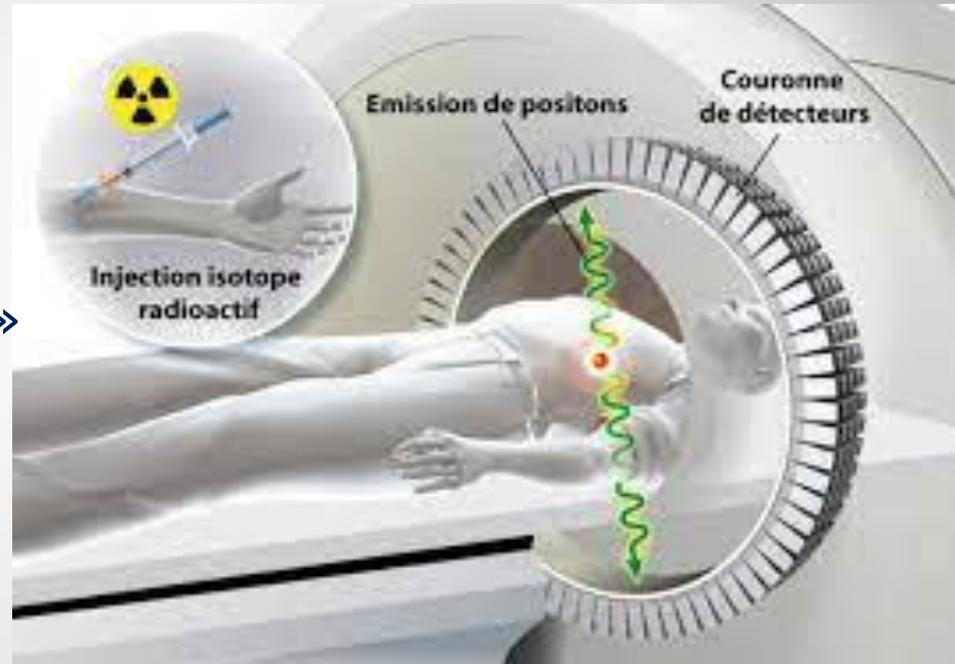
Scintigraphies de différents organes ...

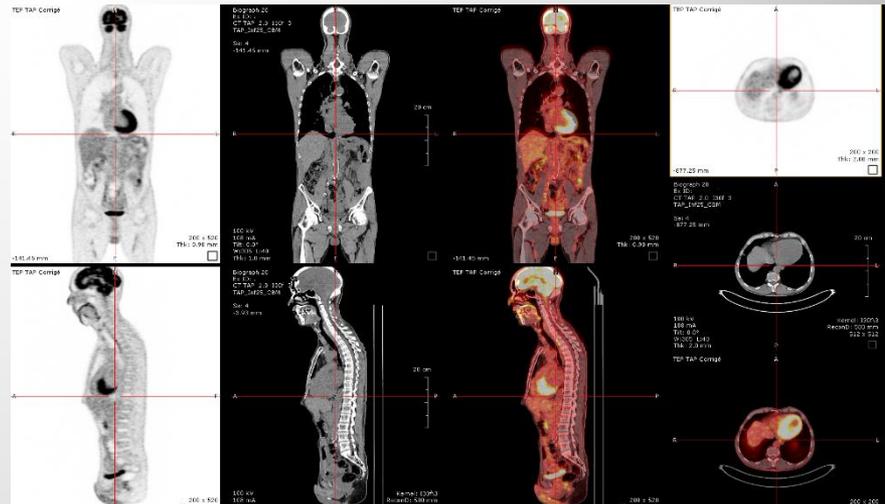
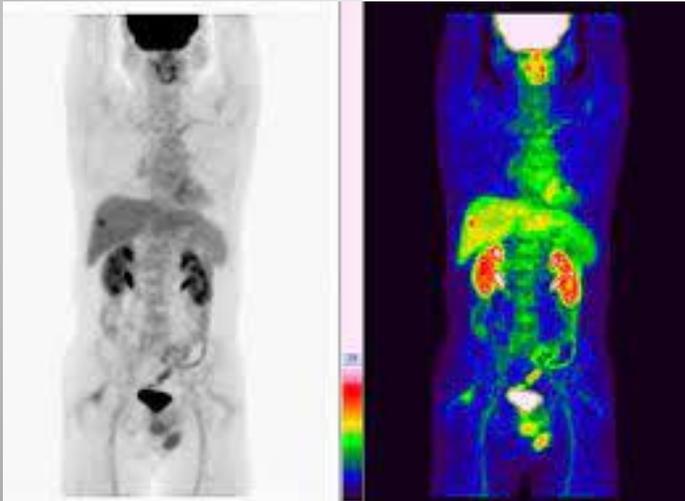
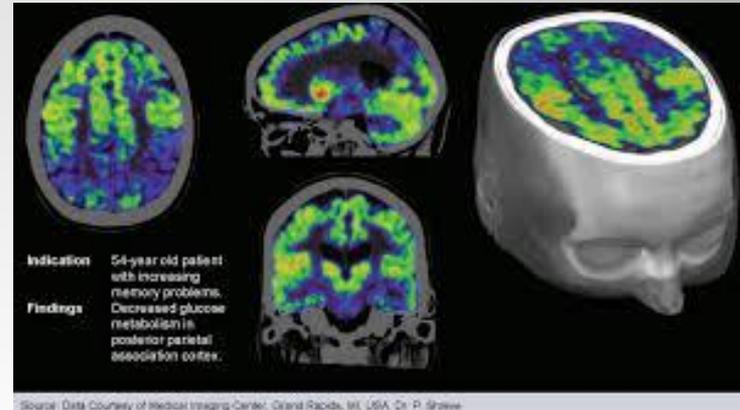
Le principe du la Tep -Scan

Le marqueur est
du **glucose** ... de
la choline ... PMSA

Le traceur est du ^{18}F
Émetteur de « positrons »
T = 1h 50 ...

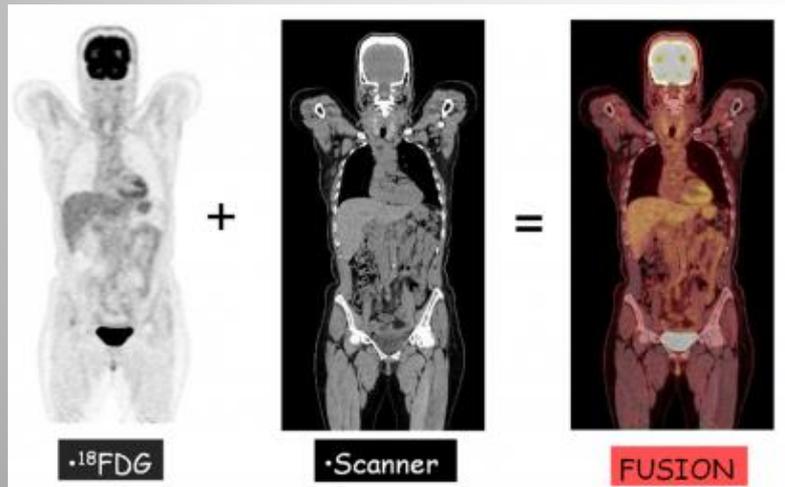
Le radiopharmaceutique
est le FDG ..., le ^{18}F -
choline, ^{18}F -PSMA pour
le cancer de la prostate
...





Le PET-Scan ou la TEP-Scan ?

L'utilisation du ^{18}F associé à du **glucose** (\Rightarrow le **FDG**), a considérablement élargie les indications de cet examen, car le FDG se concentre dans les cellules les plus actives (hyperactives) que l'on ne verrait pas au scanner X



Particulièrement, les indications classiques de la TEP-Scan

Voir les organes accumulant le traceur, => consommation **trop importante** de glucose

- **Pathologies inflammatoires** : · foyers infectieux profonds, la porte d'entrée d'une infection.
- **En cancérologie**
 - la **détection** de tumeurs, de métastases;
 - Le **diagnostic** de récurrence d'une tumeur, en particulier en cas d'élévation des marqueurs tumoraux ...
 - **l'évaluation** de la réponse thérapeutique.
 - **TEP Scan PMSA** pour la prostate

PSMA signifie antigène membranaire spécifique de la prostate, une protéine présente à la surface des cellules cancéreuses de la prostate.

Quelques indications En plus de l'oncologie

Cardiologie : perfusion myocardique, la fonction ventriculaire ...

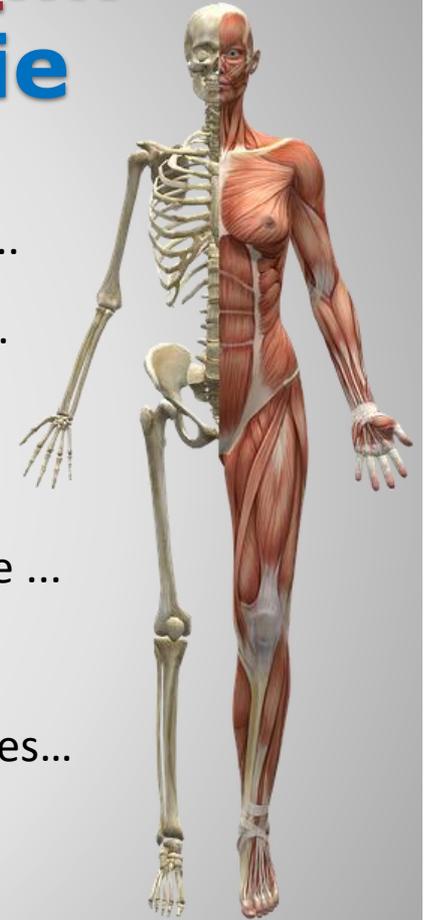
Neurologie : Diagnostic d'Alzheimer, de Parkinson, l'épilepsie ...

Endocrinologie : les dysthyroïdies, diagnostic, traitement des cancers de la thyroïde et ses métastases ...

Pneumologie : embolies pulmonaires et la fonction pulmonaire ...

Néphrologie : évaluer la fonction rénale ...

Rhumatologie : diagnostic et suivi d'arthropathies dégénératives...

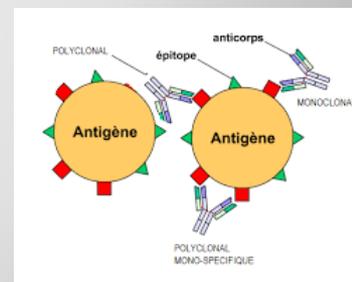


Autres activités de Médecine Nucléaire

- **La thérapie : radiothérapie « in situ »**, le radiopharmaceutique est suffisamment **énergétique** pour **détruire** la **cellule maligne** : c'est le cas de l' ^{131}I pour les cellules **thyroïdiennes**, => traitement des hyperthyroïdies ou de cancers thyroïdiens et métastases (iodo-fixantes)



La radio-immunologie : pendant des décennies cette **méthode d'analyse** quantitative basée sur le principe de la réaction antigène-anticorps a permis les dosages, notamment des hormones ...



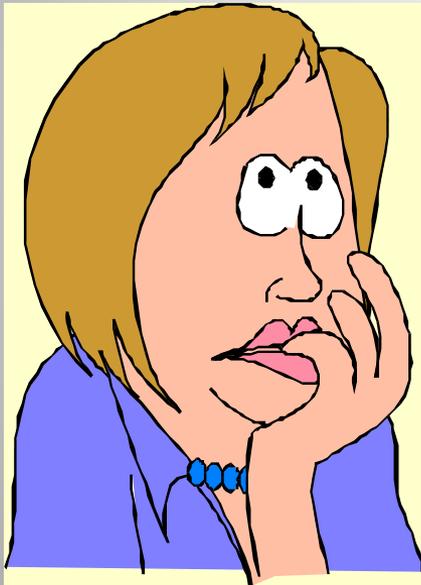
En France, par an, de l'ordre de 200 000 personnes sont traitées par radiothérapie ; des millions de scanners et de scintigraphies sont réalisés ...



IA : la fin de l'âge d'or des radiologues, médecins nucléaires ??



Mais ces examens ne sont-ils pas un risque pour la Santé ?



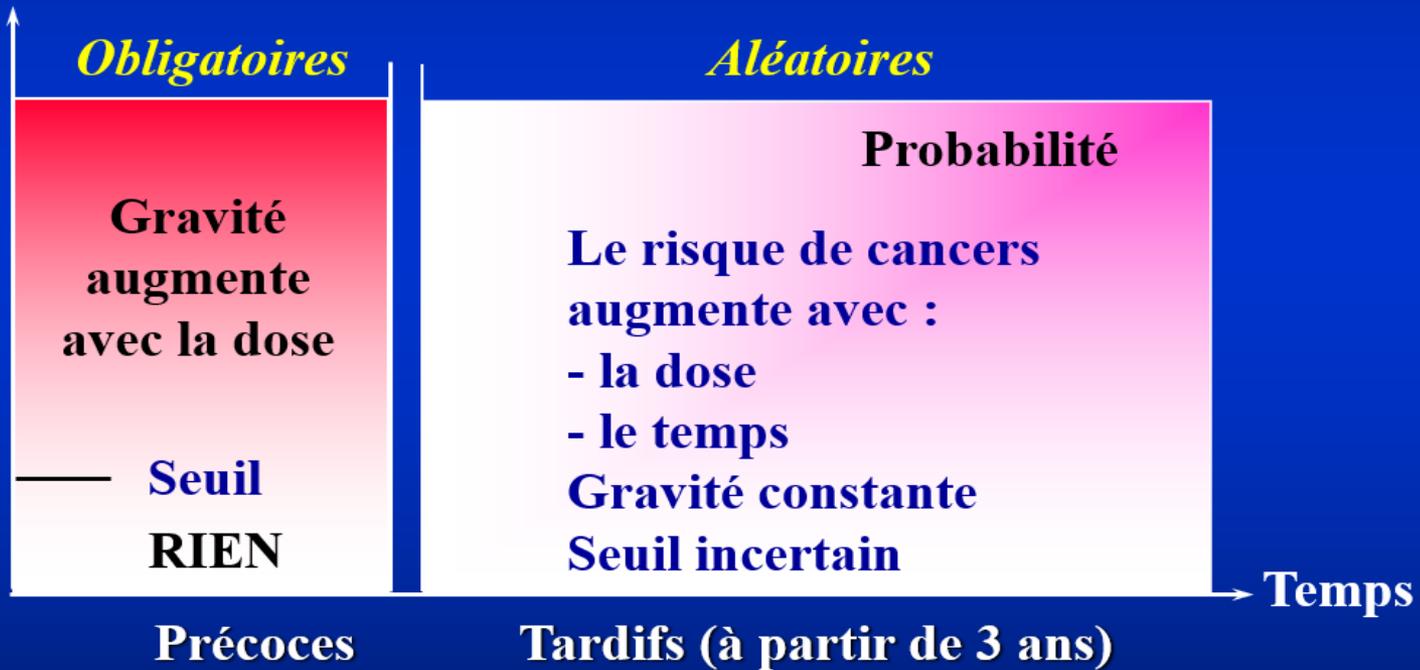
- ✓ On ne nous dit pas tout sur le « NUCLEAIRE »...
- ✓ On nous cache les conséquences des rejets, des **déchets radioactifs**...
- ✓ On nous dit que les frontières arrêtent les **nuages radioactifs** ! ...
- ✓ Quand on lit **que la limite d'exposition de la population est de 1 mSv** ... Qu'en est-il de l'exposition de ces examens ???

ALORS SES BIENFAITS OU
SES RISQUES ...



Effets pathologiques des R.I.

Dose



Facteurs de risque

Avant tout de la DOSE !!!!

- Du débit de dose !
- De la nature du tissu concerné
- Exposition corps entier ou exposition partielle
- De l'âge (surtout)
- Du sexe (peu)
- Probablement de prédispositions génétiques ...



Excès de probabilité
d'un effet différé

**Que se
passe-t-il
aux
faibles
doses ?**

▶ **selon le scientifique ...**

Rien d'observable

Possible seuil en
dessous duquel
il n'y aurait aucun
effet significatif
voire des effets
positifs

Cas observés

▶ **choix du législateur...**

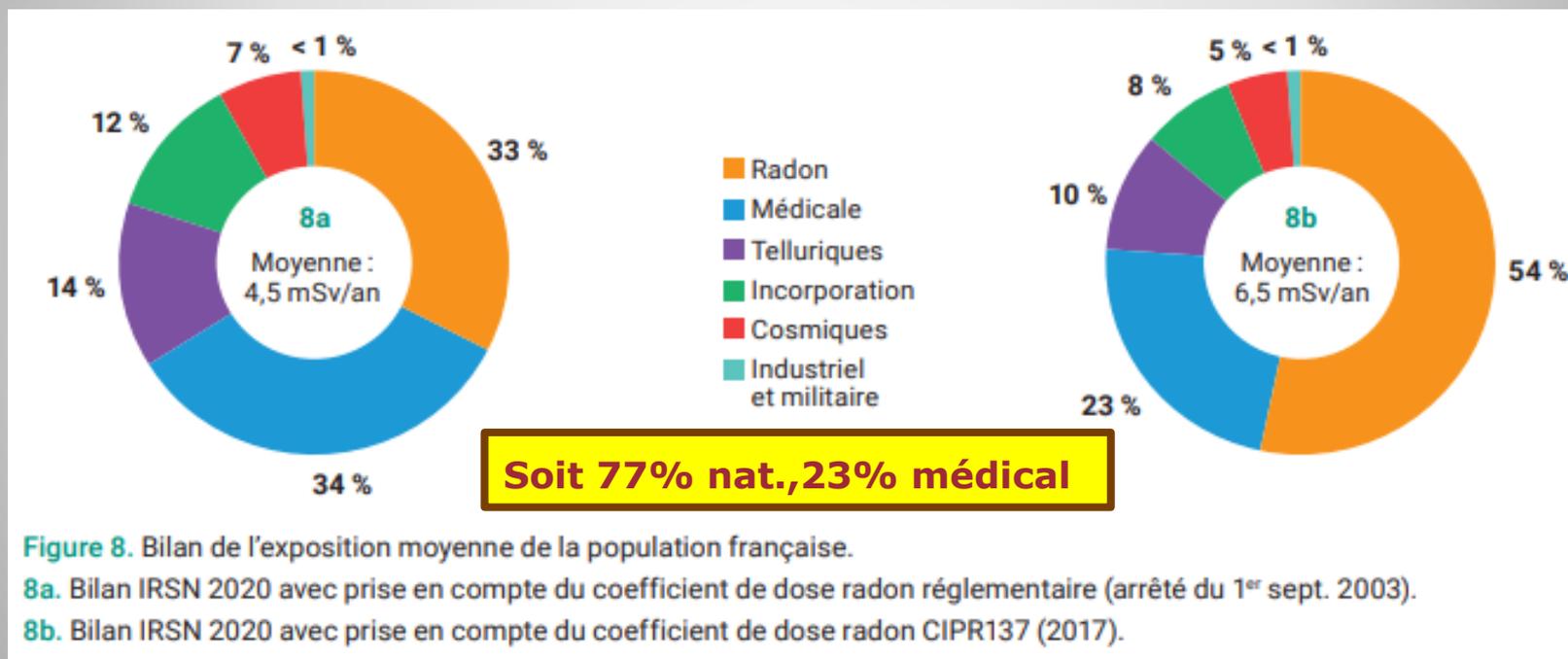
**Deux doses à retenir : 150/200 mSv
(adulte); et 80/100 mSv (enfant).**

Niveau d'exposition individuelle (mSv)

200 mSv

Pr JC Artus 9/04/2025

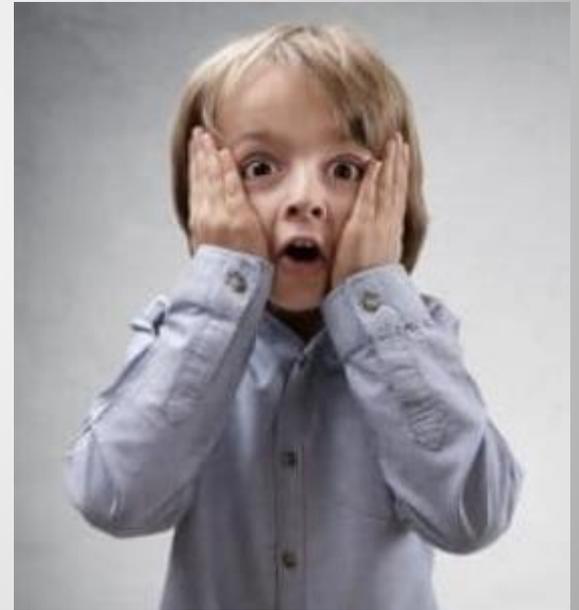
L'exposition des différentes sources d'expositions



Ces valeurs ne sont que des moyennes ... parfois très différentes...

Ordre de grandeur de doses d'examens de radiologie ou de médecine nucléaire

- **Les premiers scanners** corps entier : jusqu'à 80 mSv. Autre fois une radiographie pulmonaire 1mSv
- **Aujourd'hui les scanners** autour de 10 mSv et + selon l'importance du champ d'exposition
- **Tep-Scan** de l'ordre de 15 à 25 mSv



Quelques mSv que vous rembourse la « SECU... »

Examens	Dose délivrée en <u>mSV</u>
Tep - scan	30 à 40
Scanner corps entier	30/40 (100 en 1980)
Scanner abdomen	15
Scanner localisé	10
Rachis lombaire	2 à 5
Scintigraphie myocardique	25
Scintigraphie osseuse	15
Panoramique dentaire	10/15
Radio dentaire	0,05 et <
IRM ou Echo (non RI)	0

Limites de dose pour les travailleurs et le public

Exposition globale

(somme des doses efficaces reçues par expositions externe et interne)

TRAVAILLEURS

professionnellement exposés aux RI

Évolution des limites
Recommandations CIPR

de catégorie

A 20 mSv sur
12 mois consécutifs*

Décret n° 2003 - 296
*35 mSv / 12 mois
pendant 2 ans

B 6 mSv sur
12 mois consécutifs

PUBLIC

1 mSv / an

Décret n° 2002 - 460

Pr JC Artus 9/04/2025



**Prise en
charge du
patient : la
dose ? ... ou
l'humanisme ?
Les deux !!!**

La radioprotection

(exemplaire)

Dispositions réglementaires pour le
Public et aux personnes
Professionnellement exposées ...

Depuis mars 2003 (en France) s'applique aux
patients médicalement exposés

Trois grands principes fondamentaux

- **Justification de l'exposition**
- **Optimisation ...**
- **Limitation des doses**

Justification de l'exposition

- L'exposition aux R.I. est-elle vraiment nécessaire ?
- Son apport est-il vraiment utile ?
- Ne peut-on pas faire autrement ?
- Le Bénéfice doit être plus grand que la Contrainte ($B > C$) !!

Optimisation

- L'exposition décidée, acceptée, justifiée ...
- Elle doit être le plus faible possible ...
- Autant que faire se peut ...
- Augmenter le rapport Bénéf./Contr.
- ALARA : As Low as reasonably Achievable

Le principe de précaution n'est pas le
« risque 0 » !

Limitation des doses

Réglementation qui doit limiter les expositions (*en dehors des expositions accidentelles*)

Limites de doses définies

- Pour le **public**
- Pour les personnes professionnellement exposées (**DATR**)
- Limites corps entier mais aussi extrémités
- Limites dérivées (relatives à la contamination internes (exprimées en Bq par unité de masse ou volume)
- **Pas pour les patients mais NRD (?)**
(*Niveau de Référence Diagnostique*)

Détournement de risques «MINEURS»

Les OGM ...
Les glyphosates,
Pollutions chimiques ...
Les REM, les lignes à (HT),
Le « nucléaire » !
Les IEI, (Into. Idiop. Envir.)
Les médicaments...
Le *Lévothyrox*), ...
A ce jour, les vaccins ..
Etc. ...



Expert

RISQUE

Public

Conscience

Connaissances

Perception

Quantitatif

Qualitatif

Peur

Rumeur

Maîtrise
NORMES

LE DÉCALAGE

infotech

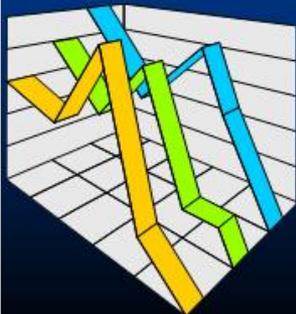
Comportements



Les espaces cindyniques !

Science

Humanisme



Epistémologie

Déontologie

Modèles

Règles

Finalités

Objectifs

Acceptabilité

Données

Valeurs

Statistiques

Axiologique

DESS 12 nov 2001 Pr. JC Artus

NB : **Précisions sémantiques**

Epistémologie : consiste à faire apparaître des organisations de concepts (*expertise ou sachant ...*)

Déontologie : les règles et des devoirs régissant une profession ... (*ce n'est pas le risque zéro ...*)

Axiologie : valeurs sociologiques et morales (*aujourd'hui indéniablement liées aux réseaux sociaux*)

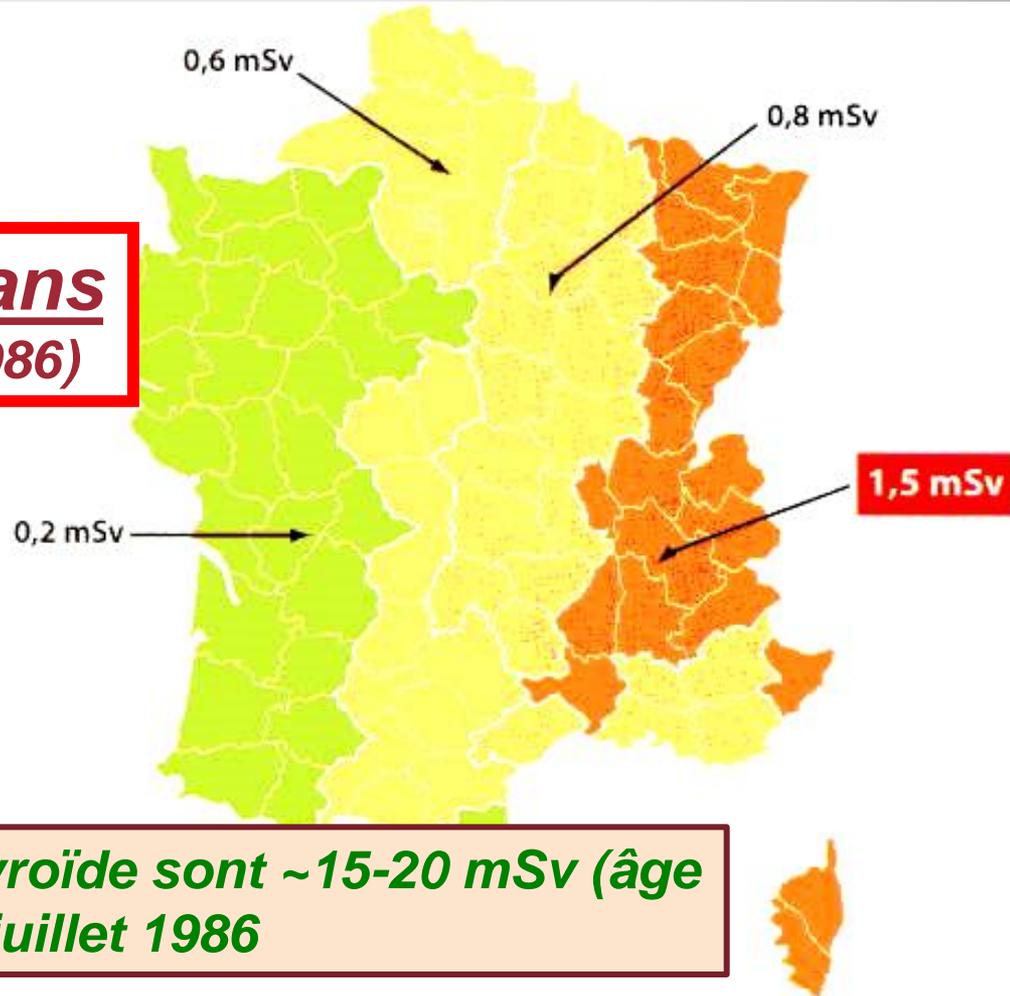
**Alors convictions ? Mensonges ? ...
où
Ignares de ces connaissances**



Les Scientifiques qui mesurent ... après Tchernobyl

Source : IRSN
2001

Valeurs max sur 60 ans
(dont 1/3 reçue en 1986)

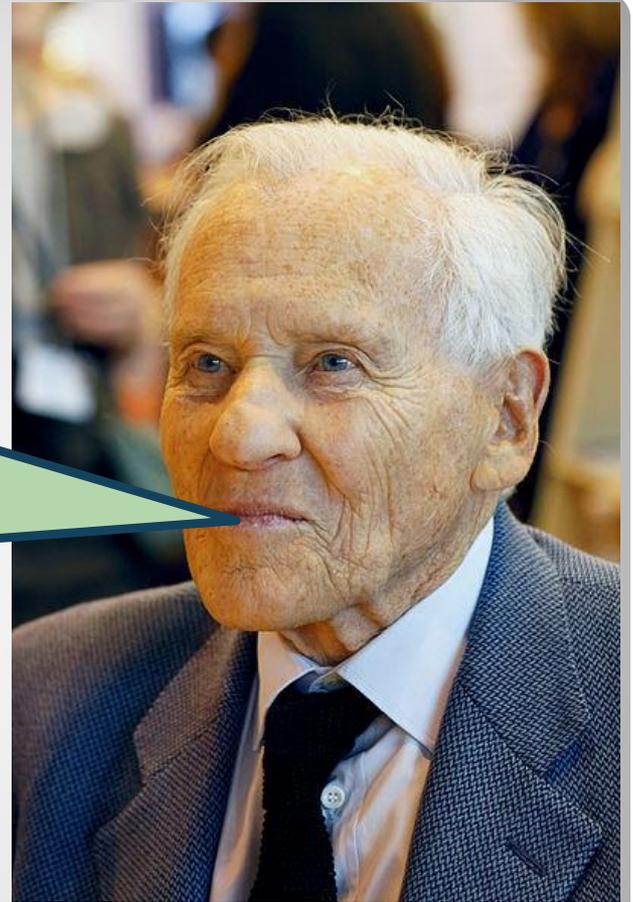


les doses max à la thyroïde sont ~15-20 mSv (âge 5 ans) reçues en mai-juillet 1986

Ou ceux qui n'ont que des convictions ...!



*Je vous le dis, ce qui
a le plus changé le
Monde, depuis deux
ou trois siècles ...
c'est la Science !*



***Et pourtant les philosophes
l'affirment ...***



*Deux choses sont infinies :
l'Univers et la Bêtise
Humaine ...
Mais pour l'Univers, je n'en
ai pas encore la certitude
absolue ... !*
Albert Einstein



**Gardons l'espoir, mais
de grâce
Arrêtons d'avoir peur***

...

**N'éteignons pas la
Lumière du Futur****

*** Pr Maurice TUBIANA**

**** Pr Jean-Marie LEHN**