

La radioprotection autour des accélérateurs



Ecole IN2P3 : Radioprotection

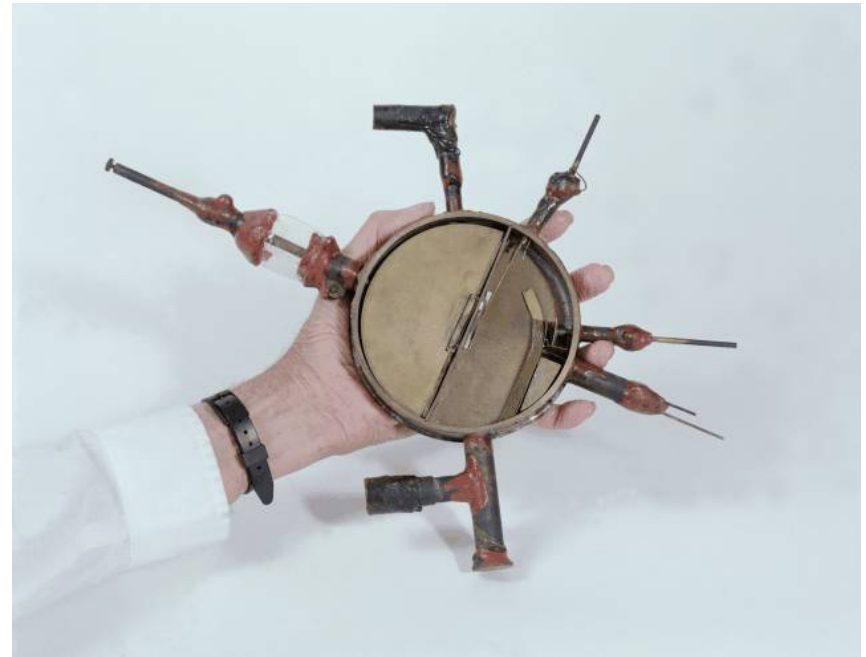
Le Lard, les Mauges, Novembre 2007

Eric Baron

Baron@ganil.fr

La radioprotection autour des accélérateurs

- *Balade autour de l'accélérateur*
- *Origine et propriétés physiques des rayonnements*
- *Quelques grandeurs et unités*
- *Effets des rayonnements sur l'organisme vivant*
- *Méthodes de protection contre les rayonnements*
- *Maintenance, robotisation démantèlement*
- *La surveillance radiologique*



Trois temps dans la vie d'un accélérateur

1. *Tests de composants de l'accélérateur sans faisceau : il y a déjà **des X!***
2. *Fonctionnement avec faisceau : on voit (!) **les γ , les neutrons et autres hadrons (les X aussi)***
3. *Interventions après l'arrêt : il y a encore foule : **les α , les β , les γ et les autres...***

Tests sans faisceau : les X

Observations :

- *émission par des hautes tensions (> 100 kV) continues ou alternatives : cavités HF, défecteurs, analyseurs.*
- *idem, par des ondes hyperfréquence (sources ECR)*
- *l'émission s'arrête quand on coupe l'alimentation*

Il n'est pas nécessaire que le faisceau existe pour que certains composants émettent un rayonnement.



Wilhelm Röntgen



La main de Mme Röntgen
(après son mariage)

L'accélérateur est en marche

Observations :

- émission de **neutrons** et de γ
- des particules légères (**protons**, α , **mésons**) peuvent traverser l'enceinte à vide.
- les sources d'émission : diaphragmes, déflecteurs, cibles minces ou épaisses, pièges de faisceau
- l'émission **n** et γ augmente avec l'intensité, mais cesse quand on coupe la source.

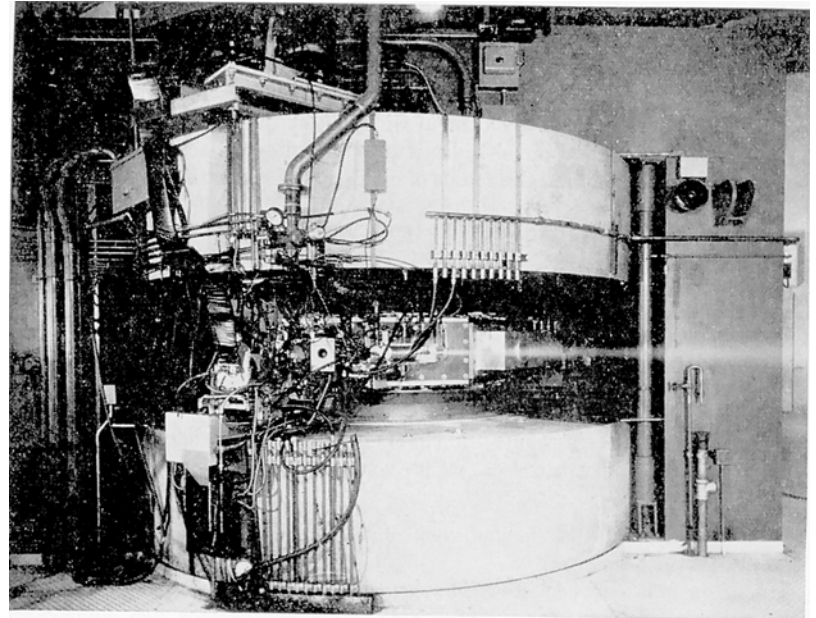


PLATE 14

Le cyclotron d'Oak Ridge envoie son faisceau dans l'air (à éviter)

L'accélérateur est à l'arrêt

Observations :

- A l'extérieur de l'enceinte à vide, il subsiste des endroits « rayonnants », essentiellement γ .*
- Si on remet brutalement l'enceinte à la pression atmosphérique \rightarrow mise en suspension de micro-poussières émettrices α , β , γ .*
- Idem, certaines surfaces internes et objets divers (coupelles de Faraday, sondes interceptrices, cibles, septa, etc.) sont émettrices.*
- Les protections biologiques (béton, fer) peuvent être elles-mêmes « radioactives ».*
- Cette « radioactivité » décroît avec le temps.*

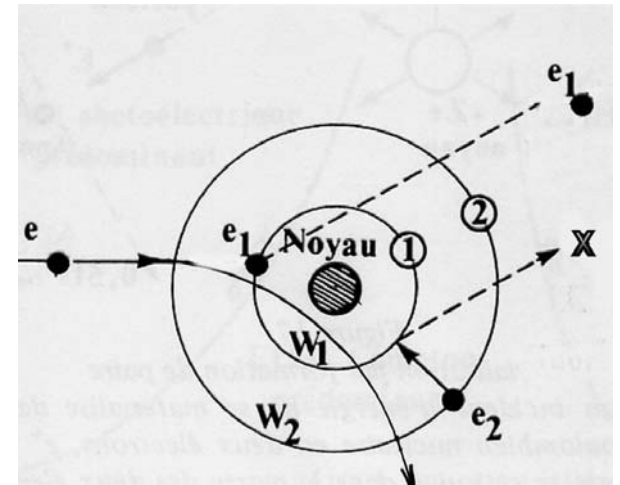
X, γ , α , β (+ et -), protons, neutrons, mésons, fragments : le questionnaire .

- Quelle est l'origine de ces rayonnements ?*
- Quelles sont leurs propriétés : charge électrique, masse, énergie ?*
- Comment sont-ils freinés ou absorbés dans la matière inerte (ou : comment s'en protéger) ?*
- Y a-t-il une « durée de vie » ?*

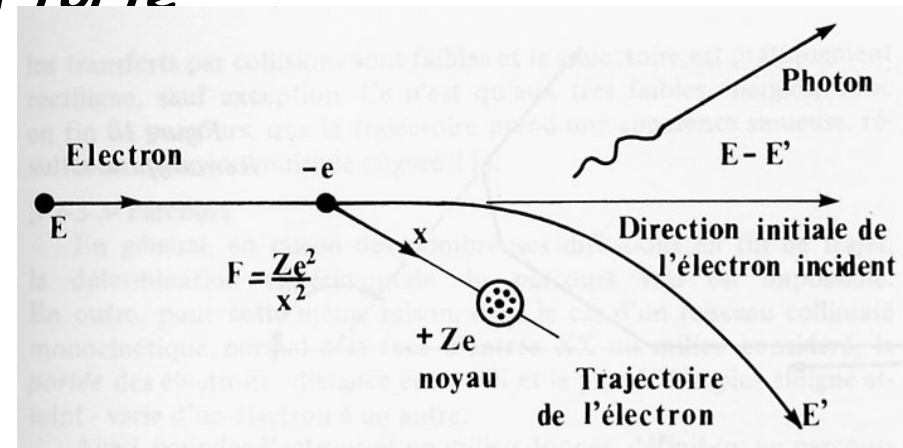
Le rayonnement X

Origines:

- **Collision** entre un électron et un atome : excitation ou éjection d'un électron du cortège , puis réarrangement de ce cortège par émission d'un X.
- **Freinage** d'un électron rapide dans le champ d'un noyau (rayonnement de freinage) ou par déviation forte (rayonnement synchrotron).



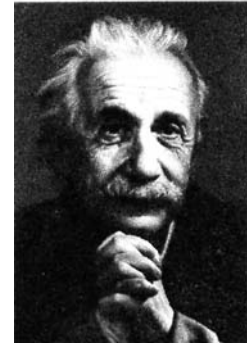
Pas de masse, pas de charge électrique : c'est un rayonnement électromagnétique, et il ne provient pas du noyau de l'atome



Le rayonnement X (suite)

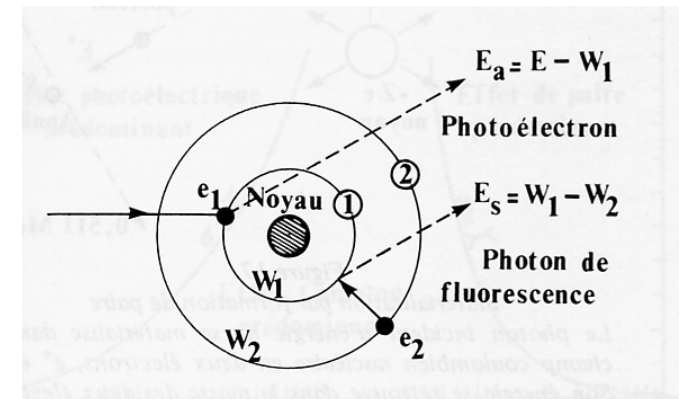
Énergie des X :

- Gamme : de qq eV à qq centaines de keV
- Spectre de raies ou spectre continu



Interaction avec la matière : **effet photo-électrique** : l'X disparaît et un électron est éjecté (**ionisation**) →

Un faisceau d'X d'énergie E traversant un milieu de numéro atomique Z est atténué en Z^3/E^3 .
Exemple de protection efficace : le plomb ($Z = 82$).



Le rayonnement γ

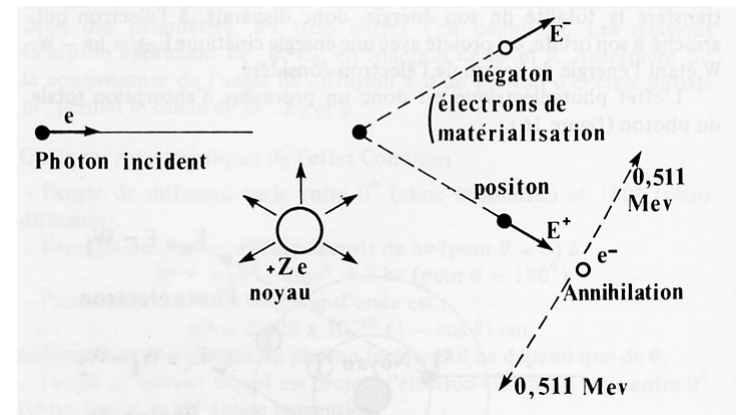
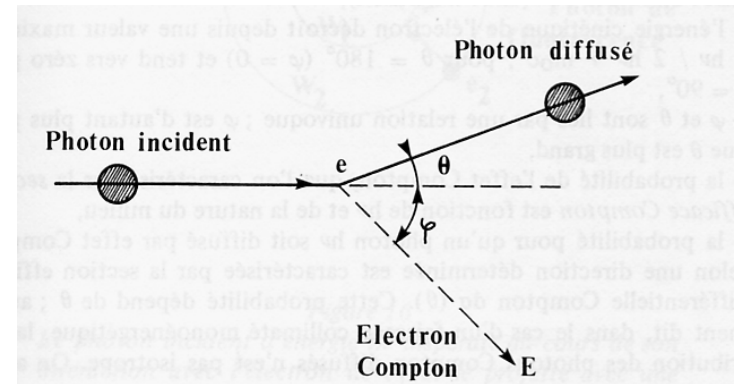
Origine: apparition consécutives à une réaction nucléaire, suite à l'émission d'un α , d'un β ou de tout autre fragment du noyau du projectile ou de la cible .

Pas de masse, pas de charge électrique : il n'y a pas de différence de nature avec les X, sauf l'origine : c'est un rayonnement électromagnétique qui provient du noyau de l'atome.

Énergie: spectre de raies

Le rayonnement γ : interaction avec la matière

- effet photo-électrique (déjà vu)
- effet Compton : le photon \rightarrow cède une partie de son énergie à un électron faiblement lié: **ionisation**. Pour des γ de 1 à qq MeV, c'est l'effet dominant.
- matérialisation (paire $e^+ e^-$), à haute énergie \rightarrow



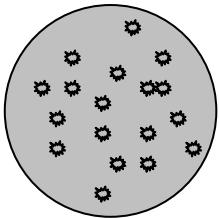
Pour des γ de 1 à qq MeV, l'efficacité d'atténuation d'un écran dépend peu de son Z (eau, alu, béton, plomb), mais uniquement de la **masse superficielle** (g/cm^2).

Etrange mesure d'épaisseur d'une cible ou d'un écran (mais souvent utilisée) : la masse superficielle X (en g/cm^2).

$$\rho x = X$$

masse spécifique ρ en g/cm^3 , épaisseur x en cm

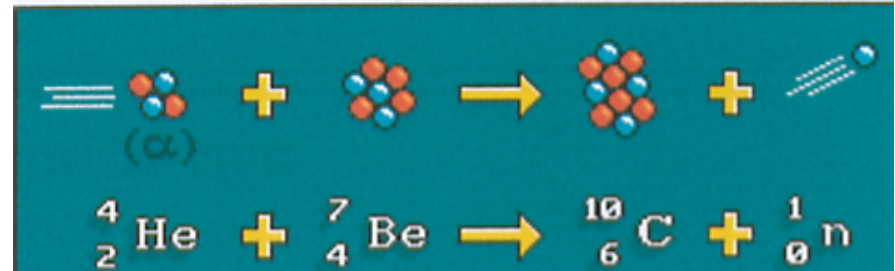
Exemple : cible de carbone de densité 2 et d'épaisseur 0,1 cm : $X = 0,2 G/cm^2$



C'est une grandeur proportionnelle au nombre d'atomes de cible que le projectile est susceptible de rencontrer.

Les neutrons

Origine: ils sont éjectés du noyau projectile ou du noyau cible lors d'une collision.



Pas de charge électrique

Gamme d'énergie: de thermique (0,025 eV) à qq centaines de MeV.

Les neutrons (interaction avec la matière)

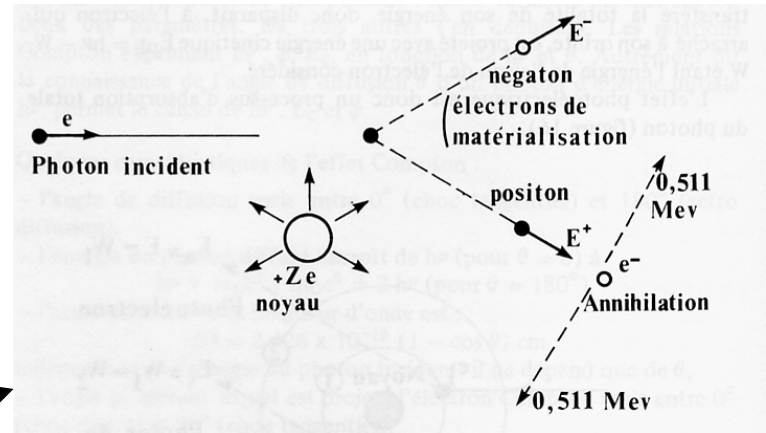
- Thermiques : disparition par **capture radiative** (émission γ) ou non (émission d'une particule chargée ou d'un neutron)
- Région 10 keV-10 MeV: ralentissement par diffusion élastique avec effet de recul des noyaux.
- Plus haut (> 20 MeV), **réactions nucléaires** avec éjection de p , n , noyaux légers, mésons et γ .

Atténuation d'un flux de neutrons : béton, matériaux hydrogénés. N.B. Et si on ne couvre pas le toit de l'accélérateur, les neutrons s'échappent et, par collisions sur les atomes de l'atmosphère, retombent en parapluie sur le voisinage; c'est « **l'effet de ciel** ».

Remarque: dans tous les cas, il y a **ionisation** des atomes du milieu traversé **par les particules secondaires**.

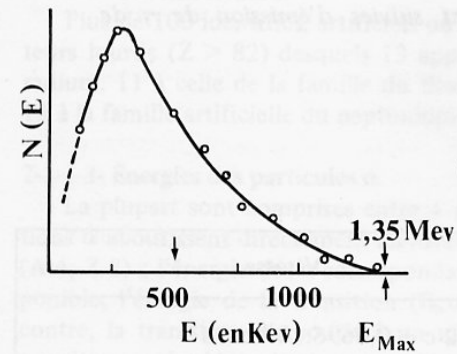
Les électrons, β^- , β^+ : origines

▪ *Ionisation des atomes ou des molécules (émission quasi-instantanée) par photon ou particule chargée (déjà vu)*



▪ *Matérialisation d'un photon en un électron et un positon*

▪ *Désintégration nucléaire (émission retardée)*

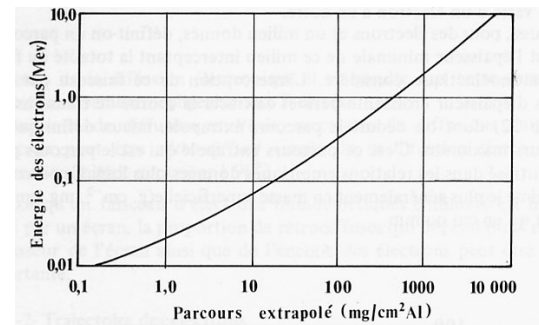
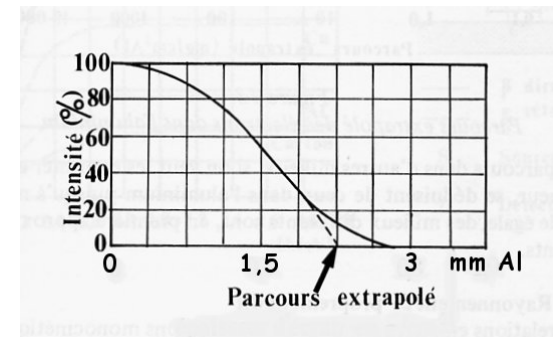
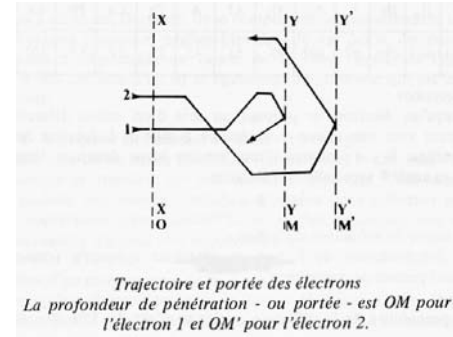


Les β^- (électrons): pénétration dans la matière

• Le « parcours » (épaisseur au bout de laquelle l'électron est complètement arrêté) est impossible à définir en raison des nombreuses diffusions en fin de trajet.

• On définit donc un « parcours extrapolé » (ici, électrons de 1,4 MeV)

• A masse superficielle égale (en g/cm^2), les différents matériaux sont à peu près équivalents.



Lors de **collisions** entre noyau projectile et noyau cible,
 les hadrons : **p, d, α, mésons, ions, etc,**
 sont émises de façon :



- Diffusion inélastique : $^{56}\text{Fe}(n, n) \text{Fe}^* \rightarrow \gamma$
- Capture radiative, capture non radiative :
 $^{113}\text{Cd}(n, \gamma) ^{114}\text{Cd}$
- Photodésintégration (γ, n) (γ, np) $(\gamma, \alpha n)$, $(\gamma, n2p)$
- Fission : (n, f) , (α, f)
- Spallation : $^{75}\text{As}(\alpha, ^6\text{Li} - 4\alpha - 7p - 12n)^{37}\text{Cl}$
- Fusion : $^2\text{H}(d, n) ^3\text{He}$ etc.

Instantanée...



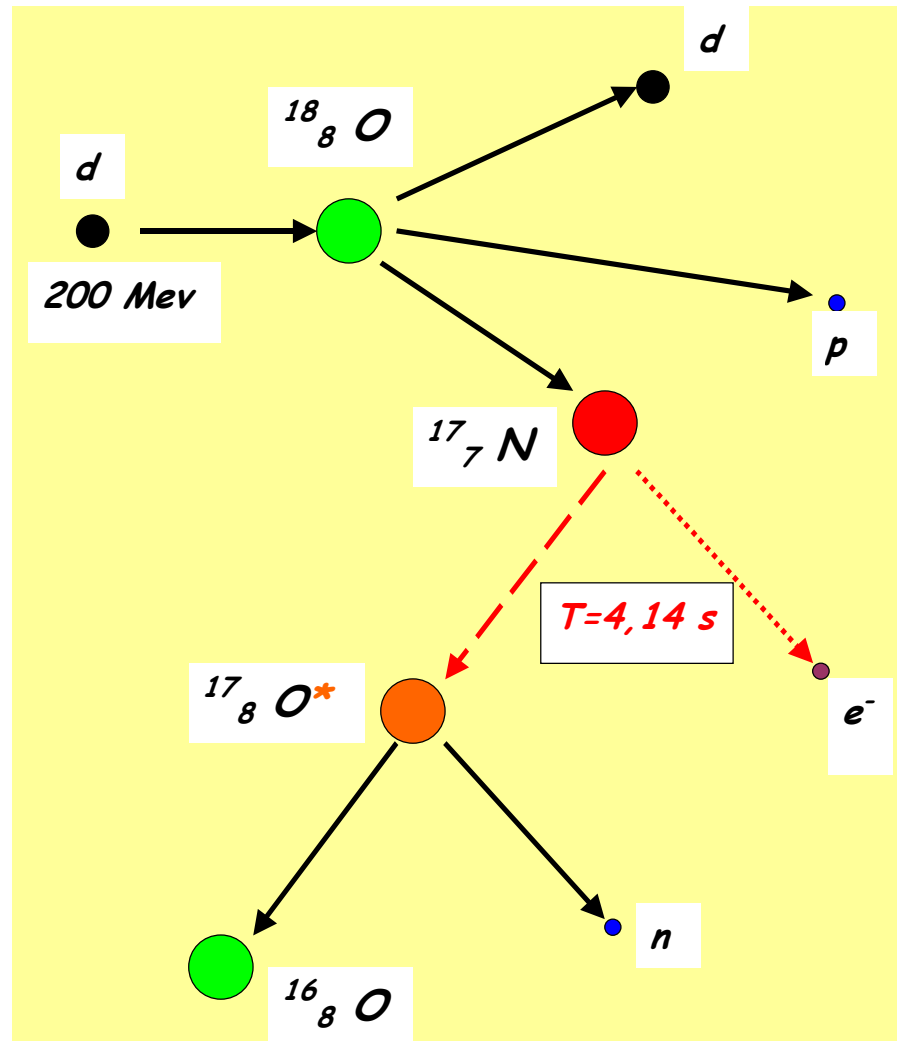
...ou retardée



Exemple (simple) de réaction nucléaire

• Dans cette cascade d'évènements, les noyaux d'azote 17 (élément instable) se désintègrent de façon statistique dans le temps, avec une valeur moyenne de durée de vie (période) de 4,14 secondes.

• Les autres évènements du dessin sont quasi-instantanés.

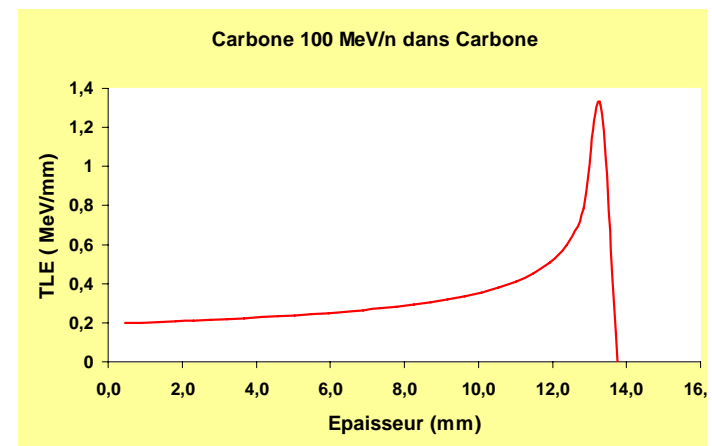
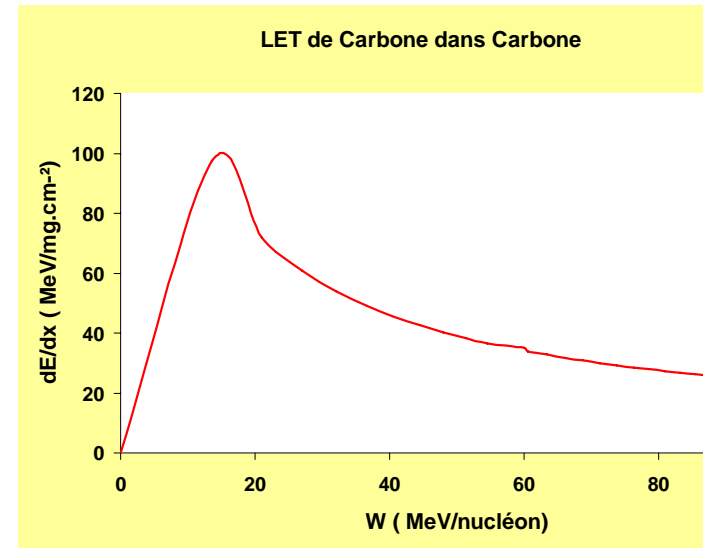


Caractéristiques générales de la pénétration des hadrons chargés dans la matière

Exemple du ralentissement d'ions carbone dans une cible de carbone :

la perte d'énergie par unité de longueur (dE/dx) est :

- 1) maximum vers les basses énergies*
- 2) maximum en fin de parcours pour un faisceau incident d'énergie donnée : c'est le pic de Bragg*



Résumé

On vient de voir :

- ✓ *L'origine des rayonnements*
- ✓ *Leurs caractéristiques*
- ✓ *Leur mode d'interaction avec la matière*

Maintenant, il faut quantifier tout ça....

Les quantités et les unités de mesure des rayonnements ionisants

- L'activité : nombre de désintégrations par unité de temps d'une source radioactive. Unité : le becquerel.
 $1 \text{ becquerel (Bq)} = 1 \text{ désintégration/s}$
- La dose absorbée : quantité d'énergie déposée dans un corps par unité de masse. Unité : le Gray.
 $1 \text{ Gray} = 1 \text{ joule/kg}$
- L'équivalent de dose (quantité utilisée pour les tissus vivants) : dose multipliée par Q, « facteur de qualité ». Unité : le Sievert.
 $1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Gray} \times Q$
Ordres de grandeur : α, β, γ : $Q = 1$,
neutrons thermiques : $Q = 2,3$
 p et n rapides : $Q = 10$ α : $Q = 20$
- Débit d'équivalent de dose : le Sievert/h ($\mu\text{Sv/h}$)

Activité, activation et décroissance

Loi de décroissance d'un radioélément:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

Période : $T = \ln(2) / \lambda$

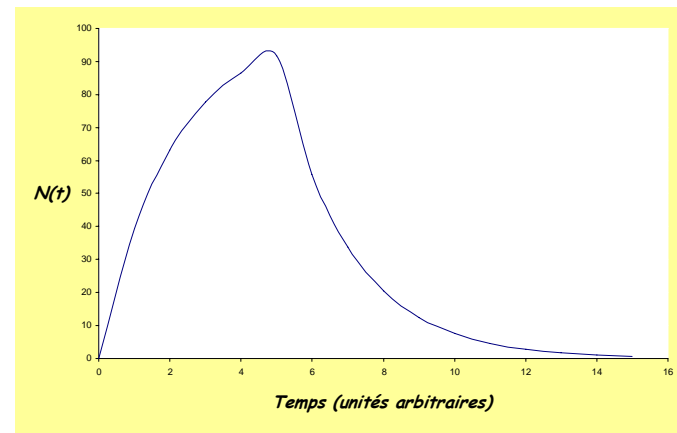
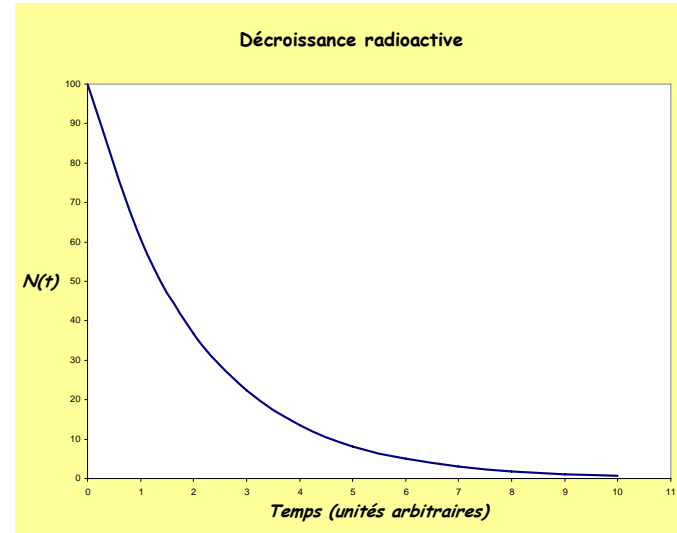
$99 \mu\text{s} < T < 99 \text{ } 10^6 \text{ ans}$

Activité à l'instant t :

$$dN/dt = \lambda N_0 \exp(-\lambda t)$$

Activation, puis décroissance : la croissance de l'activation n'est pas linéaire car le noyau formé se désintègre.

Ecole IN2P3 : Radioprotection
La Londe Les Maures Novembre 2007



Quelques repères (I : dose et débit de dose)

1 Gray = 1 Joule/kg , donc

une dose de 1 Gray correspond à une énergie d'1 joule dissipée dans 1 kg

(rappel : le corps humain est en moyenne de densité 1, assimilable à l'eau, donc 1 litre ~ 1 kg environ)

Or, pour élever de 1 °C la température d'1 litre d'eau, il faut dépenser

4,18 kJ → 4 180 Gy

Donc, au point de vue thermique, 1 Gy, c'est tout petit et pourtant... ça fait mal ! (voir page 27)

Quelques repères (II : activité)

Radioéléments naturels

- *Activité d'une personne de 70 kg : 8 000 Bq (dont 4 500 Bq de ^{40}K)*
- *Le vin : 30 Bq/litre (^{40}K) et 80 Bq/litre (^{226}Ra)*

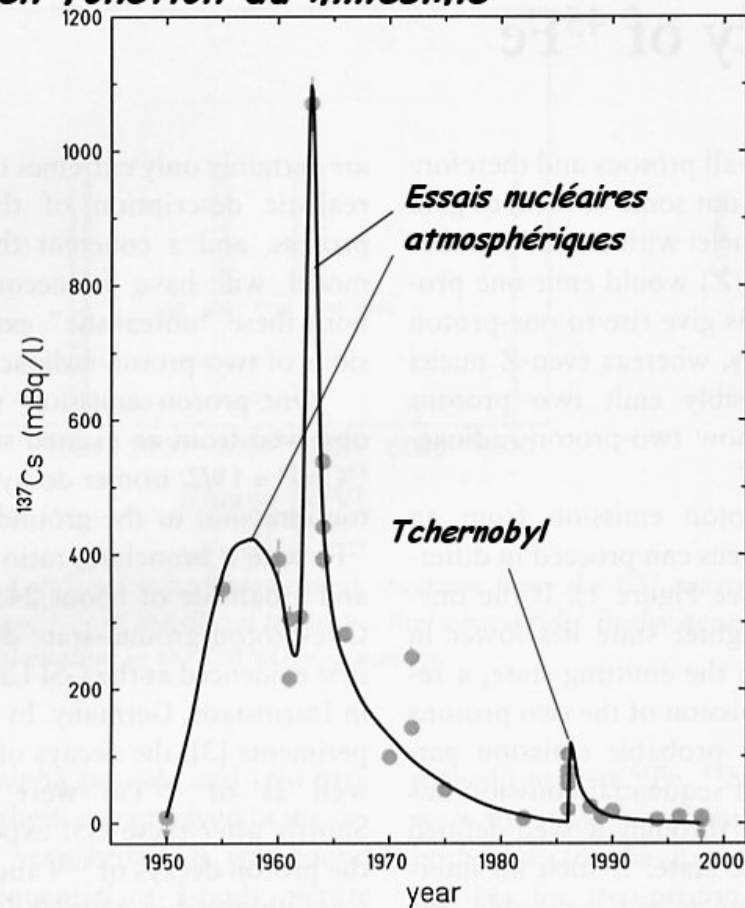
Radioéléments artificiels

- *Le vin: < 1 Bq/litre de ^{137}Cs*



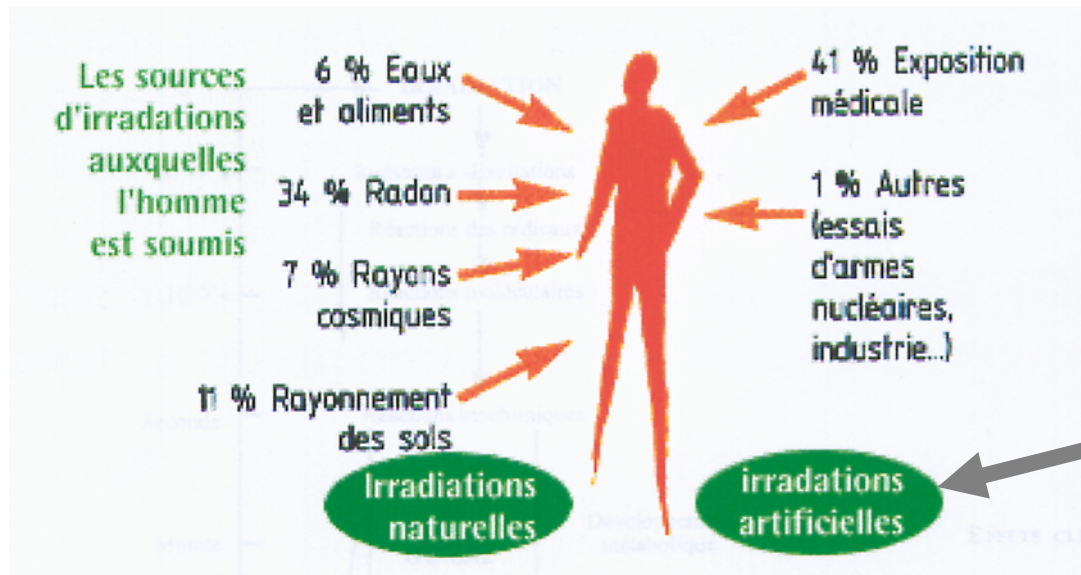
*Ecole IN2P3 : Radioprotection
La Londe Les Maures Novembre 2007*

Activité du Cs 137 dans le Bordeaux en fonction du millésime



F. et Ph. Hubert, Nuclear Physics News Vol 13 n° 1, 2003

Et maintenant, l'homme* ?



Dose moyenne reçue par an par un individu moyen : 1 mSv

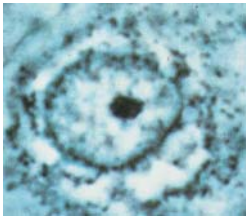
Essayons de ne pas en rajouter avec les accélérateurs

Questions:

- *Quels sont les effets des rayonnement ionisants sur les cellules?*
- *Comment se protéger ?*

(Euh... et la femme, naturellement...)*

Aspect microscopique : cassures de la chaîne d'ADN dans le noyau de la cellule

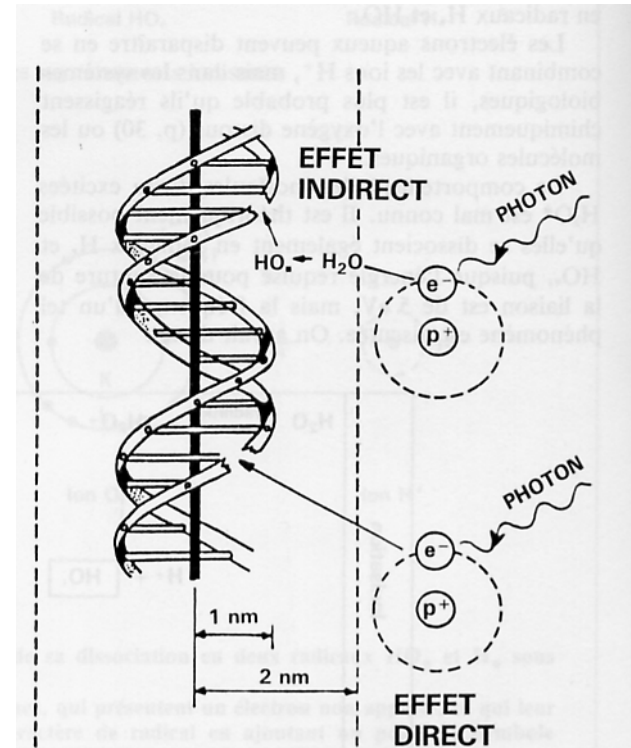


*La cellule : 80 % d'eau
(on prend souvent l'eau
comme modèle
physique)*

1 Gy de rayons X cause environ :

- 1000 cassures simples
- 50 à 100 cassures doubles

Les réparations peuvent permettre la restitution intégrale, ou au contraire, conduire à des « réparations fautes » (exemple : carcinogénèse)



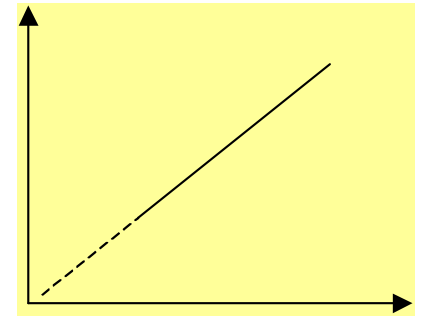
Irradiation globale aiguë : aspects macroscopiques

C'est l'accident majeur ...

<i>Dose (Sv)</i>	<i>Manifestations</i>
<i>0,3 à 1</i>	<i>Absence de signes cliniques, chute des lymphocytes</i>
<i>1 à 2</i>	<i>Au bout de qq heures: signes digestifs, céphalée, aplasie médullaire</i>
<i>2 à 4</i>	<i>Aggravation de tous les signes, hémorragies intestinales, infection</i>
<i>4,5</i>	<i>Dose létale 50% en l'absence de traitement</i>
<i>4,5 à 150</i>	<i>Hémorragies, infections +++, érythème, aplasie médullaire +++</i>
<i>> 150</i>	<i>Etat de choc en qq minutes, mort probable en qq heures à 15 jours</i>

Les effets aléatoires des faibles doses

- *A priori, pas de seuil d'apparition (?)*
- *Probabilité d'apparition proportionnelle à l'équivalent de dose reçu*
- *Apparition tardive*



Possibilités : Cancers, anomalies génétiques

Radiat Res. 1999 Dec;152(6 Suppl):S145-8.

Sur le seuil ... Related Articles, Links

Population study in the high natural background radiation area in Kerala, India.

Nair MK, Nambi KS, Amma NS, Gangadharan P, Jayalekshmi P, Jayadevan S, Cherian V, Reghuram KN.

Regional Cancer Centre, Trivandrum 695 011, Kerala, India.

radiation. The environmental radiation emanates largely from the thorium deposited mostly along coastal areas. In certain locations on the coast, it is as high as 70 mGy/yea and on average is 7.5 times the level seen in interior areas. Using portable scintillometer

measured in the same house compound. Of the total population of 400,000, 100,000 lived in areas with high natural radiation. Information on lifestyle, socio-demographic features,

registry system has been established to obtain cancer incidence rates. In this preliminary analysis, there is no evidence that cancer occurrence is consistently higher because of the levels of external gamma-radiation exposure in the area. Further dosimetry-level studies

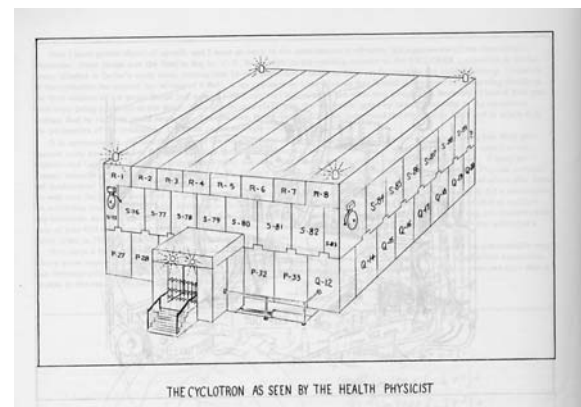
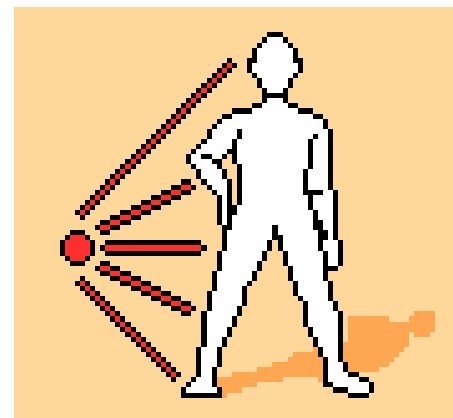
M.K. Nair et al., Radiat.Res. 1999 Dec;152(6 Suppl): S 145-8

Les risques d'exposition aux rayonnements

I. Exposition externe

Le risque d'exposition externe est rendu nul ou minimisé par:

- les protections biologiques fixes (enceintes et toit, béton, fer, etc.)*
- un contrôle des accès*
- des consignes et un équipement adapté en cas d'intervention*



Les risques d'exposition aux rayonnements

II. Exposition interne

Les gaz ou des poussières radioactives peuvent être contenues :

- dans l'air de la casemate de l'accélérateur (le plus souvent avec des périodes courtes cependant : isotopes de l'oxygène et de l'azote)
- à partir de surfaces activées (vaporisation ou sublimation de cibles par exemple)

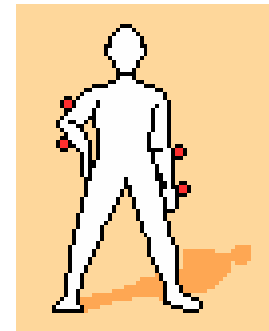
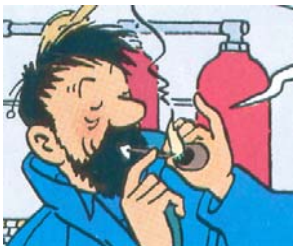
Voies de pénétration par :

inhalation

ingestion

les plaies

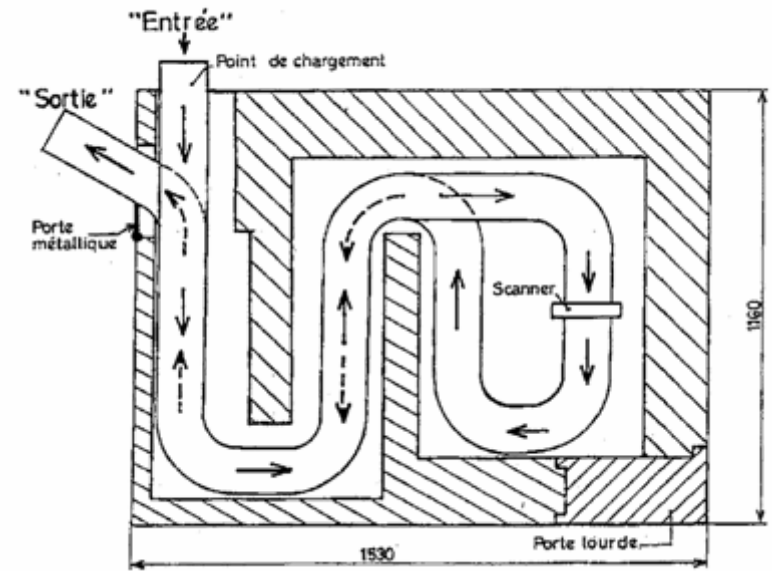
et à travers la peau



Un exemple d'accident: Forbach

*Van de Graaff 2.3 MeV électrons
Traitement par ionisation de
granulés de téflon voyageant dans
des bacs posés sur un convoyeur*

*3 personnes pénètrent dans le
bunker **par la sortie du convoyeur**
et opèrent une réparation de 15
minutes autour et sous le scanner.
La source avait été coupée, mais
pas la HT ; pourtant, le courant de
cathode froide engendre un débit
de dose de 0,1 Gray/seconde*



***Bilan : un mort, deux
brûlés très graves***

Les limites d'exposition aux rayonnements

Pour le public :

Exposition globale

1 mSv / an

*Pour les
travailleurs
du
nucléaire*

Exposition globale : *20 mSv sur 12 mois glissants*

- • *Femme enceinte : 1 mSv / dès la déclaration de sa grossesse (abdomen)*

Exposition partielle

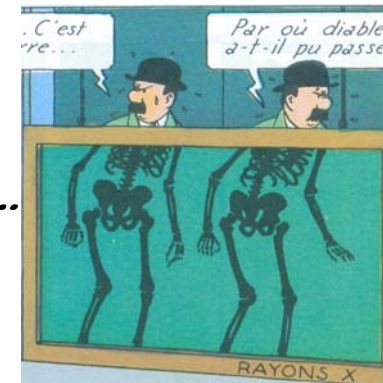
- • *Cristallin : 150 mSv / an*
- • *Peau, mains, avant-bras, Pieds, chevilles
500 mSv / an*

Comment se protéger des rayonnements

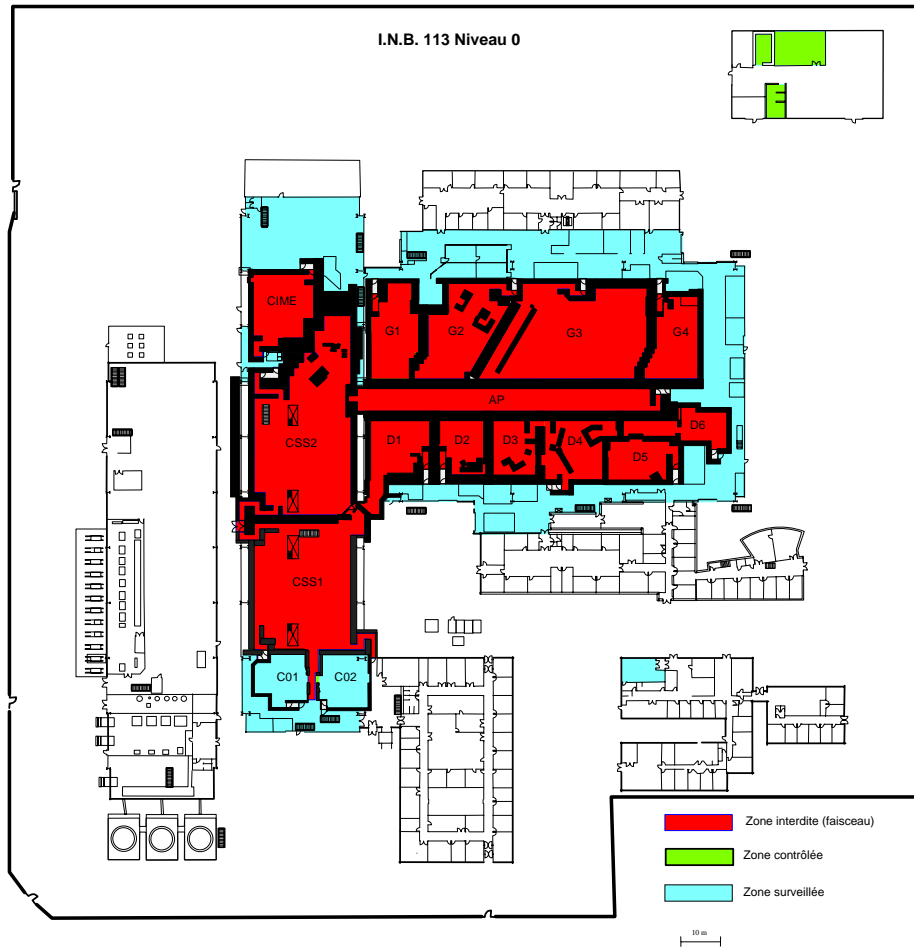
Les règles d'or:

- **Le temps**: minimiser le temps d'intervention, et ne pas hésiter à allonger le temps AVANT l'intervention (effet d'atténuation des périodes courtes)
- **La distance** : le flux de rayonnement , et donc les dégâts sur l'organisme, décroissent en $1/d^2$.
- **Les écrans** : les adapter à la nature et à l'énergie des rayonnements.

De plus , pour la contamination, selon les instructions du SPR : gants, blouse, masque ...



Les protections biologiques et les zones



Le centre est divisé en zones dont la nature peut varier selon les situations.

Ici, la situation est telle que tout est « sous faisceau »

Comment se protéger des rayonnements et surveiller leur niveau: les accès et les balises

Tableau de contrôle



Balise γ



Balise neutrons



*Ouverture d'une porte, ou dépassement d'un seuil radiologique : **interruption instantanée du faisceau***

Le souci de la maintenance et du démantèlement

Deux différences accélérateur/réacteur nucléaire :

- ↪ Durée d'exploitation = environ 7 mois/an . Reste = maintenance*
- ↪ Pas de production massive de produits de fission*

Les précautions:

Conception orientée maintenance : l'activation étant circonscrite à quelques équipements (collimateurs, déflecteurs, arrêts faisceau)

- choisir les matériaux minimisant l'activation*
- Conception à base de connexions/déconnexions rapides (brides, raccords rapides), blindage locaux, moyens de manutention télé-opérés*
- A chaque fois que c'est possible, éloignement de tout matériel (ex:pompes à vide, équipements électroniques) des zones irradiantes*

Manipuler les composants « chauds » et stocker les déchets

✓ *La très grande majorité des déchets des accélérateurs deviennent rapidement de faible à très faible activité : éléments d'éjection, de cavités, de sondes interceptrices, etc., éléments souvent de faible volume. Le stockage est aisé.*

✓ *Avec l'apparition de faisceaux de forte puissance utilisés pour générer des faisceaux radioactifs (méthode Isol) ou des flux de neutrons très intenses, **les cibles** :*

- deviennent très actives avec de longues périodes*
- et peuvent émettre des **effluents radioactifs gazeux** en cours d'irradiation.*

On doit passer aux robots et à un stockage plus complexe.

Comment se protéger des rayonnements : les robots

Transport et confinement d'un déflecteur électrostatique à PSI (protons de 600 MeV)



Robot prélevant l'ensemble cible-source à GANIL (ions lourds dans cible épaisse de SPIRAL)

Comment gérer l'activation des murs de protection

Les protections, souvent en béton, sont lentement activées sous l'effet des neutrons →

Murs en deux couches dont la première, peu épaisse (~ 50 cm) sera faite, selon l'énergie des neutrons, soit d'un matériau plus dense (fer), soit d'un sandwich de poudre (gypse).

La couche « arrière » pourra alors être considérée comme Très Faiblement Activée (TFA).

Traçabilité

En vue d'un démantèlement ou même d'un déplacement d'un élément d'un labo à un autre :

➤ *nécessité de sa « carte d'identité » et de son « CV », à savoir :*

➤ *nate et lieu de fabrication, et de mise en service*

➤ *caractérisation des matériaux composants*

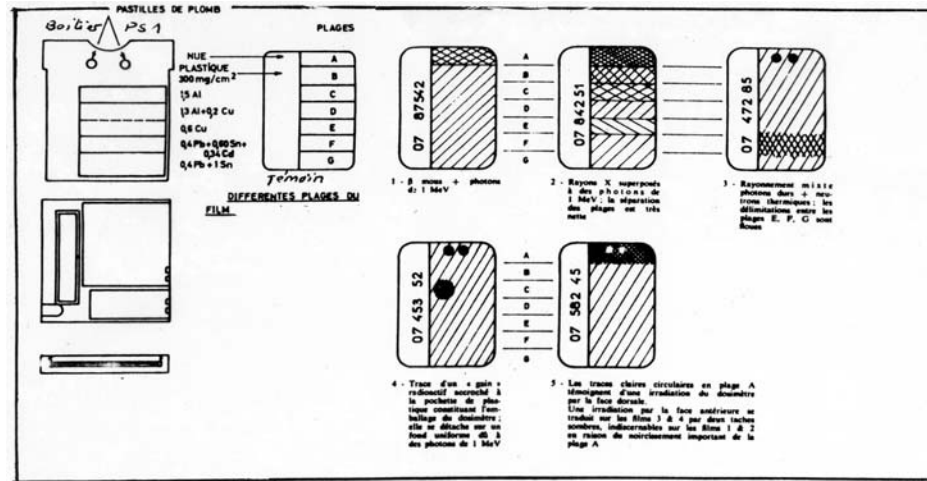
➤ *intégration de la dose reçue pendant la vie de l'élément*

➤ *suivi des pérégrinations*

... en vue du classement : FA, TFA, etc., et des conditions de stockage

La surveillance radiologique des personnels

Le film-dosimètre



- Les dosimètres complémentaires (doigt, poignet)
- Et opérationnels (intégrant la dose, avec alarme)



Bibliographie

Notions élémentaires

- Les radio-éléments et leurs utilisations, *Collection CEA, Série synthèses, Eyrolles*
- Manuel de physique nucléaire, *Joseph Bessis, Eyrolles*

Radioprotection haute énergie

- A guide to radiation and radioactivity levels near high energy particle accelerators, *A.H. Sullivan, Nuclear Technology Publishing 1992*

Radiobiologie

- Radiobiologie, *M. Tubiana, J. Dutreix et A. Wambersie, Hermann 1986*

Merci à :

- *Isabelle Testard, Radiobiologie, LARIA (Caen)*
- *Bertrand Rannou et le SPR GANIL (Caen)*
...et à *Goscinny, Gotlib, Hergé, E-P. Jacobs et Uderzo.*

