

PETITE HISTOIRE
DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

22 – RADIOACTIVITÉ
RAYONNEMENTS IONISANTS
RADIOPROTECTION

Alain Bouquet

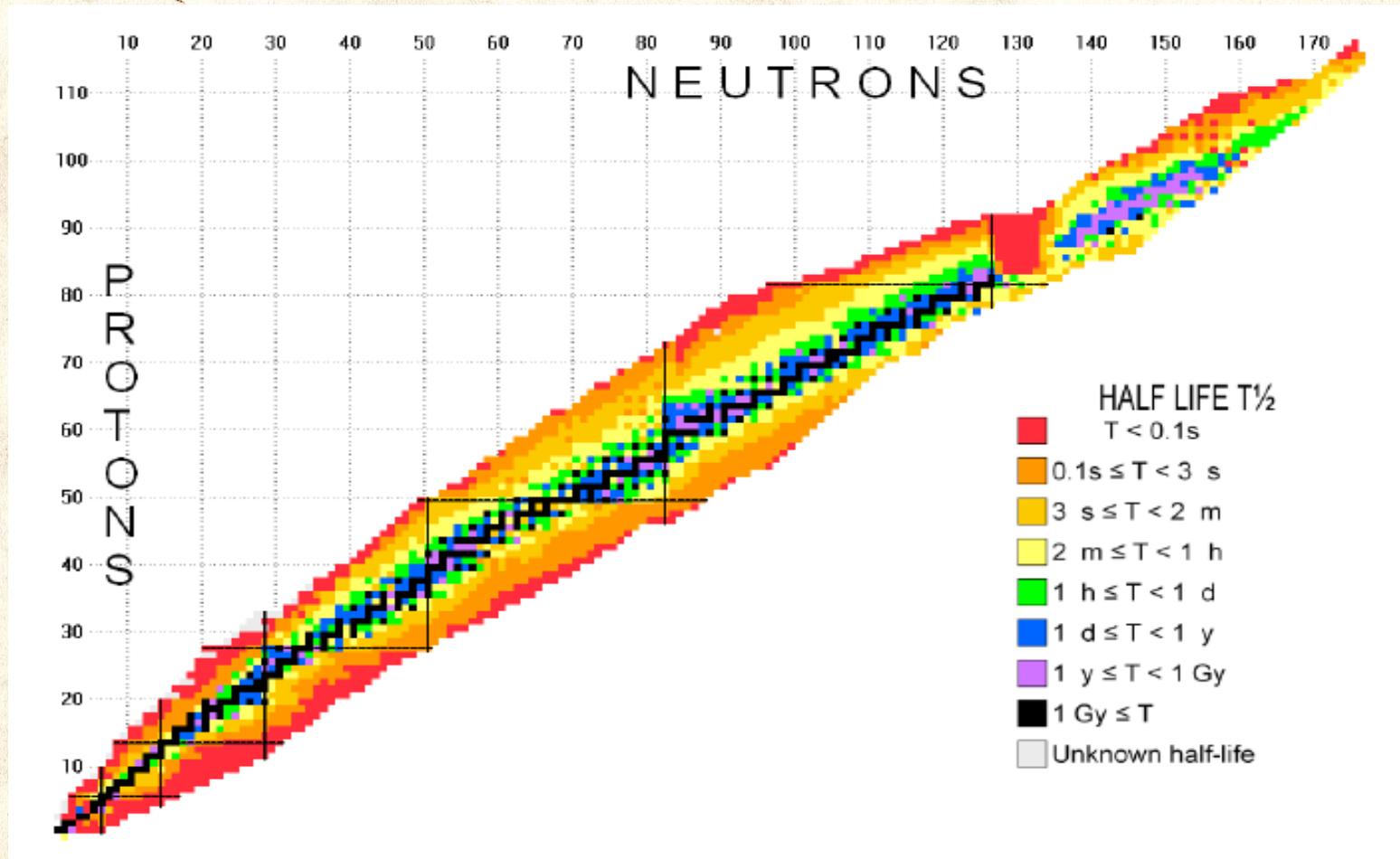
Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

$\alpha, \beta, \gamma \dots$

RADIOACTIVITÉ

- La plupart des noyaux sont instables

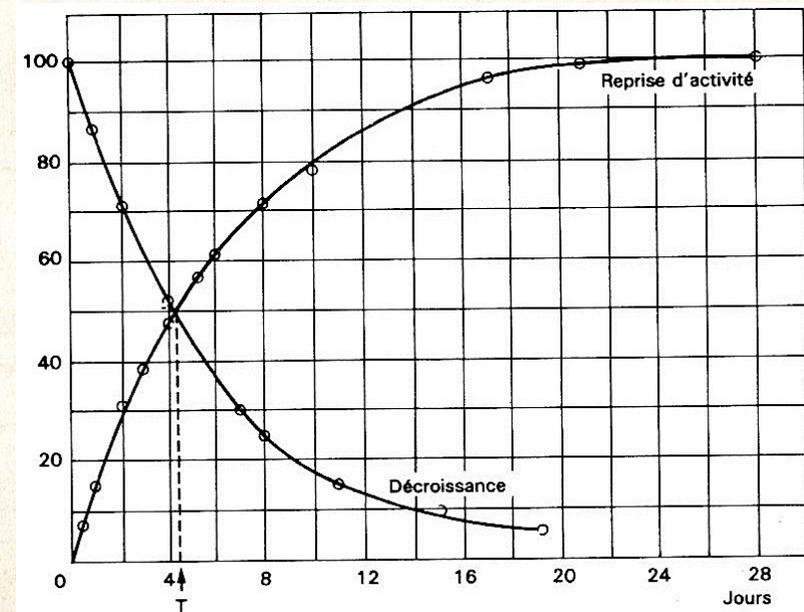


RADIOACTIVITÉ

- Phénomène aléatoire : impossible de savoir quand un noyau donné se désintègre (transmute)
- MAIS **probabilité constante par unité de temps** pour un noyau donné de se désintégrer
- \Rightarrow nombre $N(t)$ de noyaux radioactifs exponentiellement décroissant

$$N(t) = N(0) e^{-t/\tau} = N(0) 2^{-t/t_{1/2}}$$

- $t_{1/2}$ est la *demi-vie* = temps au bout duquel la moitié des noyaux a disparu
- $t_{1/2} = \tau \ln 2 = 0,69 \tau$
- Durée extrêmement variable d'un noyau à l'autre



Décroissance de la radioactivité du thorium X et reprise d'activité du thorium purifié (Rutherford & Soddy 1902)

DEMI-VIES

Noyau	Période	Mode
Uranium 238	4.47 milliards d'années	Alpha
Potassium 40	1.28 milliards d'années	Bêta
Iode 129	15.7 millions d'années	Bêta
Plutonium 239	24 000 ans	Alpha
Carbone 14	5730 ans	Bêta
Radium 226	1602 ans	Alpha
Césium 137	30 ans	Bêta puis gamma
Strontium 90	28 ans	Bêta
Cobalt 60	5.26 ans	Bêta puis gamma
Polonium 210	138 jours	Alpha
Iode 131	8 jours	Bêta
Iode 130	12 heures	Bêta
Iode 132	2.3 heures	Bêta
Polonium 216	158 millisecondes	Alpha
Polonium 212	0.3 microsecondes	Alpha

Au bout de 10 demi-vies, il reste encore $1/2^{10} \sim 1/1000$ de l'activité initiale !

LE BECQUEREL (Bq)

- 1 becquerel = 1 désintégration par seconde
- Corrélation entre activité A (mesurée en becquerels), demi-vie $t_{1/2}$ (mesurée en secondes) et masse M (en kg) d'un corps radioactif de masse atomique m

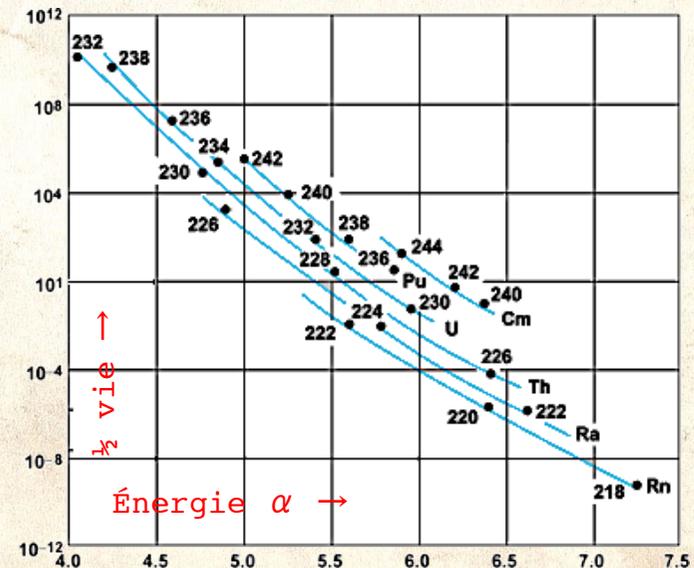
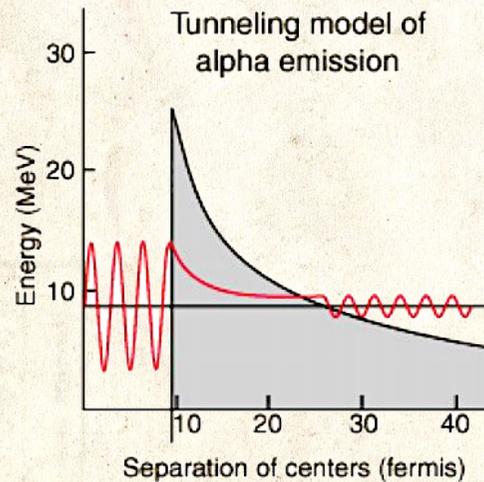
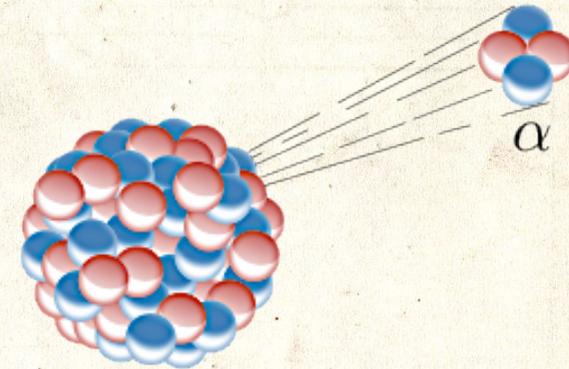
$$A = \frac{1}{2} N/t_{1/2} = (M/m) 3 \cdot 10^{26} / t_{1/2} \quad [\text{nombre d'Avogadro } 6 \cdot 10^{23}]$$

○ Exemples

- 1 kg d'uranium 238 ($t_{1/2} = 4,5$ milliards d'années) → 12 MBq
- 1 kg de plutonium 239 ($t_{1/2} = 24\,000$ ans) → 2,3 TBq [10^{12}]
- 1 kg de radium 226 ($t_{1/2} = 1\,600$ ans) → 37 TBq [1000 Ci]
- 1 kg de cobalt 60 ($t_{1/2} = 5,3$ ans) → 31 PBq [10^{15}]
- 1 kg d'iode 131 ($t_{1/2} = 8$ jours) → 3,3 EBq [10^{18}]
- 1 l d'eau de mer (^{40}K essentiellement) → 12 Bq
- 1 kg de granite, de brique ou de béton → 1 000 Bq
- un corps humain (activité: 60% ^{40}K , 40% ^{14}C) → 10 000 Bq
- 1 kg de cendres de charbon → 100 000 Bq

RAYONNEMENT ALPHA

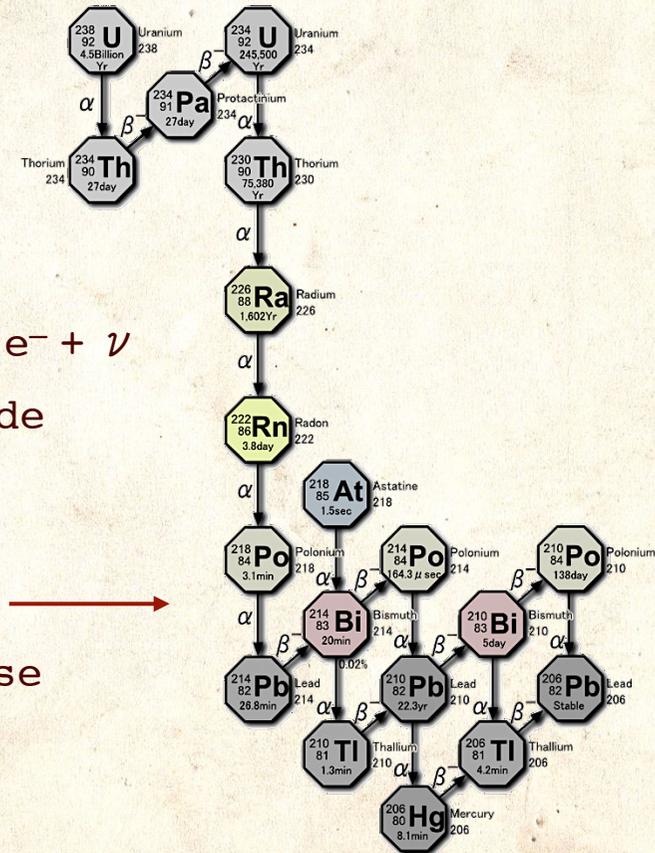
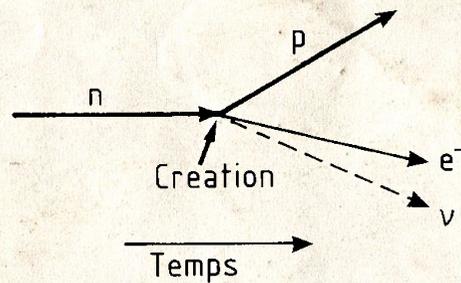
- Désintégration (transmutation) Alpha
 - Noyau (A,Z) → Noyau (A-4,Z-2) + ${}^4_2\text{He}$ (particule α) + énergie précise
 - Exemple : ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + \alpha + 5,407 \text{ MeV}$
- Énergie = différence d'énergie de liaison entre noyau initial et noyau final
- Effet tunnel \Rightarrow probabilité de transition \nearrow exponentiellement avec l'énergie émise



RAYONNEMENT BÊTA

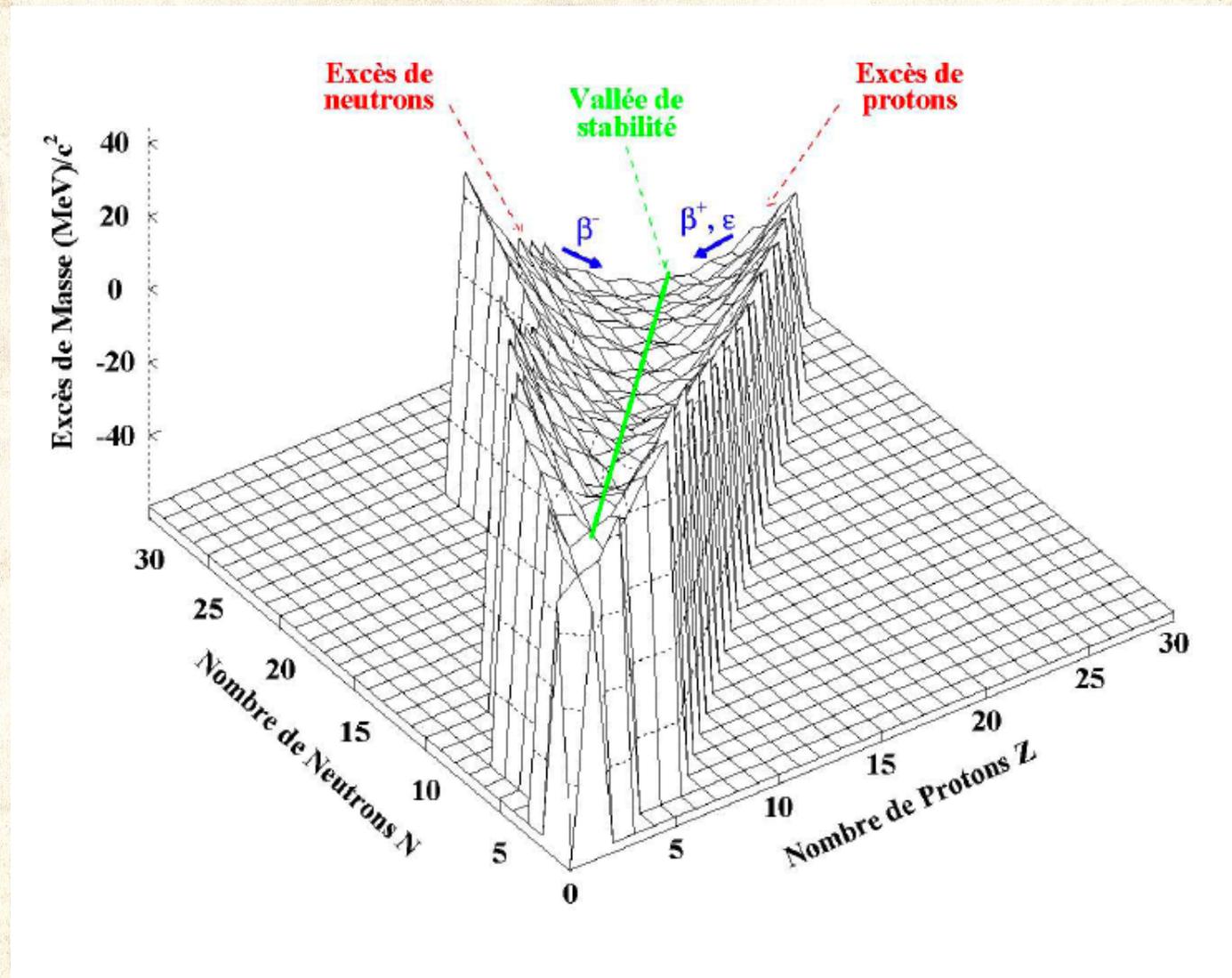
○ Bêta ±

- Noyau (A,Z) → Noyau (A,Z+1) + e⁻ (particule β⁻) + énergie
- Noyau (A,Z) → Noyau (A,Z-1) + e⁺ (particule β⁺) + énergie
- Exemple : $^{32}_{15}\text{P} \rightarrow ^{32}_{16}\text{S} + e^{-} + \text{distribution } \textit{continue} \text{ d'énergie}$



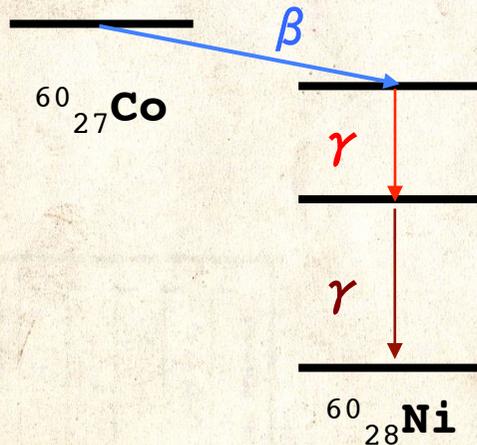
- Théorie de Fermi : transmutation $n \rightleftharpoons p + e^{-} + \nu$
- Probabilité ↗↗ avec écart entre nombre de protons et nombre de neutrons
 - ⇒ « vallée de stabilité »
 - ⇒ alternance de transmutations α et β →
- Probabilité ↗ avec l'énergie totale émise
- Énergie répartie entre l'électron et le neutrino ⇒ spectre continu

VALLÉE DE STABILITÉ



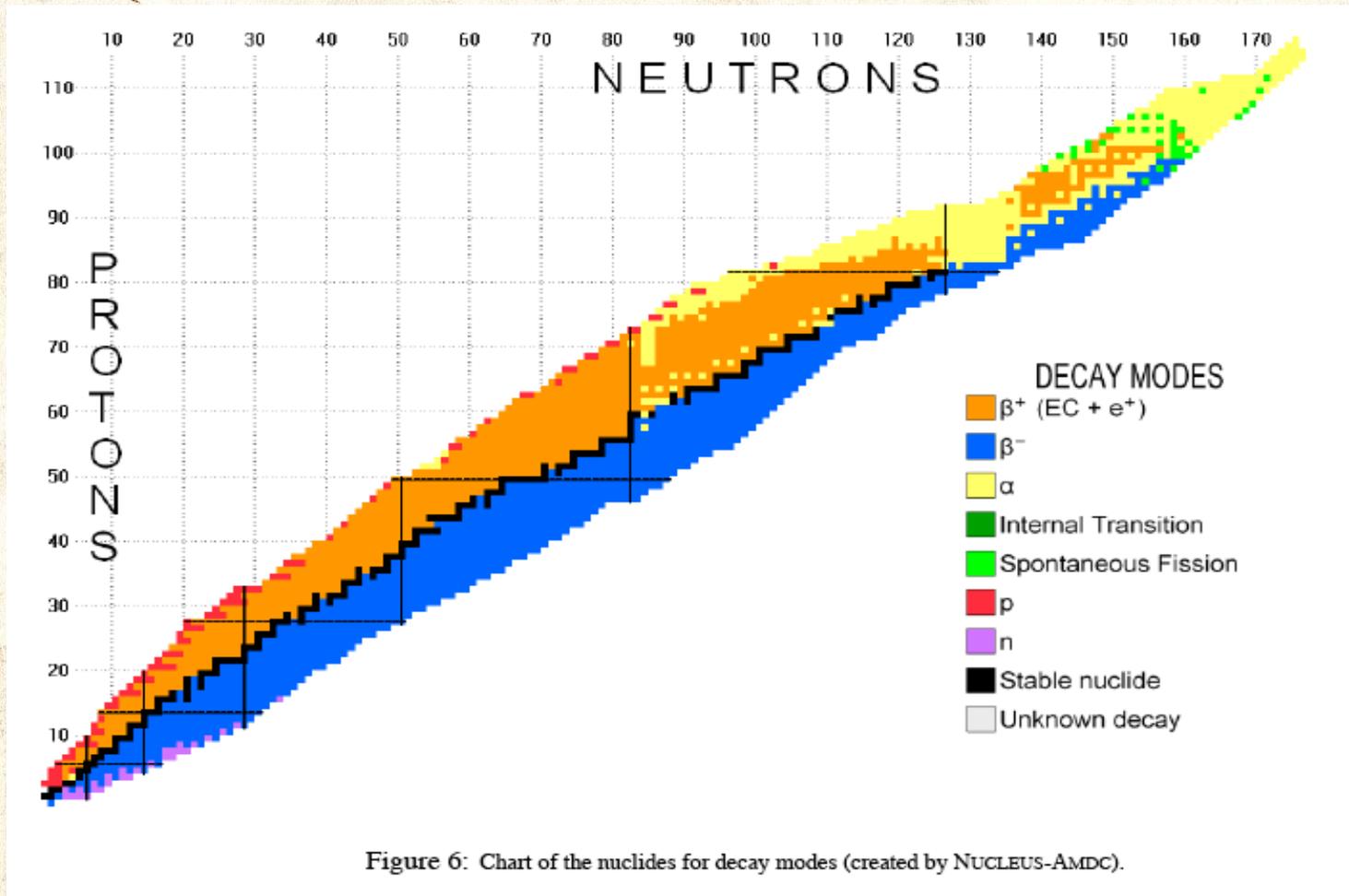
RAYONNEMENT GAMMA

- Réarrangement de la structure interne d'un noyau
 - Noyau excité $(A, Z) \rightarrow$ Noyau $(A, Z) + \gamma$ d'énergie précise
 - Exemple : ${}^{60}_{28}\text{Ni}^* \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + \gamma_1 + 1,17 \text{ MeV} + \gamma_2 + 1,33 \text{ MeV}$
-  conséquence d'un « accident » antérieur du noyau
 - collision avec un autre noyau \rightarrow état excité \rightarrow désexcitation γ
 - transmutation α ou β \rightarrow noyau « fils » dans un état excité \rightarrow désexcitation γ
 - Exemple : ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni}^* + \beta$ de 0,31 MeV
 - $\hookrightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni}^* + \gamma \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + \gamma$



- Transition électromagnétique
- \rightarrow très rapide (beaucoup plus que les α et les β)

MODES DE DÉSINTÉGRATION



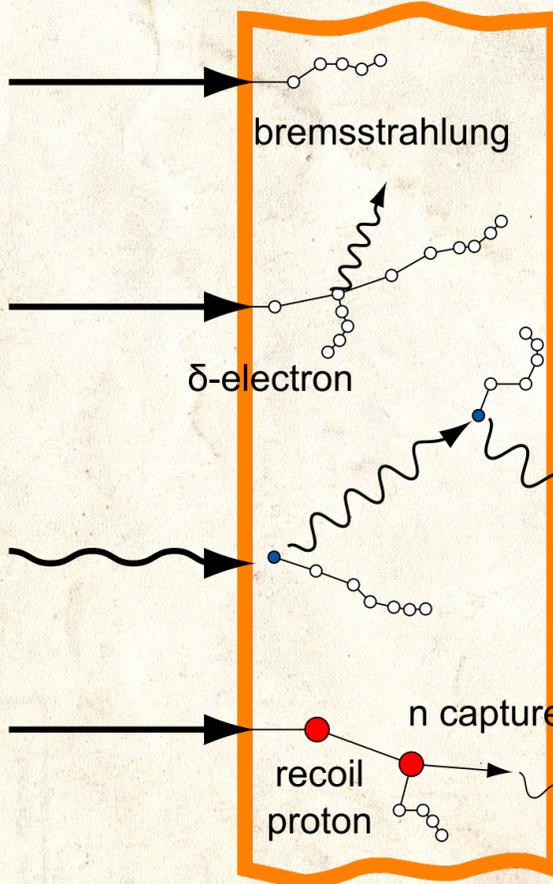


RAYONNEMENTS IONISANTS

RAYONNEMENTS IONISANTS

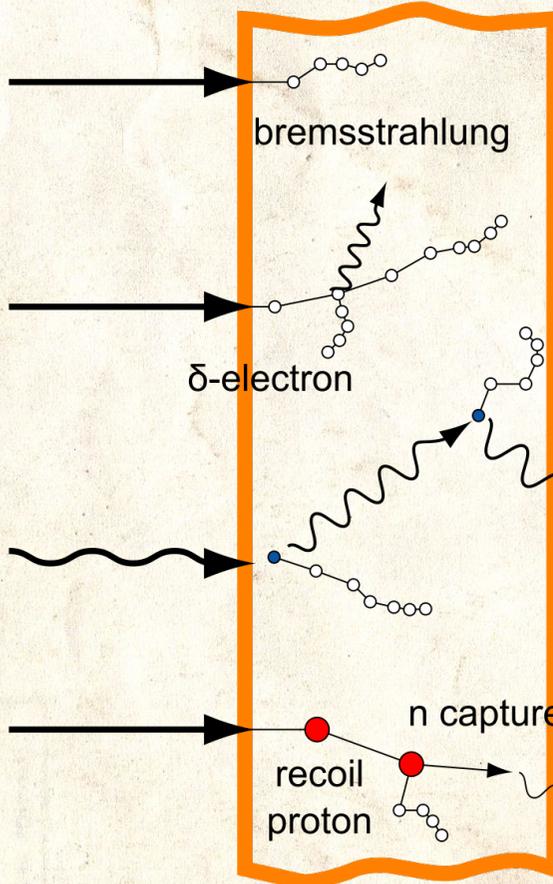
- Ionisant = qui crée des ions en arrachant des électrons aux atomes
- Mécanismes différents selon le rayonnement

α



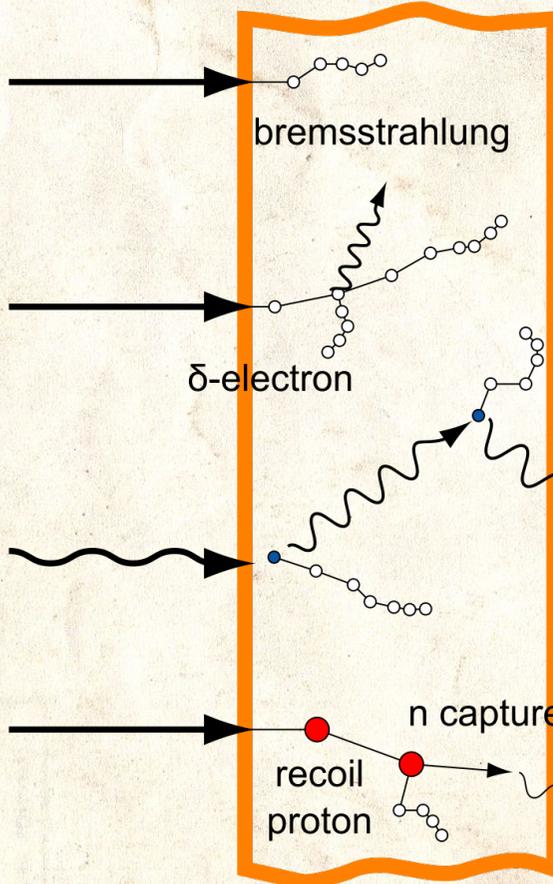
particule chargée **lourde**

β



particule chargée **légère**

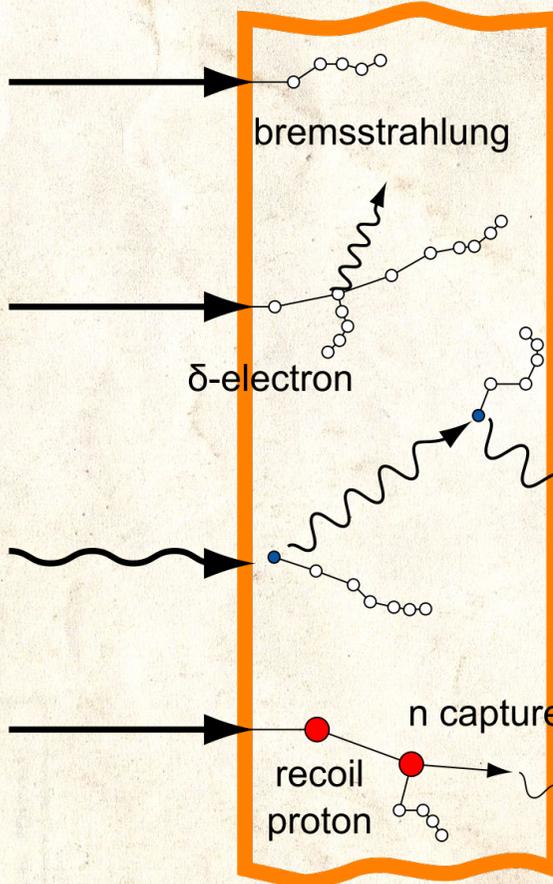
γ



3 effets possibles

- photoélectrique : $\gamma \rightarrow e$
- Compton : $\gamma \rightarrow e + \gamma$
- paires : $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$

n



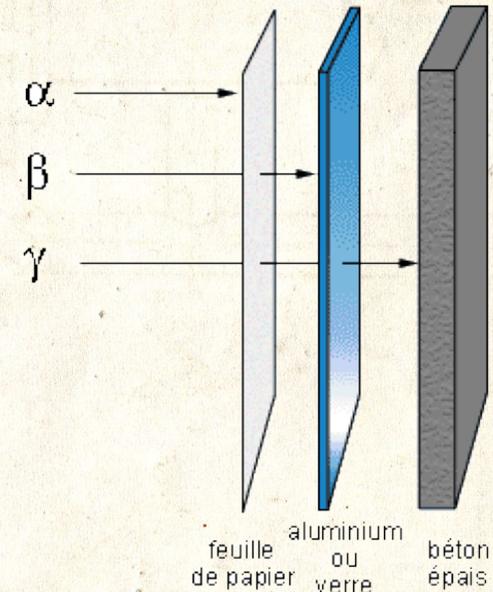
collision avec un noyau

INTERACTIONS AVEC LA MATIÈRE

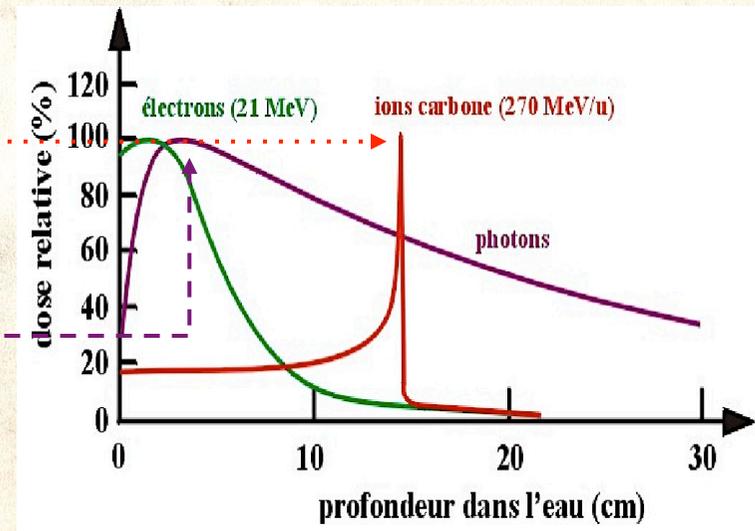
- Section efficace σ [une pour chaque type d'interaction]
- Densité n du milieu rencontré \rightarrow libre parcours moyen $\lambda = 1/n\sigma$ avant d'interagir
- \Rightarrow atténuation exponentielle du flux $F(x) = F(0) \exp\{-x/\lambda\}$
- \rightarrow longueur de demi-atténuation L_2 , ou de diminution de 90% L_{10}
- *Toutes chose égales par ailleurs*, plus la densité n est élevée et plus λ est petit, donc plus l'atténuation est forte \rightarrow blindages de plomb
- Les sections efficaces varient avec l'énergie [en général \nearrow quand l'énergie \searrow]
- \Rightarrow l'interaction maximale a lieu un peu à *l'intérieur* du milieu
- \Rightarrow pic de Bragg (α) ou crête de Tavernier (γ)

ABSORPTION

- Interaction rayonnement matière
 - α , p → ionisation des électrons → perte rapide d'énergie → pénétration faible
 - β → interaction avec les électrons et les noyaux (rayonnement de freinage) → pénétration plus importante
 - γ → diffusion Compton, effet photoélectrique → pénétration profonde
 - Neutrons → collisions sur les noyaux → pénétration très profonde

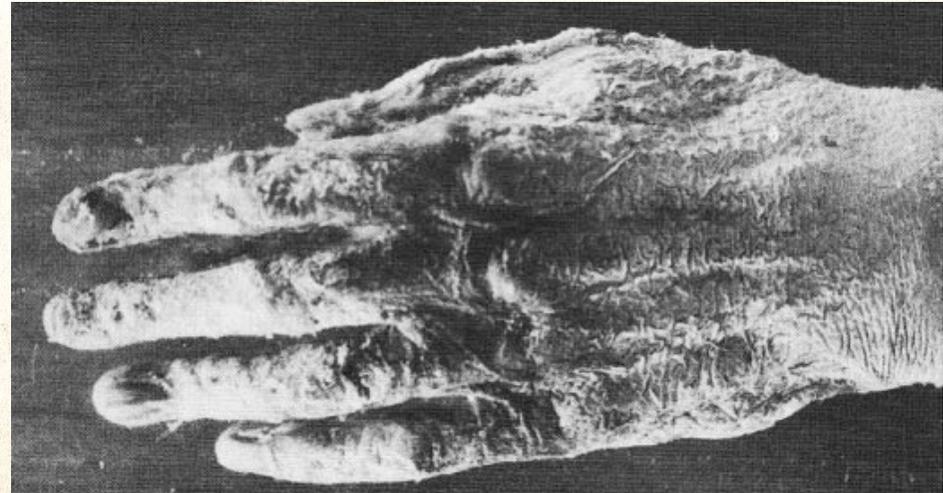


- Pic de Bragg
 - juste avant l'arrêt (brutal)
 - très marqué pour les ions lourds
- Crête de Tavernier
 - maximum peu après l'entrée
 - les γ perdent peu d'énergie (soit ils passent soit ils sont arrêtés)



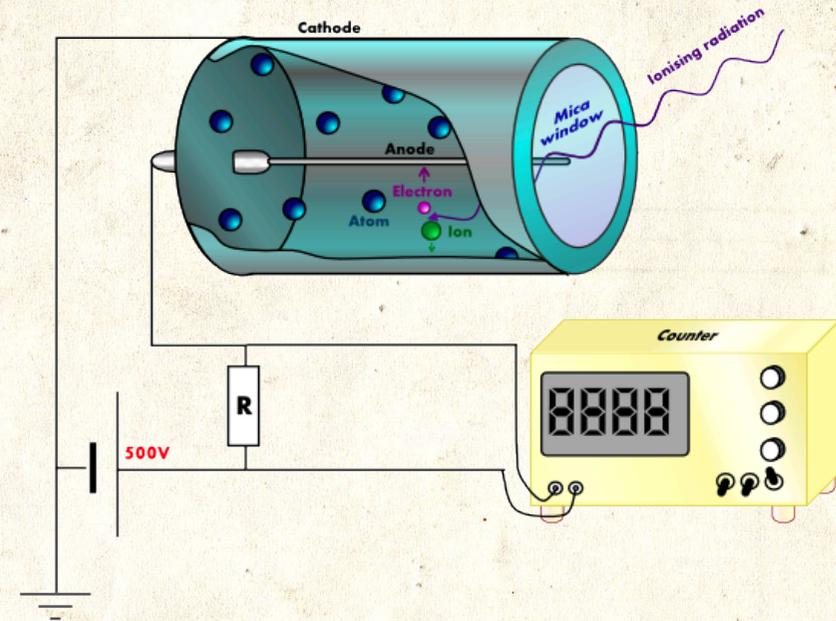
ÉNERGÉTIQUE

- Énergie de liaison nucléaire ~ MeV
- Énergie de liaison atomique ou moléculaire ~ eV
- ⇒ une particule de 1 MeV peut briser ~ **10⁶** liaisons chimiques
- ⇒ ionisation des atomes (éjection d'électrons)
 - ⇒ rayonnements **ionisants**
- ⇒ dépôts d'énergie
 - ⇒ dislocations dans les matériaux, fragilisation
 - ⇒ destruction de tissus biologiques, radiodermites , brûlures,
 - ⇒ stérilisation (instruments, aliments...)



DÉTECTEURS DE RADIOACTIVITÉ

- Compteurs Geiger
 - Alphas (si fenêtre en mica)
 - Bêtas
 - Gammas
- utilisent l'ionisation d'un gaz



- 10^6 électrons ne font pas un courant intense
- → amplification par avalanche (\Rightarrow haute tension)
- → comptent mais ne mesurent ni l'identité ni l'énergie

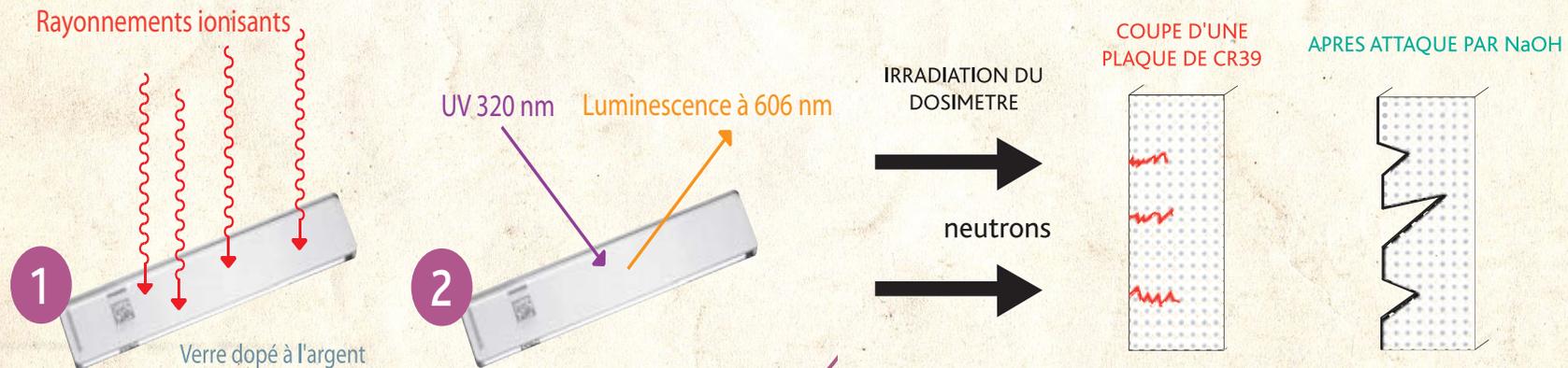
DOSIMÈTRES

- Mesurent la quantité d'énergie (dose) reçue
 - dose instantanée ($\mu\text{Sv/h}$) souvent des compteurs Geiger miniaturisés
 - et/ou dose totale (μSv ou mSv) reçue pendant la durée d'exposition
- Plusieurs modèles
 - films photographiques (ne sont plus utilisés)
 - dosimètres électroniques



Compteur Radex RD1503

- β : 0,3–1,5 MeV
- γ : 0,1–1,2 MeV
- 0,5–100 mSv/an



Fonctionnement d'un dosimètre à β et γ : les électrons d'ionisation, piégés dans le verre sont révélés sous UV

Fonctionnement d'un dosimètre à neutrons : les neutrons provoquent des failles microscopiques dans le polycarbonate



RadioProtection Cirkus
<http://www.rpcirkus.org/>

EFFETS BIOLOGIQUES

*« J'ai retiré ce radium de la pechblende.
Et j'ai brûlé mes doigts à ce feu défendu »
Aragon (Les yeux d'Elsa 1942)*

LE BECQUEREL, LE GRAY ET LE SIEVERT

- Le **becquerel** compte le nombre de transmutations par seconde
- ☞ cela ne dit rien sur la nature du rayonnement (α β γ neutrons)
- ☞ ni sur l'énergie de ce rayonnement (100 keV, 1 MeV, 10 MeV?)
- or les effets sur la matière (inerte ou vivante) en dépendent !
- ⇒ le **gray** (1 Gy = 100 rad = 1 joule/kg) mesure 1) l'énergie totale 2) absorbée par le milieu (*par unité de masse*)
- ⇒ unité utilisée par les radiothérapeutes
 - 2 Gy/jour (* 25 jours) pour un cancer du sein, par exemple
- Mais l'effet biologique dépend fortement du type de rayonnement et du type de tissu ☞ le **sievert**
 - analogie courante : si 2 enfants se bombardent à coup de boules de neige, le **becquerel** est le nombre de boules envoyées, le **gray**, l'énergie des boules reçues, et le **sievert**, cette énergie affectée d'un coefficient selon la zone touchée (le visage > la poitrine > les jambes par exemple)



L. H. Gray.

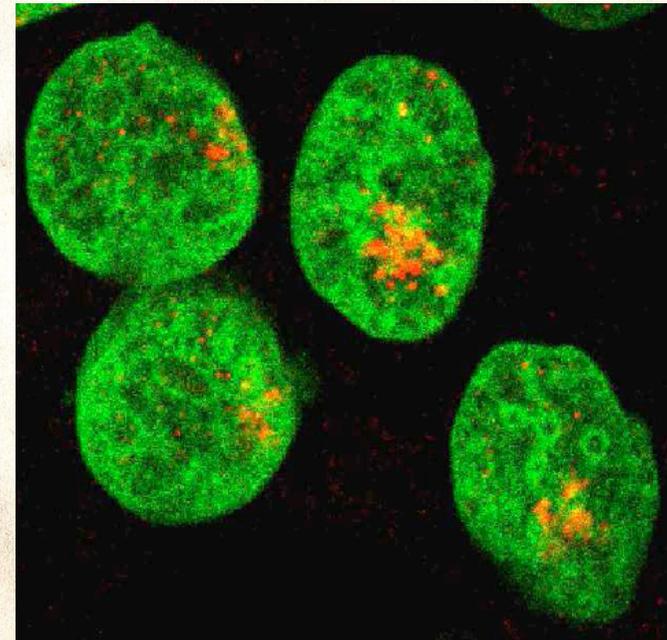
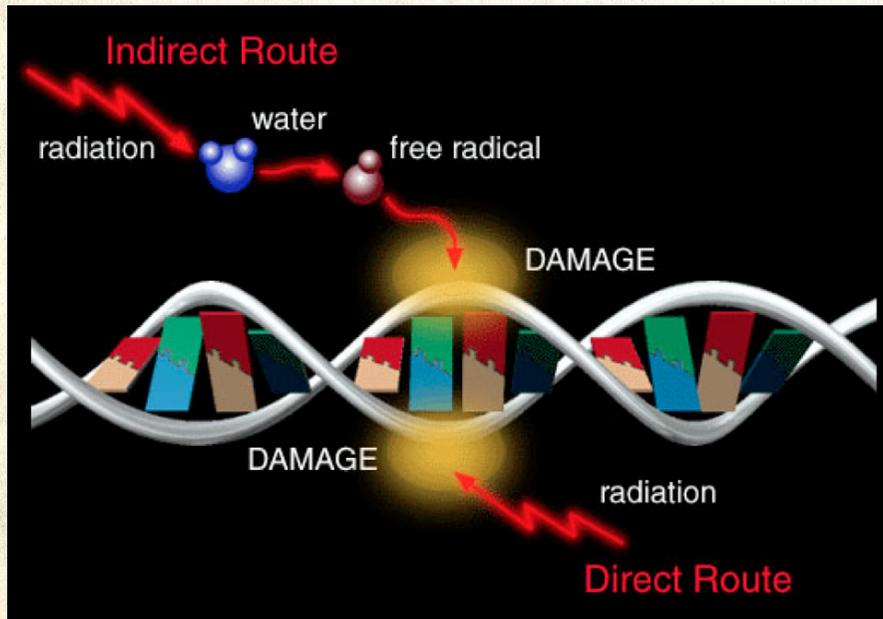
Louis Harold Gray (1905-1965)

ACTION BIOLOGIQUE DES RAYONNEMENTS IONISANTS

- Effets immédiats : dommages aux tissus
 - Effets différés : dommages à l'ADN → cancers ou mutations génétiques
 - Effets déterministes
 - fortes doses (> 500 mSv/an)
 - délai d'apparition court (quelques heures à un mois)
 - effets apparaissant au dessus d'un *seuil*
 - peau : brûlure 1° degré > 5 Gy, 2° degré > 10 Gy, nécrose > 25 Gy
 - gravité ↗ dose (et le débit de dose)
 - Effets stochastiques
 - faibles doses (< 500 mSv/an)
 - délai d'apparition long (plusieurs mois ou années)
 - pas de seuil
 - gravité indépendante de la dose
 - probabilité d'apparition ↗ dose
- Relation linéaire sans seuil,
non démontrée mais utilisée
par précaution

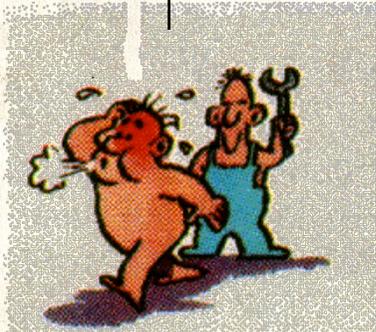
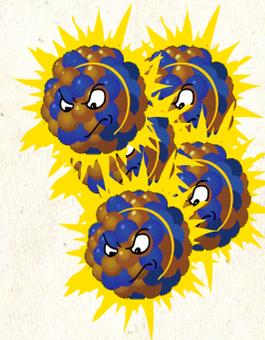
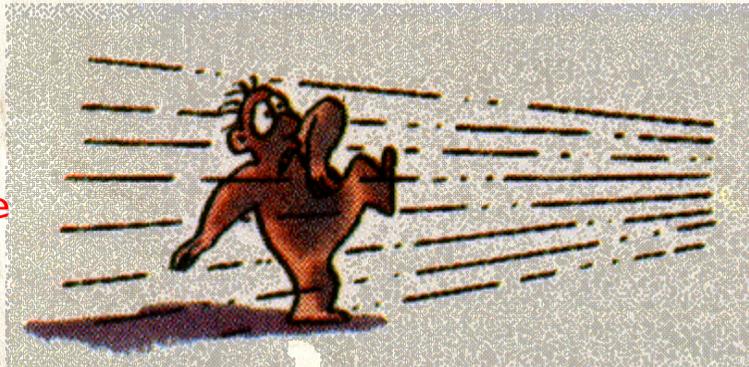
ACTION SUR L'ADN

- Rupture de l'un de brins de l'ADN → possibilité de réparation par la cellule à partir du brin intact
- Formation de radicaux libres comme HO. (pas spécifique des rayonnements ionisants) ^{^ électron non apparié}
- Les cellules les plus sensibles sont celles qui se reproduisent le plus vite → cellules intestinales, sang



EFFETS CELLULAIRES

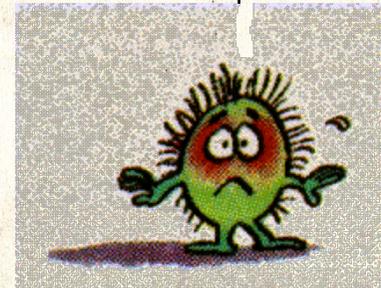
Cellule irradiée



Cellule réparée
effet nul



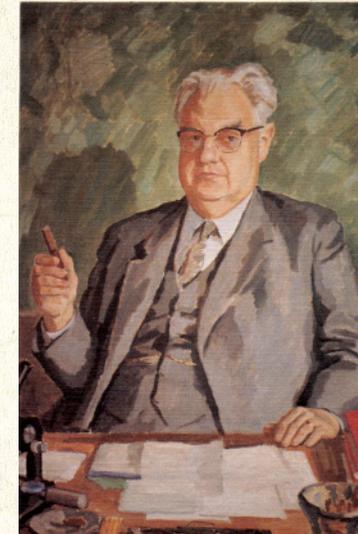
Cellule détruite
effet immédiat



Cellule mutée
effet tardif

© M. Ammerich (RP Cirkus)

LE SIEVERT (Sv)

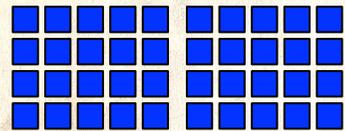


- Tient compte des effets biologiques
 - Dépend de la nature du rayonnement → coefficient W_r
 - Dépend de la nature du tissu → coefficient W_t
- $1 \text{ sievert} = 1 \text{ gray} * W_r * W_t = 100 \text{ rem}$
- Facteurs de pondération
 - $W_r = 1$ pour électrons (β) et photons (γ)
 - $W_r = 10$ pour des neutrons $< 100 \text{ keV}$
 - $W_r = 20$ pour des neutrons $> 100 \text{ keV}$ et des alphas
 - $W_t = 1$ pour l'ensemble de l'organisme (CIPR 103), répartis ainsi
 - 0,12 pour les seins, la moelle osseuse, les poumons, l'estomac et le colon
 - 0,08 pour les organes reproducteurs
 - 0,04 pour l'œsophage, la thyroïde, le foie et la vessie
 - 0,01 pour le cerveau, les os, les glandes salivaires et la peau
 - 0,12 pour l'ensemble des autres tissus
 - $\Rightarrow 100 \text{ mSv}$ au niveau des poumons $\sim 12 \text{ mSv}$ ($100 * 0,12$) sur l'ensemble du corps (mais les conséquences sont différentes)

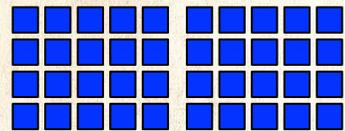
DOSES DE RAYONNEMENT (© XKCD.COM)

■ ~~Dormir près de quelqu'un (50 nSv)~~

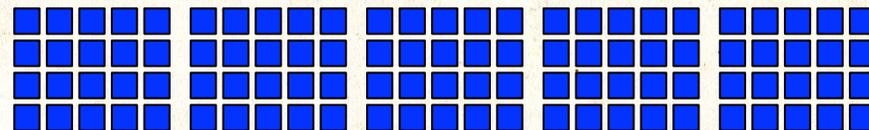
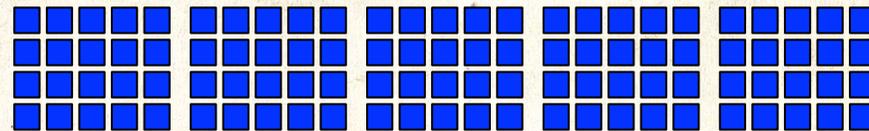
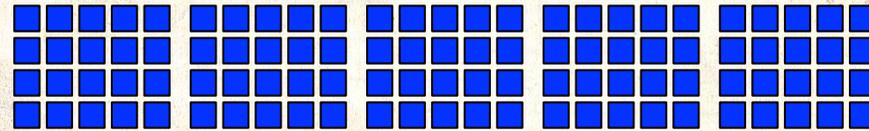
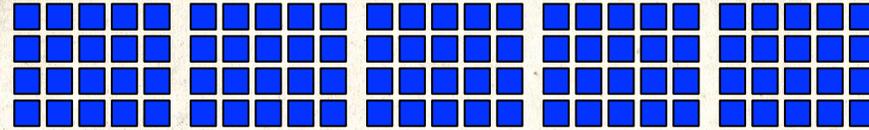
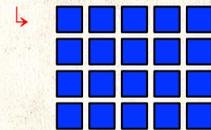
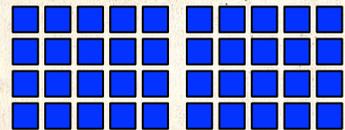
■ Manger une banane (100 nSv)



Dose naturelle quotidienne (6 μ Sv)

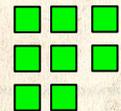


Supplément de dose pour une journée dans le Cantal (1 μ Sv)

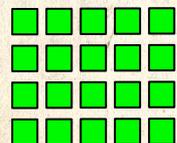


Radiographie des poumons (20 μ Sv)
= 2 cigarettes

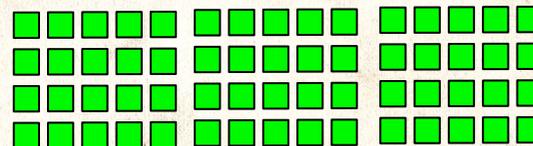
■ Vol Paris-New-York (50 μ Sv)



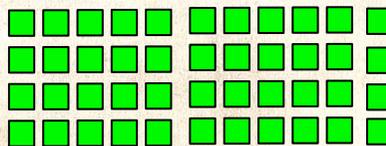
Dose reçue annuellement du potassium 40 interne (400 μ Sv)



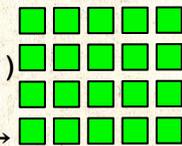
Dose maximale reçue lors de l'accident de Three Mile Island (1 mSv)



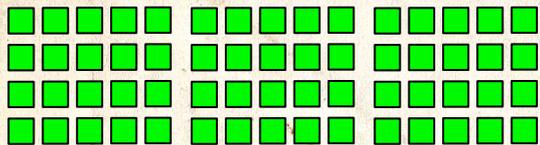
Mammographie (3 mSv)



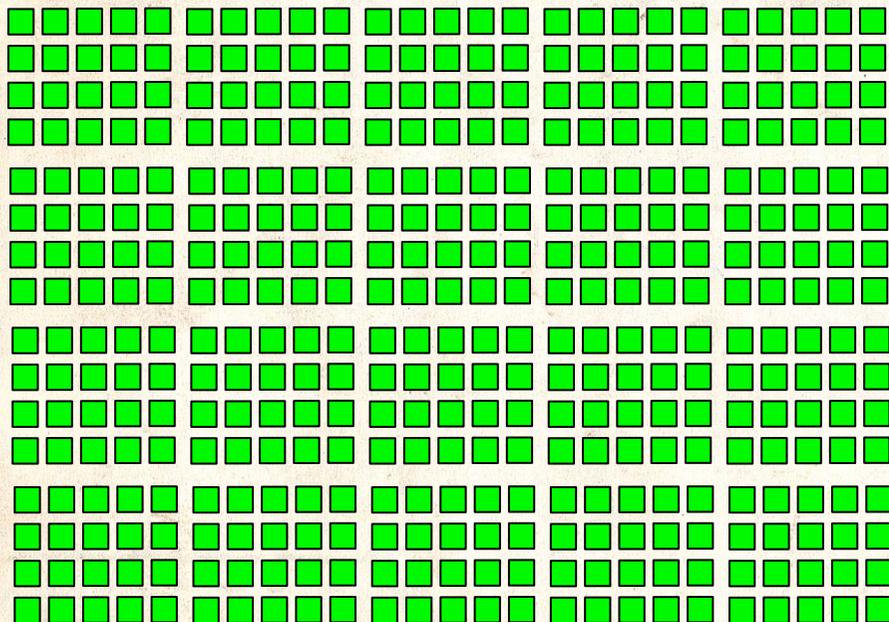
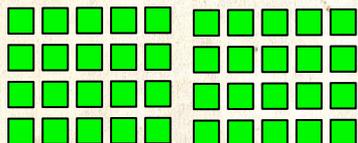
Dose naturelle annuelle (2,3 mSv) + médical (1 mSv) →



DOSES DE RAYONNEMENT (© XKCD.COM)



Scanner de la poitrine (5 mSv)



Dose annuelle maximale autorisée en France (20 mSv)



Dose annuelle maximale (USA) pour les employés du nucléaire (50 mSv)



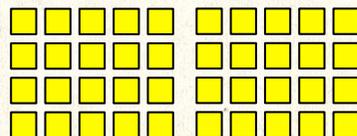
Dose annuelle où apparaît un *risque* de cancer (100 mSv)



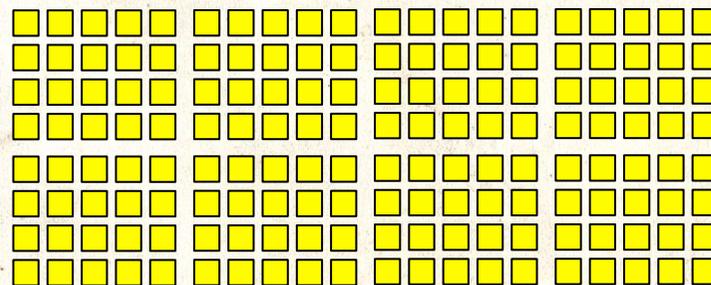
Dose maximale tolérée (USA) en cas d'urgence grave (250 mSv)



Apparition de symptômes d'irradiation (400 mSv), seuil très variable



Symptômes d'irradiation aiguë (2 Sv), issue parfois fatale

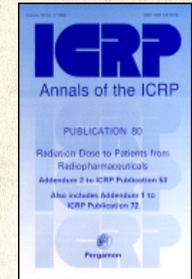


Irradiation généralement fatale (8 Sv)

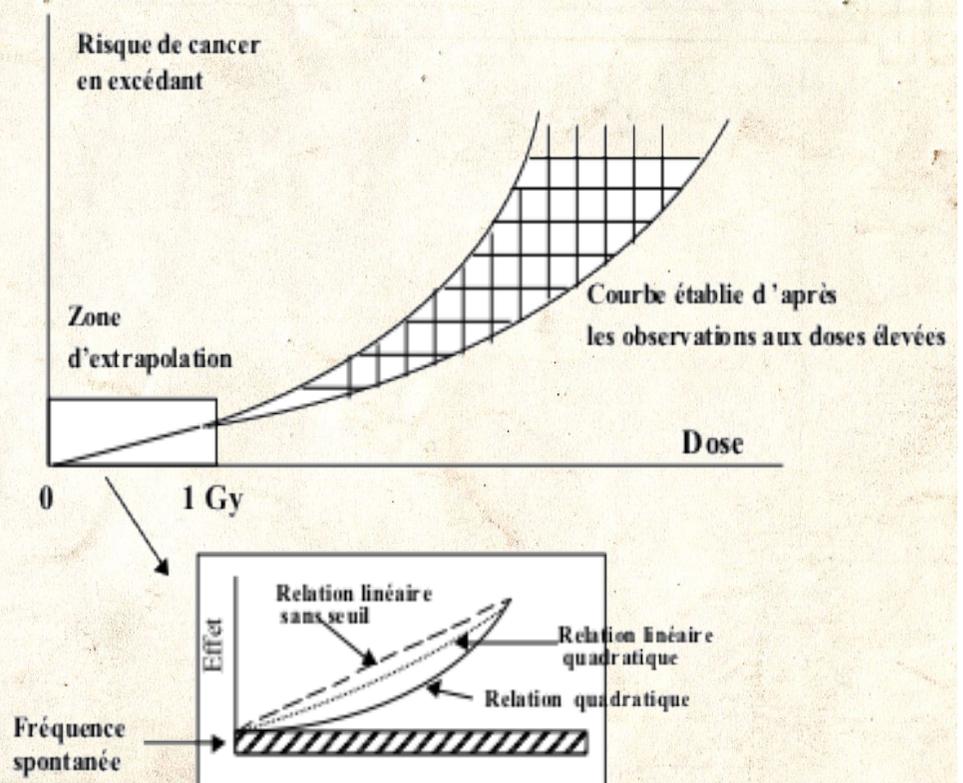


Dose reçue en 10mn à côté du réacteur de Tchernobyl juste après l'explosion (50 Sv)

LA CIPR (ICRP)



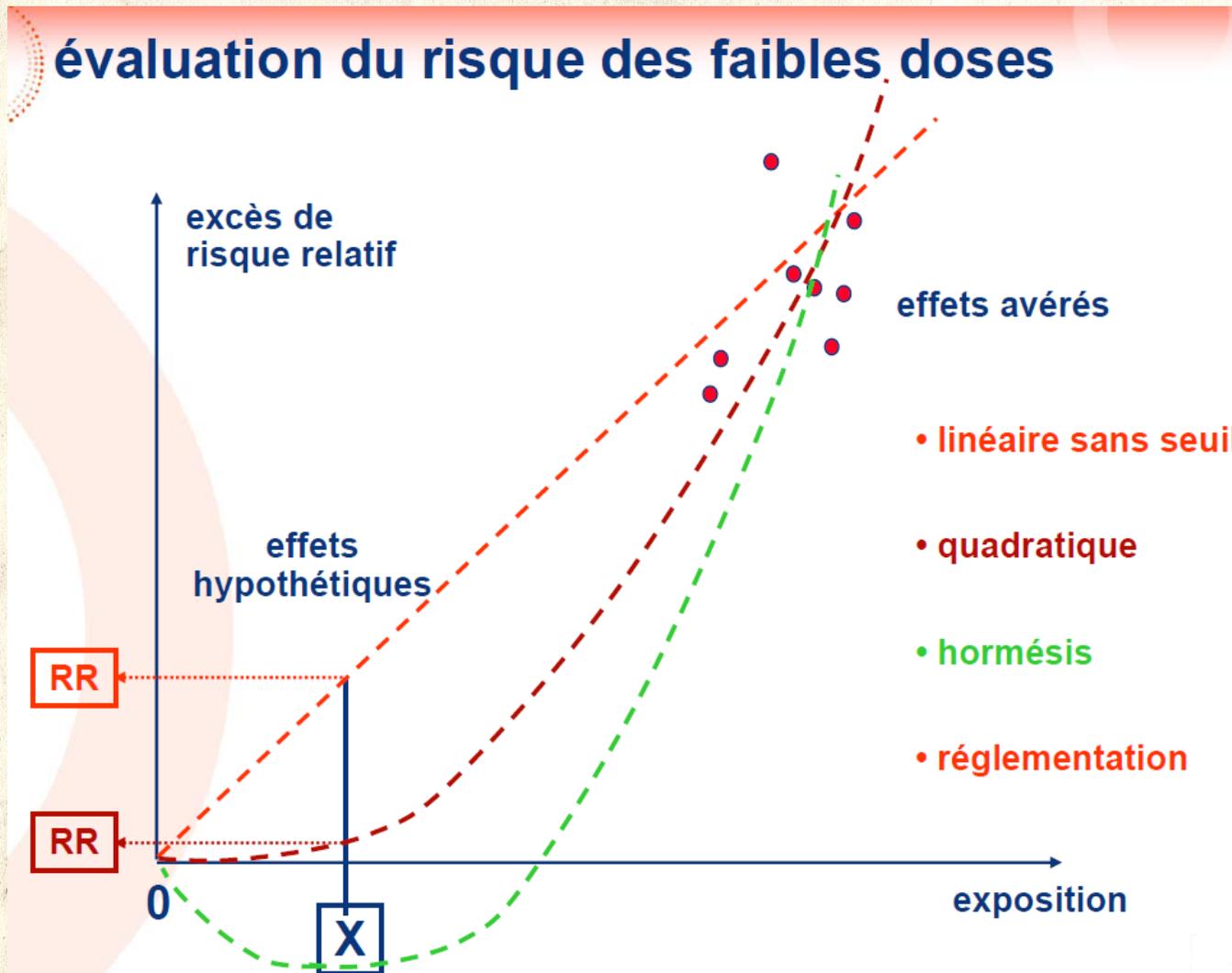
- Commission Internationale de Protection Radiologique
 - Fondée en 1928 (à l'origine vis à vis des rayons X et du radium)
- recommandations mises à jour périodiquement (2007) basées sur les rapports des
 - Comité Scientifique des Nations Unies pour l'étude des Effets des Rayonnements Ionisants (UNSCEAR)
 - comité américain sur les Effets Biologiques des Rayonnements Ionisants (BEIR)
- évaluation des facteurs de risque
- fixation de normes \pm internationales (variant parfois selon l'occupation)



RELATION DOSE-EFFET PLUS COMPLEXE QUE PENSÉ

- La réponse des cellules à une irradiation est complexe et semble dépendre de
 - ☒ de la dose
 - ☒ du **débit de dose** [la dose reçue par unité de temps]
 - ☒ du type de cellule touchée
 - ☒ de la concentration des dommages cellulaires
- ⇒ la réponse n'est pas réellement proportionnelle à la dose
- ⇒ la **relation linéaire sans seuil** rend mal compte des effets biologiques
- Mais on l'utilise, par simplicité et parce qu'elle surestime probablement les risques ☞ meilleure marge de sécurité
- *Inconvénient : cela peut conduire (paradoxalement) à une politique plus dangereuse (en évacuant inutilement une population par exemple)*

RELATION LINÉAIRE SANS SEUIL... OU PAS?



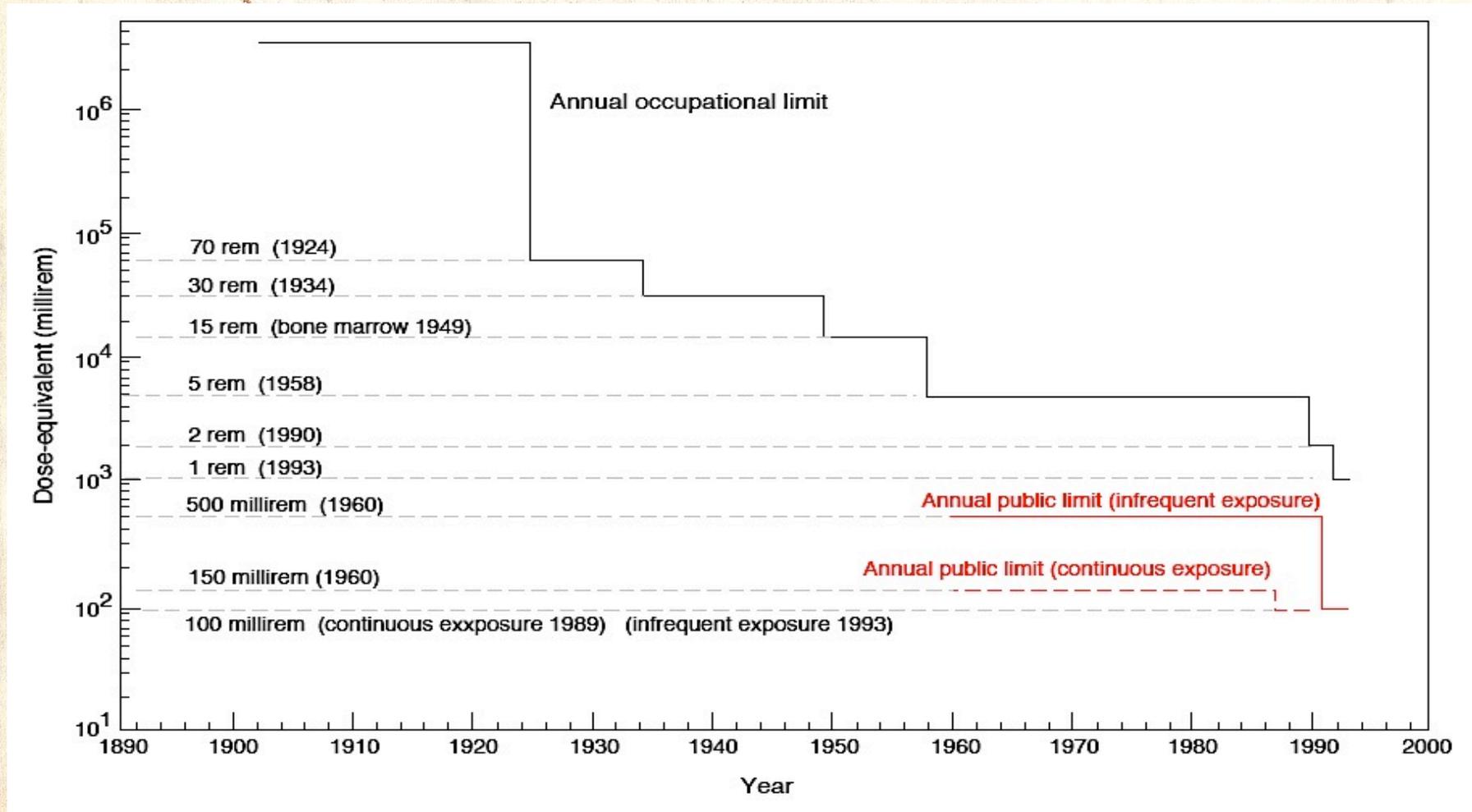
© M. Ammerich (RP Cirkus)

PRINCIPE ALARA

- Exposition aussi basse que l'on puisse raisonnablement atteindre compte-tenu des facteurs économiques et sociaux (*as low as reasonably achievable* = ALARA)
- ⇒ toute exposition volontaire doit être justifiée par un avantage (pour la personne exposée ou pour la société)
- ⇒ toute dose doit bien entendu être inférieure aux 500 mSv/an du seuil d'apparition des effets déterministes
- ⇒ la CIPR estime que la dose acceptable est de 20 mSv/an (soit 1 Sv cumulé sur 50 ans) pour les professionnels (médecine nucléaire, industrie...)
- Mais recommande pour le public un maximum de 1 mSv/an
- Dose comprenant le rayonnement externe (exposition à une source radioactive) **et** le rayonnement interne (corps radioactifs inhalés ou ingérés)

SEUILS ADMISSIBLES DE RADIOACTIVITÉ

○ 1 rem = 100 mSv



RADIOACTIVITÉ AU QUOTIDIEN

RADIOFOLIES



LE RADIUM
RÉGÈNÈRE L'ÉPIDERME

PLUS DE RIDES
TEINT VELOUTE

LA CRÈME RAMEY
RADIACÉE
CONTIENT DU RADIUM

LAINÉ ORADIUM
SOURCE DE CHALEUR
ET DE VITALITÉ
TRAITÉ SCIENTIFIQUEMENT
DANS LES LABORATOIRES DE
LA LAINÉ MÉDICALE
INDISPENSABLE
AUX FEMMES EN PÉRIODES
DURABLES
BROCHURE GRATUITE
RADIOACTIVE

CRÈME POUVRE
THO-RADIA
EMBEISSANTES PARCE QUE CURATIVES
à base de thorium et de radium selon la formule du
DOCTEUR ALFRED CURIE
EXCLUSIVEMENT CHEZ LES PHARMACIENS

EXCITOR AGRAL
COMPLÈMENT RADIO-ACTIF de tous les Engrais
COMPLÈMENT RADIO-ACTIF de tous les Engrais

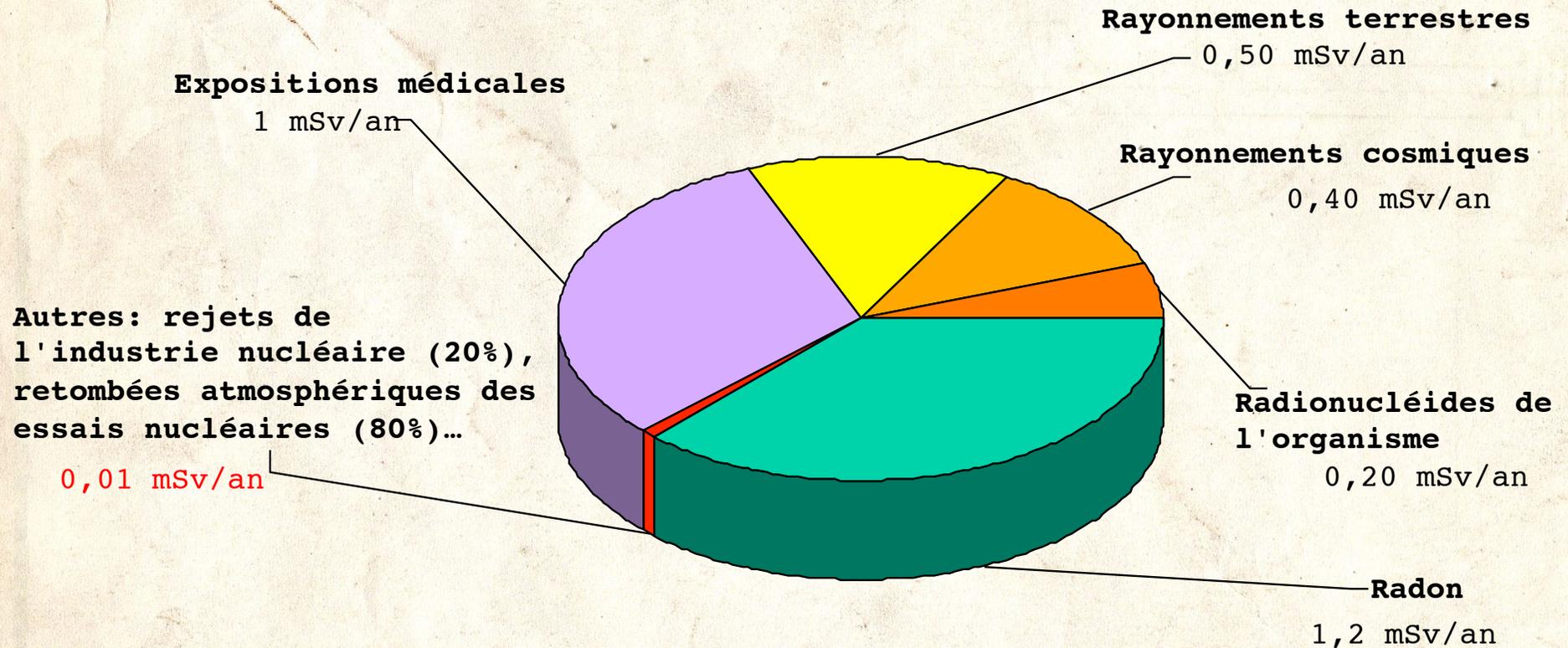
stimule puissamment la végétation. Assure les plus belles récoltes.
Favorise et active la nitrification. Préserve des maladies cryptogamiques.

COMPTOIR DES ENGRAIS RADIO-ACTIFS
57, Rue d'Alsace COURBEVOIE | RENSEIGNEMENTS sur DEMANDE

DIGESTIVE RECONSTITUANTE FORTIFIANTE
EAU MINÉRALE NATURELLE GAZEUSE RADIO-ACTIVE DE BUSSANG
ÉTABLISSEMENT FONDÉ EN 1877
SOURCE SALMADE (VOSGES)
Indiquée dans toutes les convalescences et anémies
DÉCLARÉE D'INTÉRÊT PUBLIC
Autorisée par décret du 7 avril 1866.
FERRUGINEUSE - ARSENIÉE - ALCALINE - MANGANESÉE - PHOSPHATÉE - LITHINÉE
CONTRE ANÉMIE, MALADIES D'ESTOMAC, DES REINS ET DE LA VESSIE, GOUTTE, DIABÈTE
NEURASTHÉNIE, DÉBILITÉ, LYMPHATISME

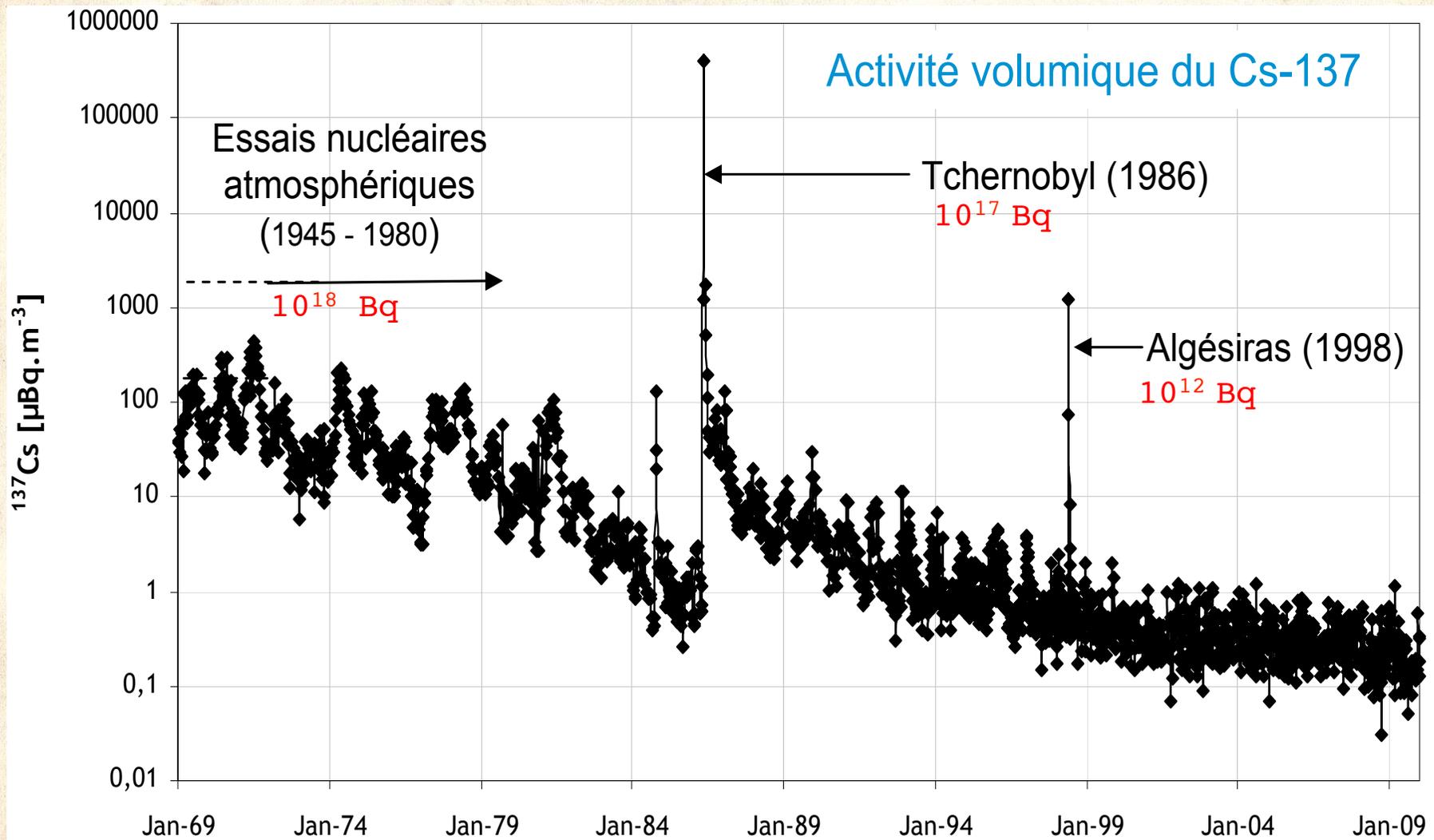
DERUFFE PUBLICITÉ

SOURCES AMBIANTES DE RADIOACTIVITÉ

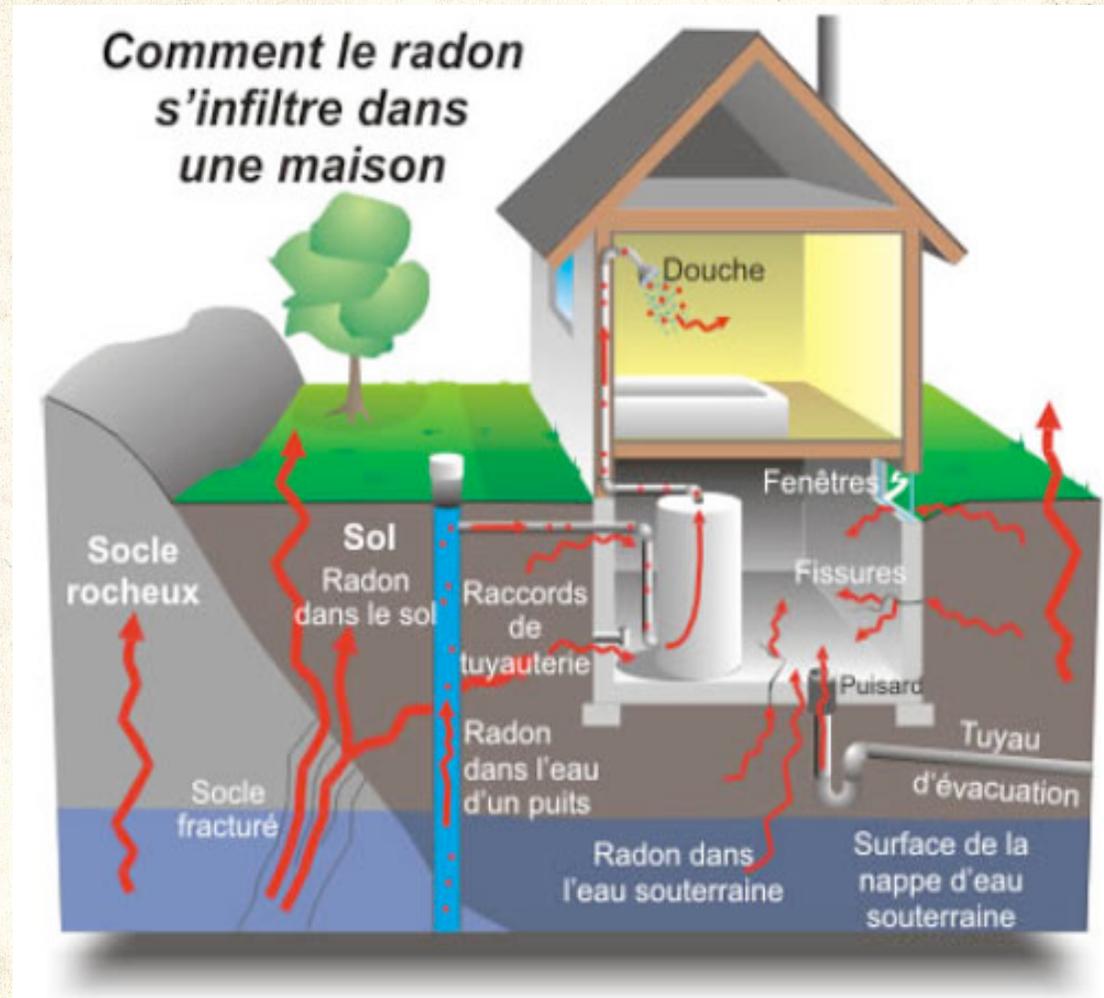
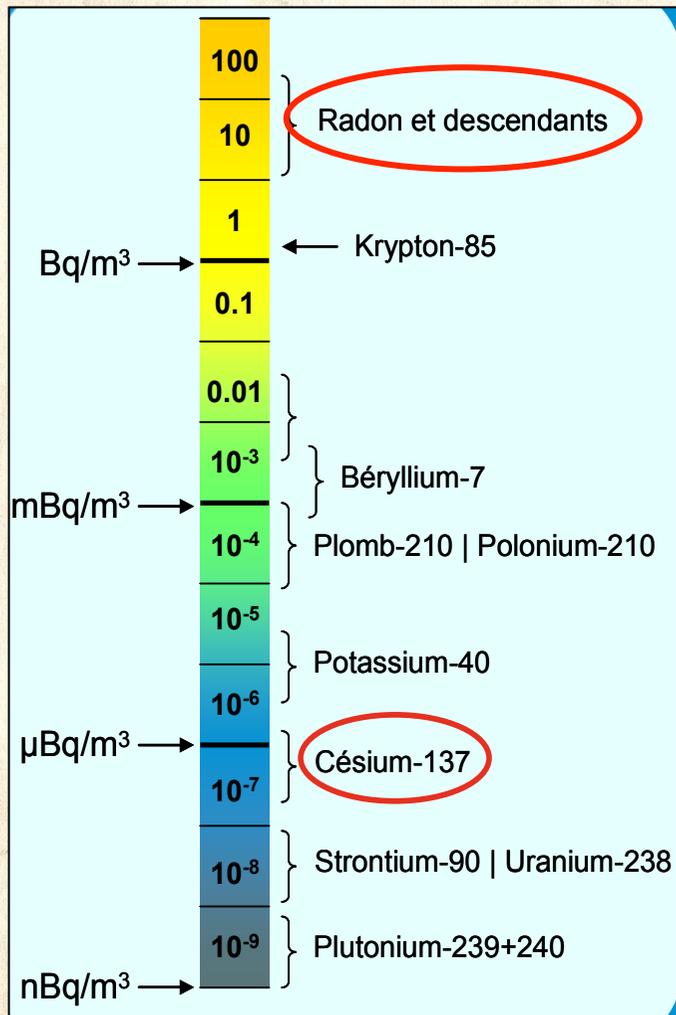


Rappel : limite pour la population 1 mSv/an
(au delà de l'irradiation naturelle)

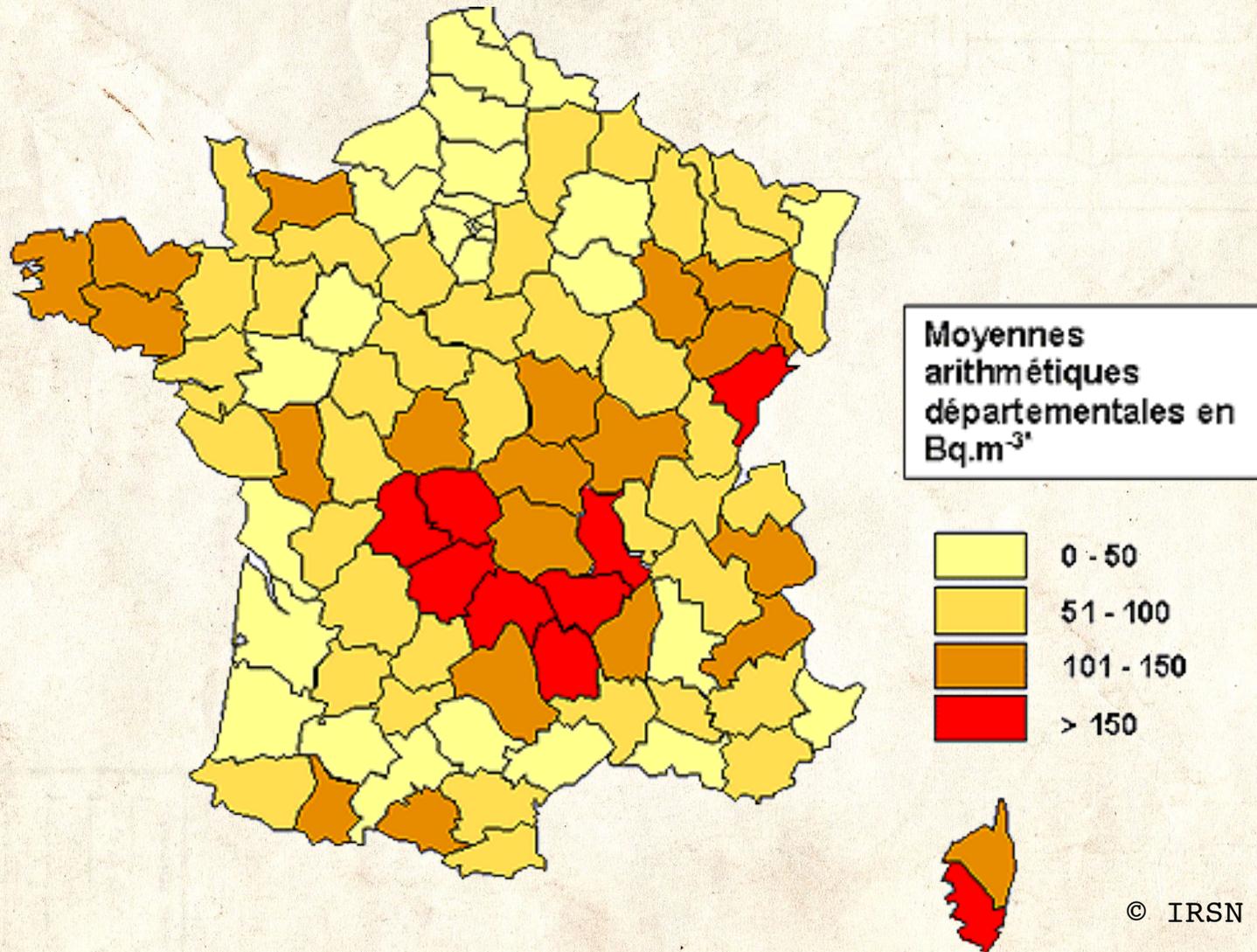
SURVEILLANCE DU TERRITOIRE PAR L'IRSN



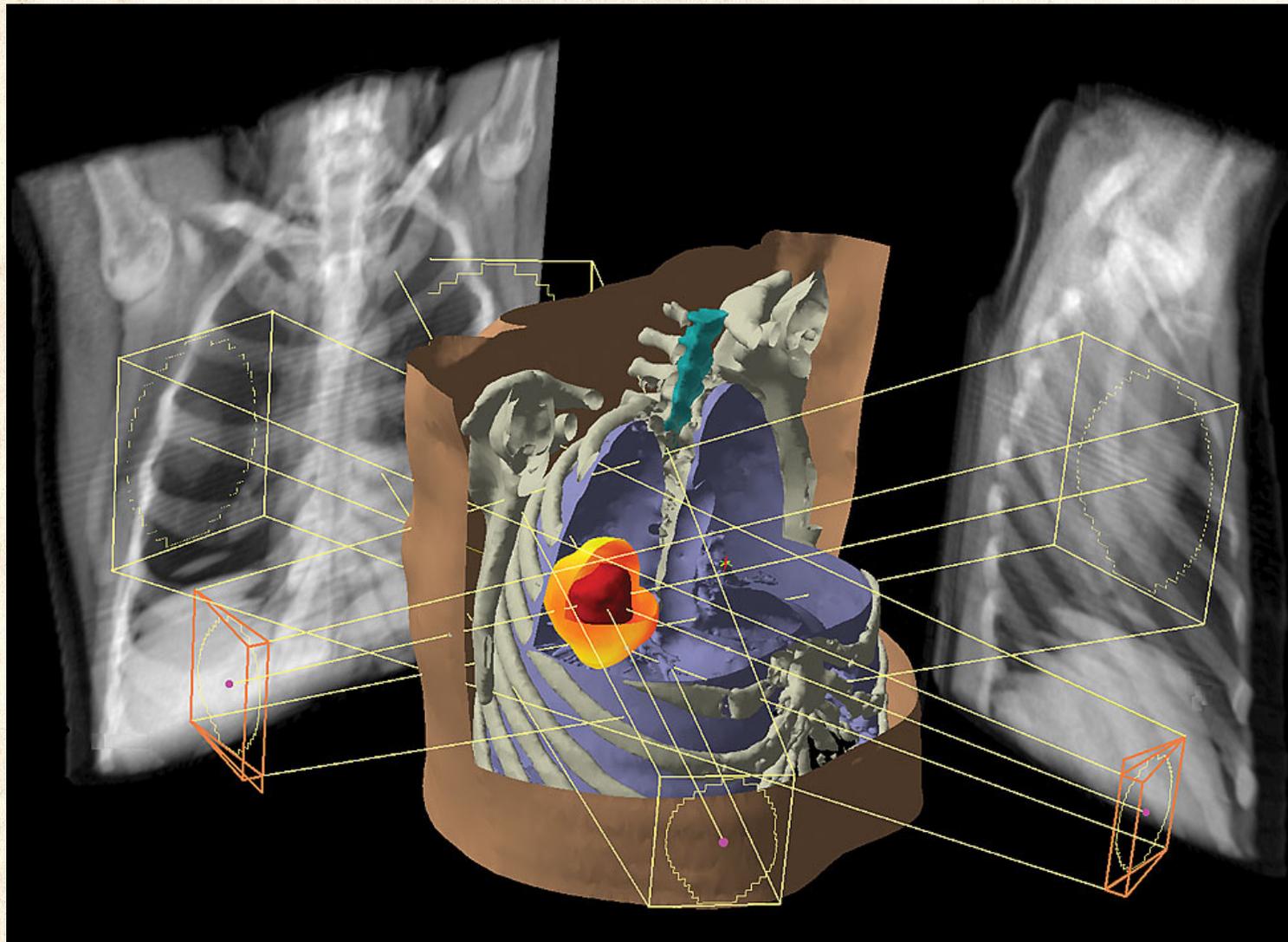
DONNEZ-NOUS NOTRE RADON QUOTIDIEN



CARTE DE FRANCE DU RADON



IMAGERIE MÉDICALE



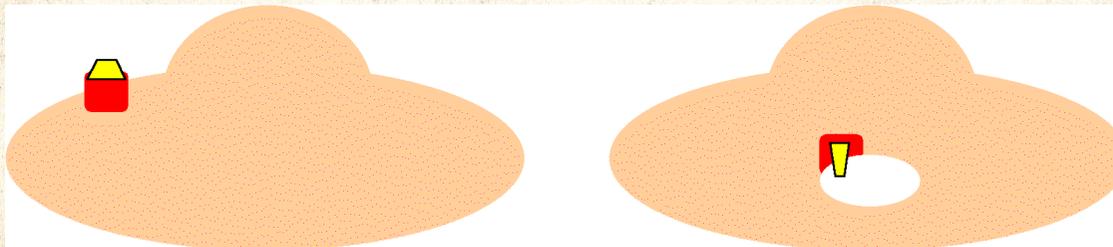
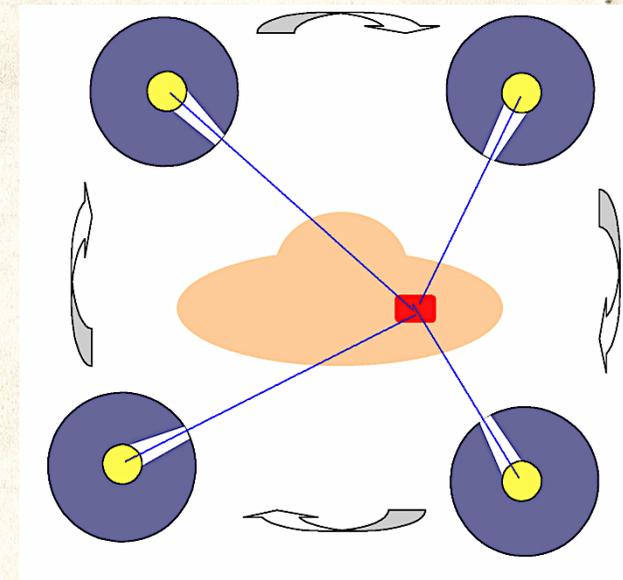
RADIOTHÉRAPIE

- Accélérateur linéaire à usage médical Varian Clinac DHX
 - Électrons (<22 MeV)
 - Photons gamma (<25 MeV)



RADIOTHÉRAPIE

- Comment n'irradier que la région voulue
 - Pivoter autour de la région, de sorte qu'elle reçoive le maximum de rayonnement, et les régions sur le chemin le minimum possible
 - Protéger les zones sensibles par des écrans et collimateurs 
 - Calculer les doses pour que le corps répare les dégâts entre irradiations
- Régler l'énergie pour exploiter le pic de Bragg
- Placer la source de rayonnement au contact ou à l'intérieur de la zone à traiter (curiethérapie)



À SUIVRE !



Et si on revenait à la physique ?