

# **Radioprotection autour des accélérateurs**

**Ecole des Accélérateurs – BENODET**

Jean-François LE DU  
SPR IPN Orsay

# Définition du dictionnaire LAROUSSE

- **Radioprotection** :  
ensemble des moyens utilisés pour se protéger  
contre les rayonnements ionisants.
- **Idée directrice** : **causes, conséquences, parades.**
- Exemple : ALTO IPN Orsay  
Photofission induite dans une cible de carbure d'uranium  
par un faisceau d'électrons de 50 MeV

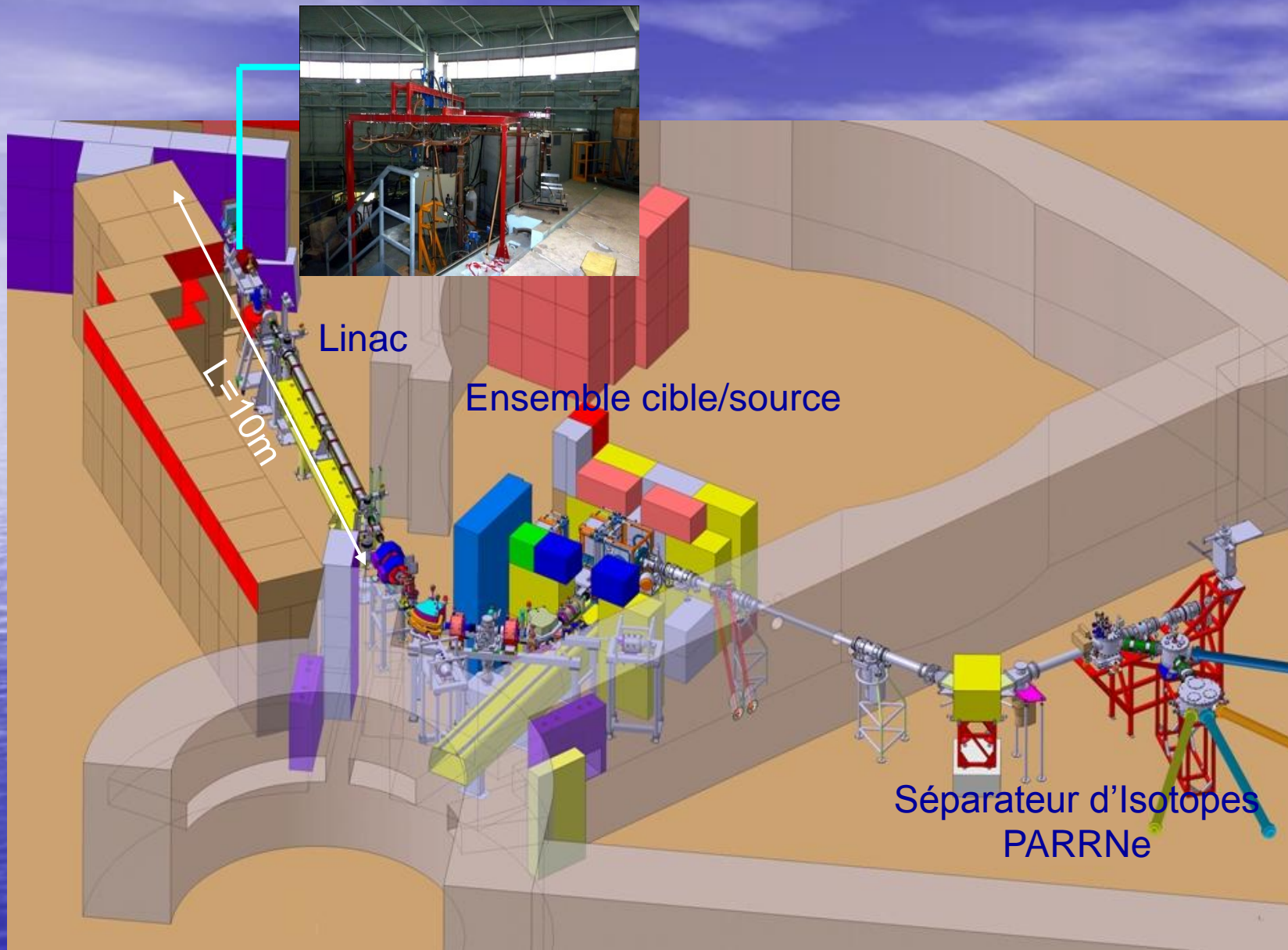
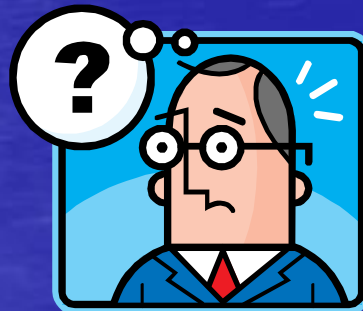


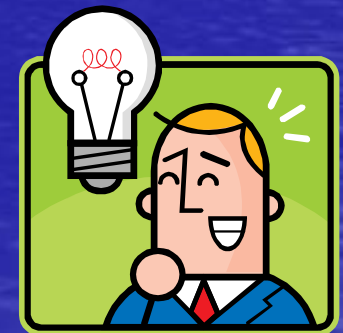
Schéma 3D de l'installation ALTO

# Causes (1/9)

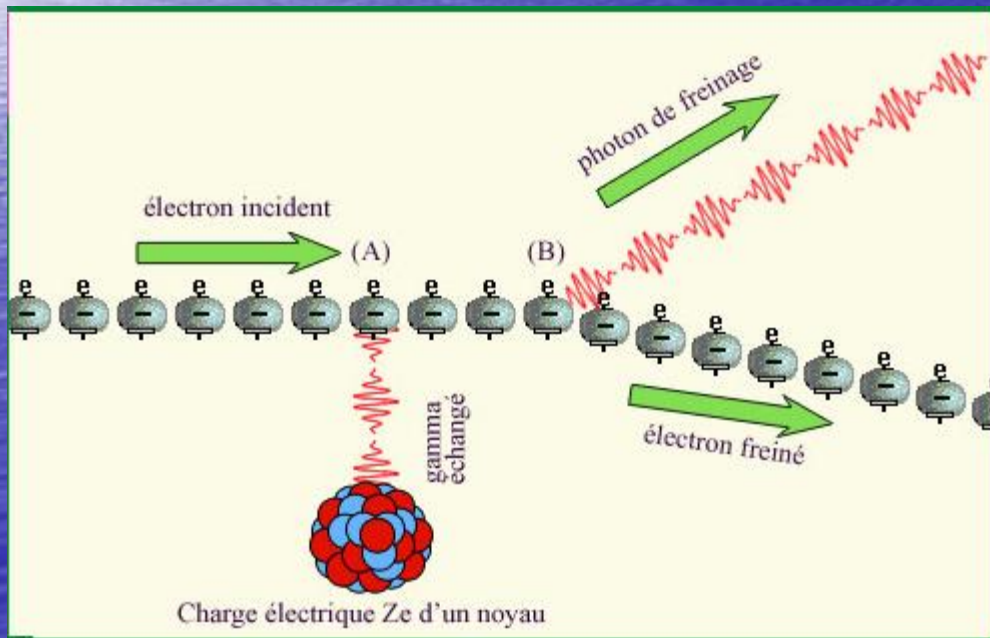
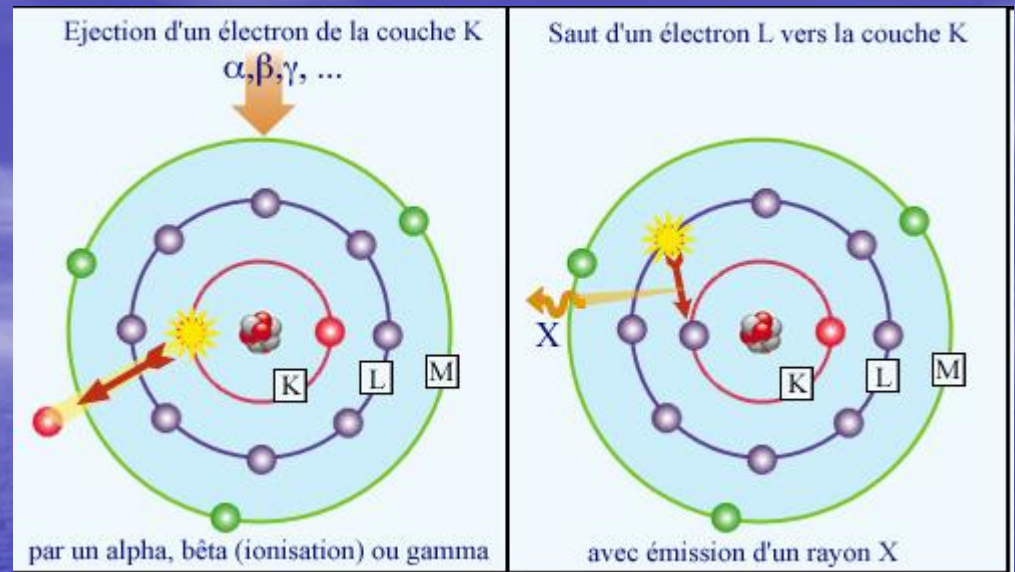
- **Accélérateur** = existence de rayonnements ionisants.
- **Quand ?** Avant (Tests) :  $X$   
Pendant (Fonctionnement) :  $\gamma$ ,  $n$ ,  $X$  et hadrons  
Après (Activation, déchets) :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ...
- **Comment ?**



Un peu  
de  
physique



# Causes (2/9)



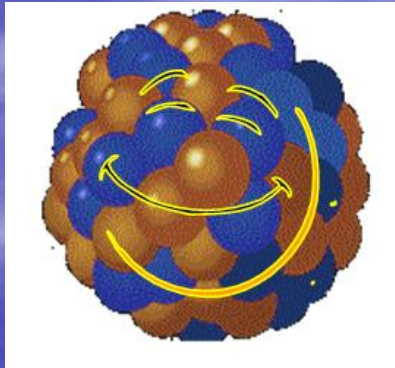
**Origine des rayonnements  
électromagnétiques  
X**

# Causes (3/9)

## Origine des rayonnements électromagnétiques : $\gamma$



Atome instable  
transformation spontanée



**Radium 226**  
88 protons  
138 neutrons

**Radon 222**  
86 protons  
136 neutrons

$\alpha$

$\beta$

**Colbalt 60**  
27 protons  
33 neutrons

**Nickel 60**  
28 protons  
32 neutrons

$e^-$

$\bar{\nu}$

**Désintégration bêta-plus**

$(Z)$	$(Z-1)$	positon	neutrino
$M(Z)c^2$	$M(Z-1)c^2$	+ 0,511 MeV	0
$Ze$	$(Z-1)e$	+ e	+ 0

**Capture électronique**

$(Z)$	électron	$(Z-1)$	neutrino
$M(Z)c^2$	+ 0,511 MeV	$M(Z-1)c^2$	+ 0
$Ze$	- e	$(Z-1)e$	+ 0

**Spectre de raies**

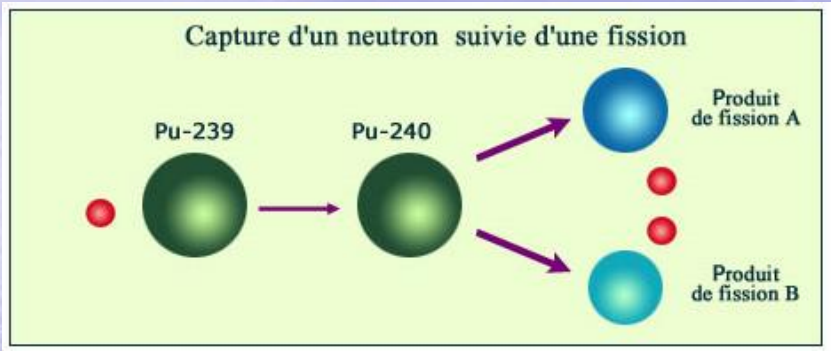
Noyau excité  $\rightarrow$  Noyau desexcité

photon gamma  $\gamma$

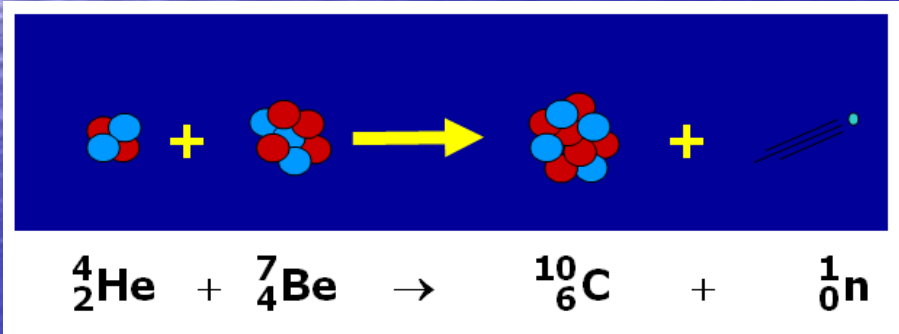
quelques keV à  
plusieurs MeV

# Causes (4/9)

## Origine des neutrons

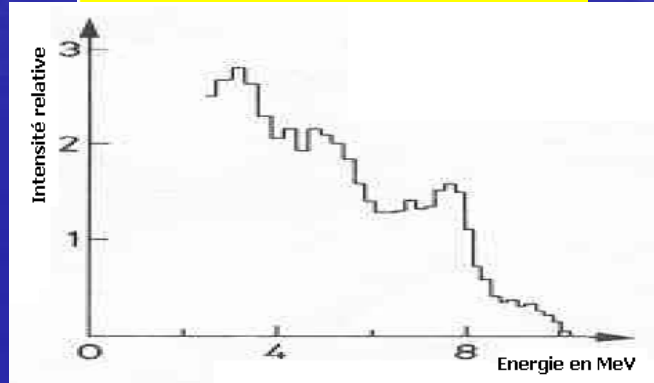
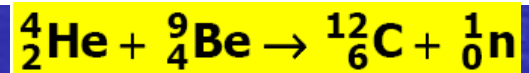
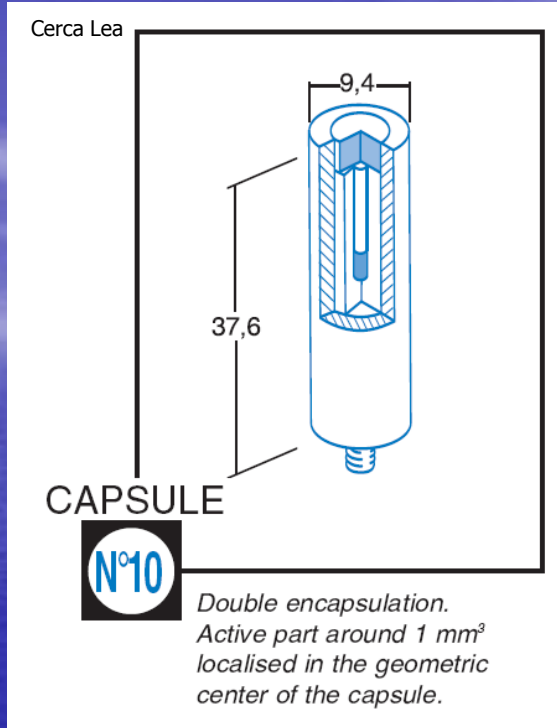


### Fission

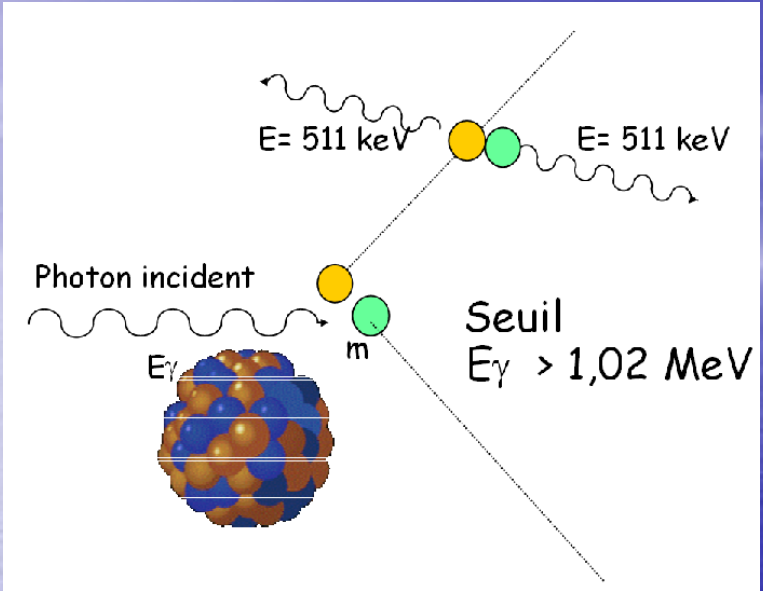


### Collision projectile-cible

Thermique (0,025 eV) à quelques centaines de MeV

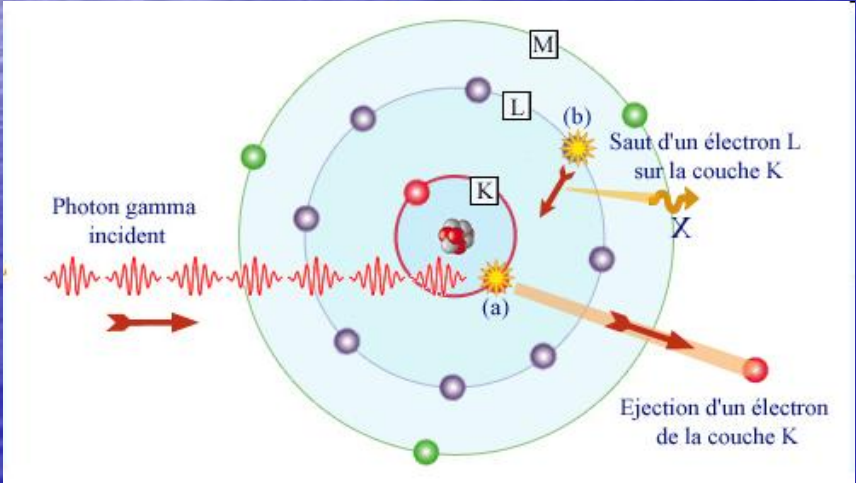


# Causes (5/9)

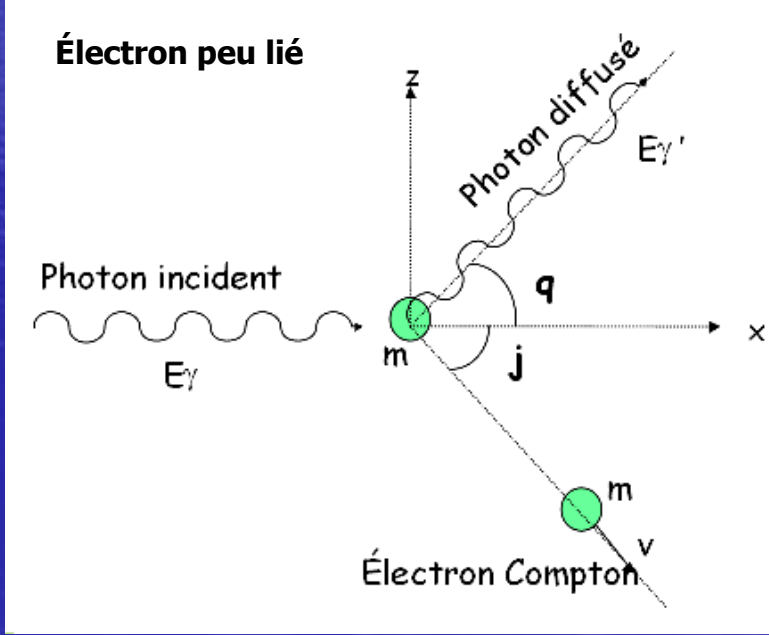


**Effet de matérialisation**

## Interaction des X et $\gamma$ avec la matière



**Effet photoélectrique**



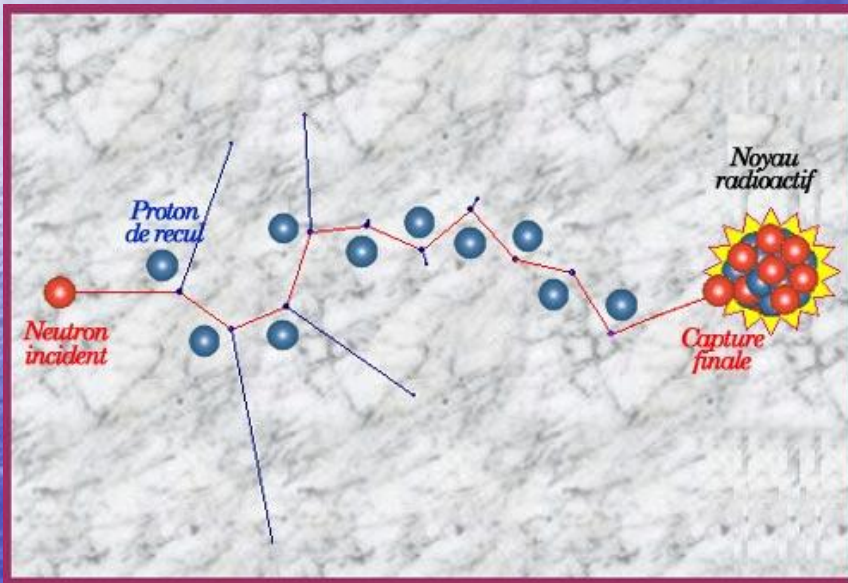
**Effet Compton**



# Causes (6/9)

## Interaction des neutrons avec la matière

A plus haute énergie  $> 20$  MeV  
réactions nucléaires  
éjection de p, n, noyaux légers,  
mésons\* et  $\gamma$

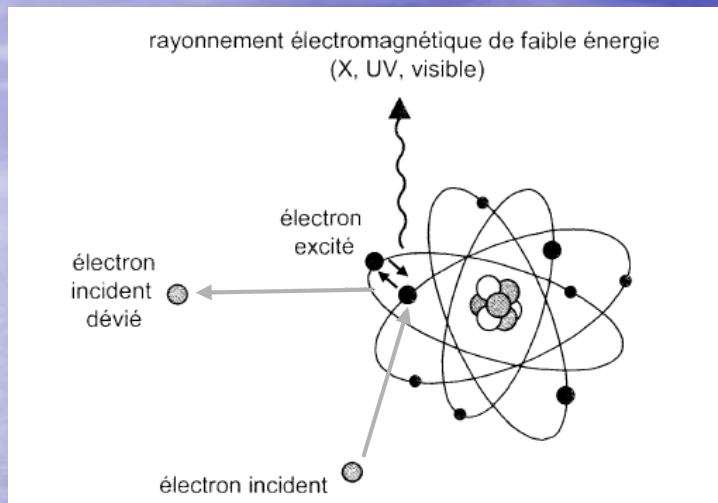


← 10 keV – 10 MeV → Thermique capture  
diffusion et recul de noyaux

**Effet de ciel** : interaction neutrons atomes de l'atmosphère, retombée en parapluie sur la périphérie  
→ toit sur accélérateur

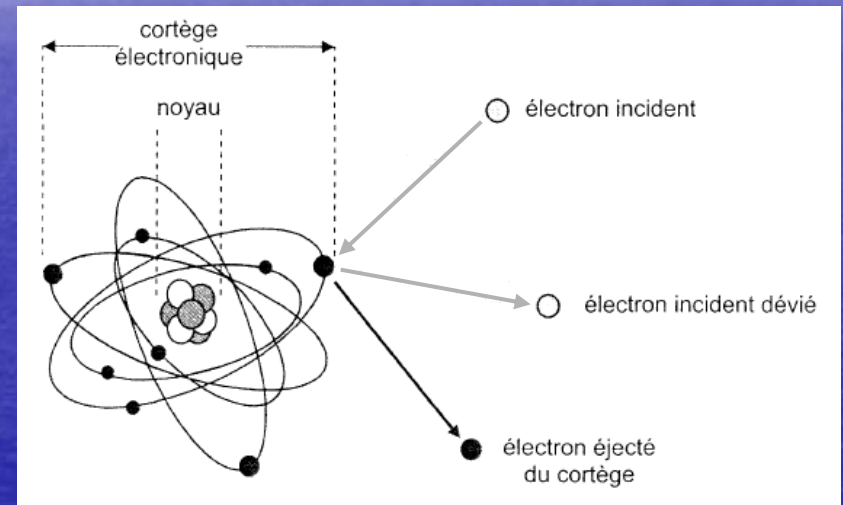
\*: un **méson** est, en physique des particules, une particule composite (c'est-à-dire non élémentaire) composée d'un nombre pair de quarks et d'antiquarks.

# Causes (7/9)

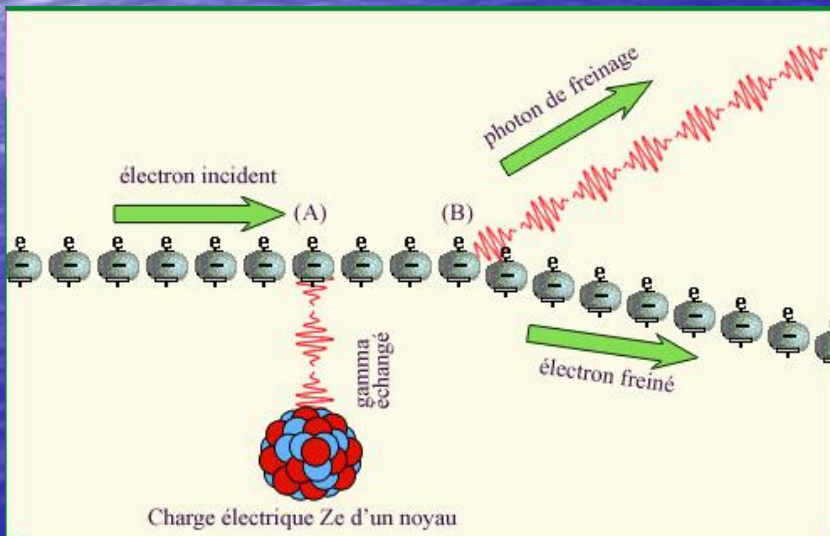


## Excitation

# Interaction des électrons avec la matière



## Ionisation



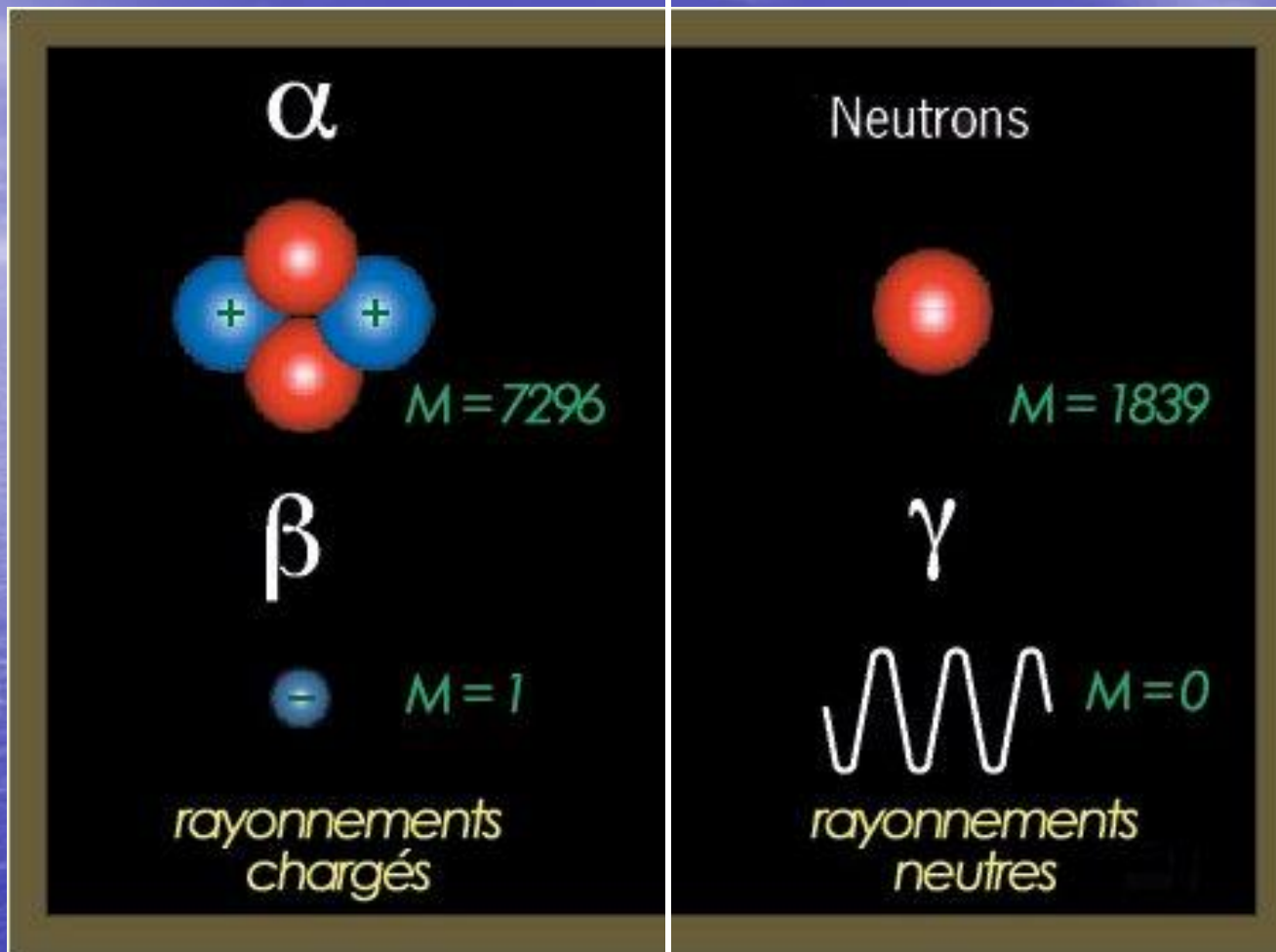
## Freinage (E élevée et Z élevé)

# Causes (8/9)

## Quelques repères :

- des X (E) traversant un milieu (Z) atténuation en  **$Z^3/E^3$**  ;
- $\gamma$  de 1 à qq MeV, **efficacité d'atténuation =  $f(m_s)$**  avec  $m_s$  la masse superficielle grandeur proportionnelle au nombre d'atomes de cible que le projectile pourrait rencontrer ;
- pour les neutrons, milieu hydrogéné car  **$m_p = m_n$**  donc meilleure efficacité de la collision ;
- pour les  $\beta$  : à  **$m_s$  équivalente** -> matériaux à peu près équivalent

# Causes (9/9)



Rayonnements directement ionisants

Rayonnements indirectement ionisants

## Conséquences (1/21)

- **Activité, dose absorbée, équivalent de dose et dose efficace :**

**Activité = grandeur physique**

**Dose absorbée = grandeur physique**

**Equivalent de dose = grandeur biologique**

**Dose efficace = grandeur biologique et administrative**

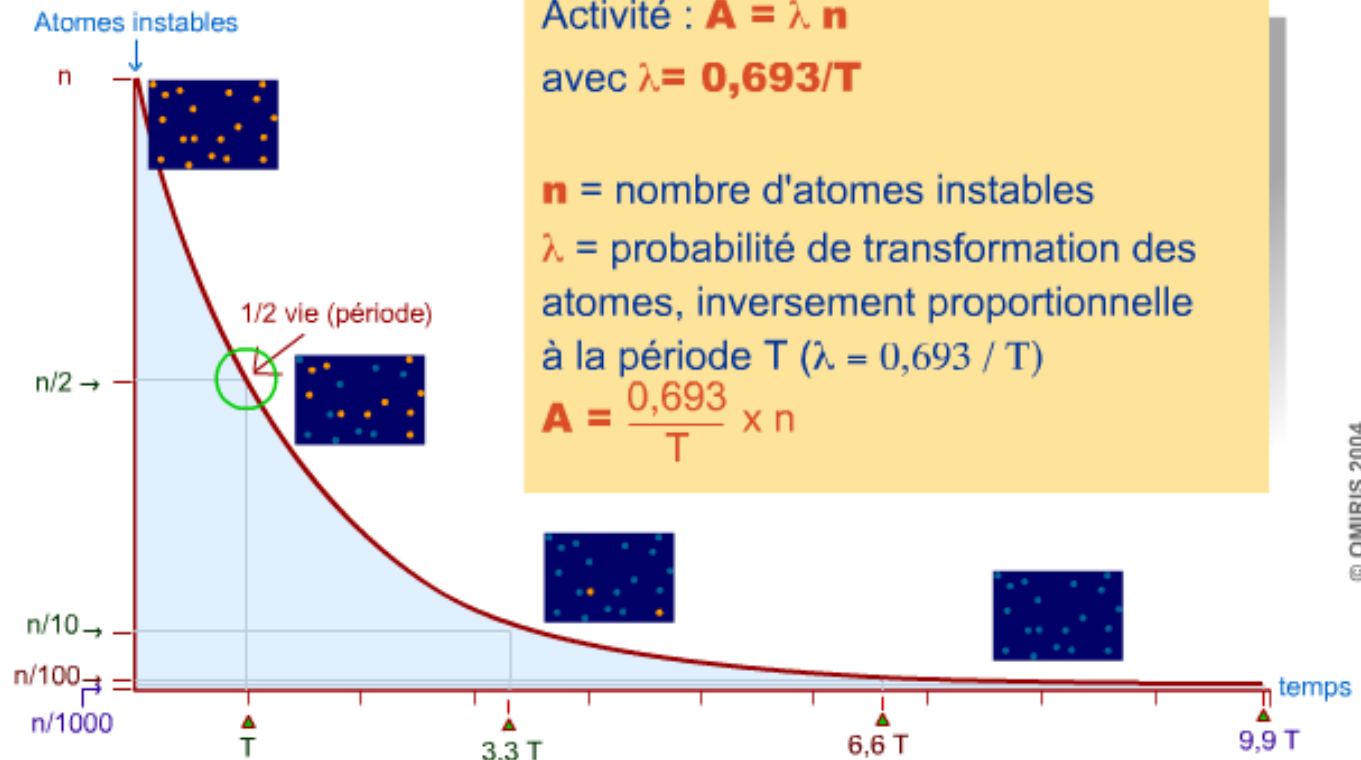
# Conséquences (2/21)

<b>Grandeurs</b>	<b>Unités</b>		<b>Equivalence</b>	<b>Définition</b>
<b>Activité [A]</b>	Becquerel (Bq)	Curie (Ci)	$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$	Mesure du nombre de désintégrations par seconde
<b>Dose absorbée [D]</b>	Gray (Gy)	Rad (Rad)	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$	Mesure de l'énergie reçue par unité de masse
<b>Equivalent de dose [H]</b>	Sievert (Sv)	Rem (Rem)	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$	Effet des rayonnements sur les tissus
<b>Dose efficace [E]</b>	Sievert (Sv)	Rem (Rem)	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$	Effet des rayonnements sur les tissus

# Conséquences (3/21)

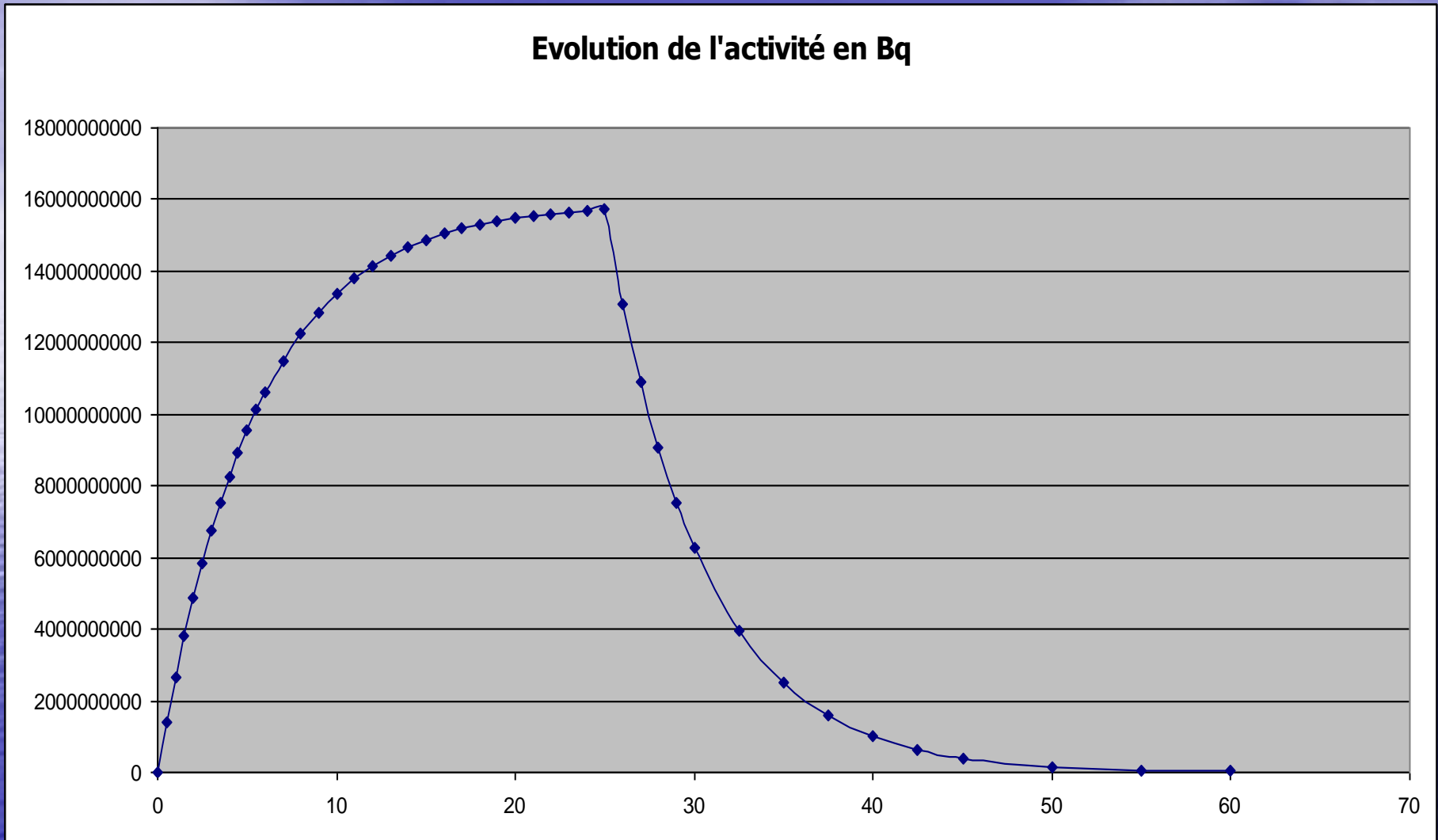
## Activité, activation

### Mesure et décroissance de l'activité



# Conséquences (4/21)

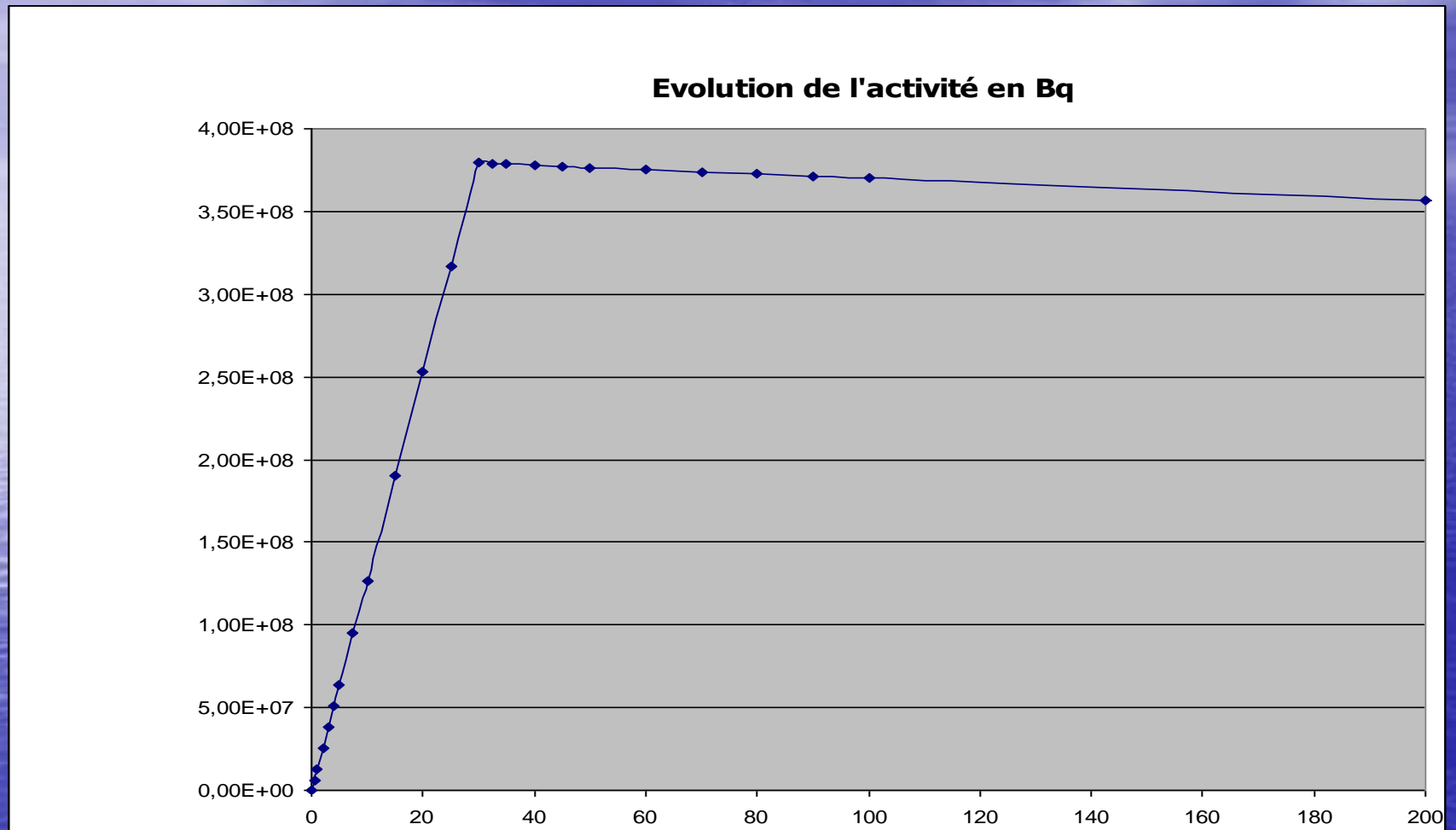
Evolution de l'activité en Bq



Evolution au cours du temps (en mn) de l'activité du  $^{52}\text{Cr}$  ( $T_{1/2}=3,76$  mn) produit par activation neutronique d'un échantillon de  $^{51}\text{V}$



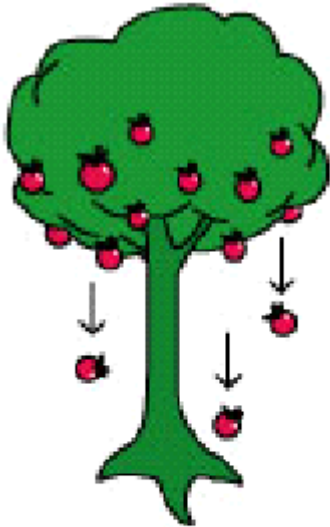
# Conséquences (5/21)



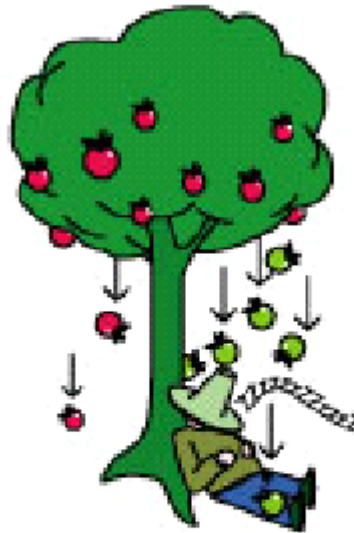
Evolution au cours du temps (en jours) de l'activité du  $^{60}\text{Co}$  ( $T_{1/2}=5,27$  ans) produit par activation neutronique d'un échantillon de cobalt naturel

# Conséquences (6/21)

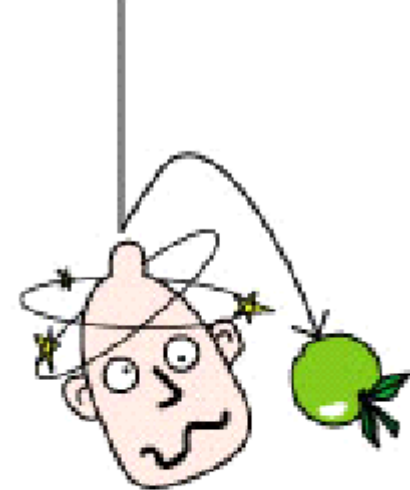
Tout comprendre en une, non trois images



Le nombre de pommes qui tombent peut se comparer au **Becquerel** (nombre de désintégrations par seconde)



Le nombre de pommes reçues par le dormeur peut se comparer au **Gray** (dose absorbée)



L'effet laissé sur son corps selon le poids ou la taille des pommes peut se comparer au **Sievert** (effet produit)

## Dose efficace

$$E = E_{\text{externe}} + E_{\text{interne}}$$

$$E_{\text{externe}} = \sum_t \omega_t \cdot H_t = \sum_t \omega_t \cdot \sum_r \omega_r \cdot D_{t,r}$$



$$E_{\text{interne}} = \sum_j h(g)_{j,\text{ing}} \cdot J_{j,\text{ing}} + \sum_j h(g)_{j,\text{inh}} \cdot J_{j,\text{inh}}$$

arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003 (tableau 3.1, 3.2 et 3.3)



# Conséquences (8/21)

Types de rayonnements et énergies		$\omega_r$
X, $\gamma$ (toutes énergies)		1
$\beta^-$ , $\beta^+$ et électrons		1
Neutrons	< 10 keV	5
	10 à 100 keV	10
	100 keV à 2 MeV	20
	2 MeV à 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protons > 2 MeV		5
$\alpha$ , fragments fission, noyaux lourds		20



Tissu ou organe	$\omega_t$
Gonades	0,2
Moelle osseuse	0,12
Colon	0,12
Poumons	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Sein	0,05
Foie	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres	0,05



## Passage d'un équivalent de dose à la dose efficace

Limite annuelle d'un travailleur exposé de catégorie A  
pour les mains : 500 mSv avec des rayons X

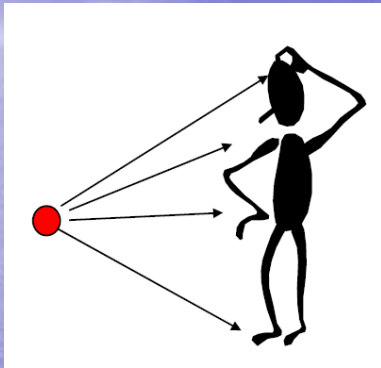
$$\omega_t = 0,01$$

Surface de la peau des mains = 5 %

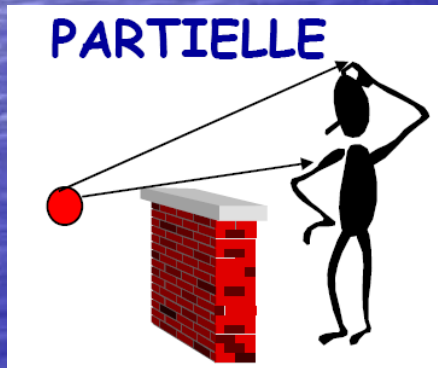
$$E_{\text{ext}} = 500 \times 1 \times 0,01 \times 0,05 = \mathbf{0,25 \text{ mSv}}$$

# Conséquences (10/21)

## Plusieurs voies d'atteinte



Exposition externe

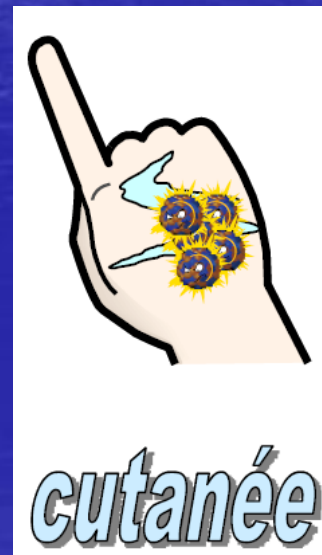


Inhalation



Ingestion

Exposition interne



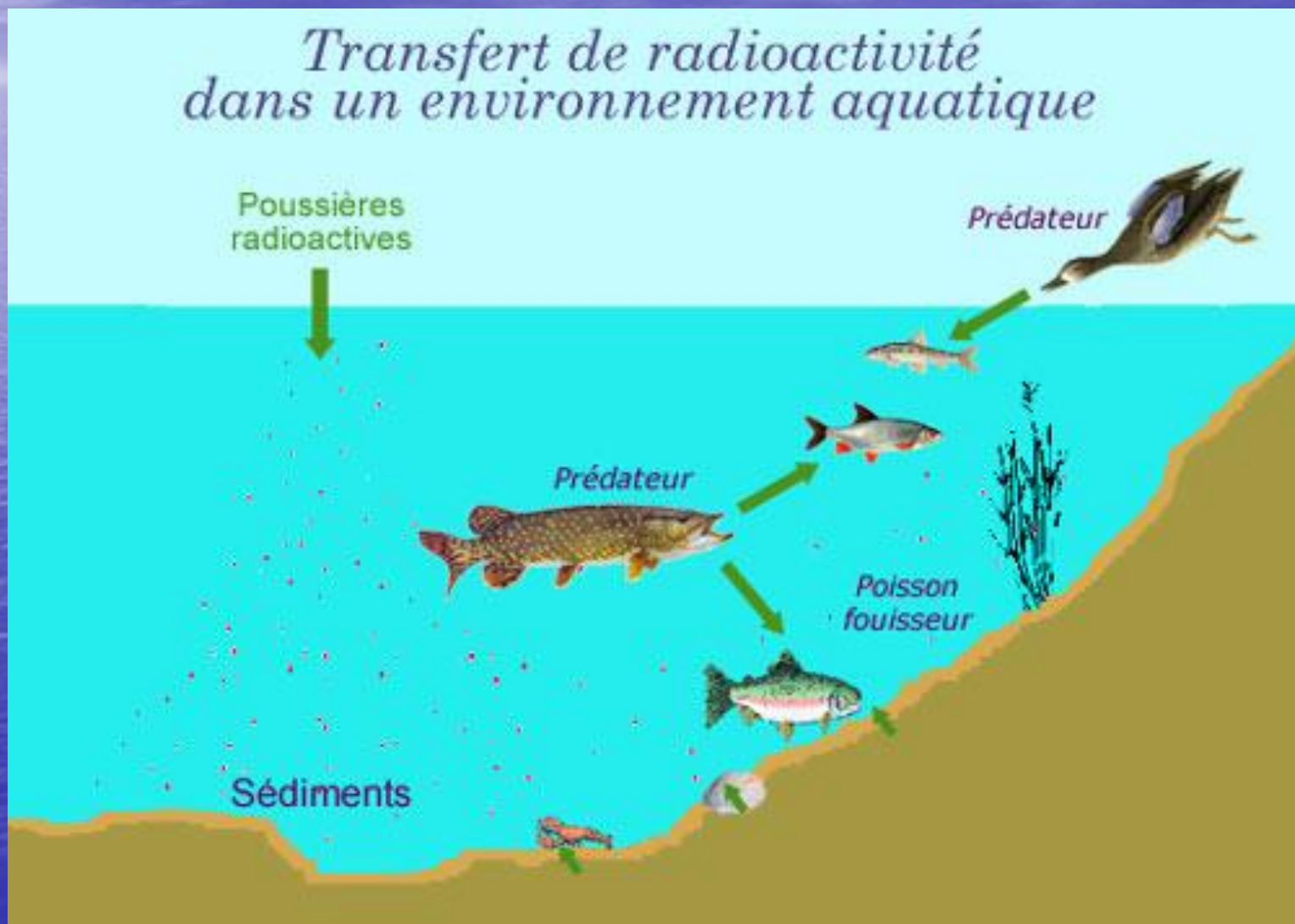
cutanée



Blessure

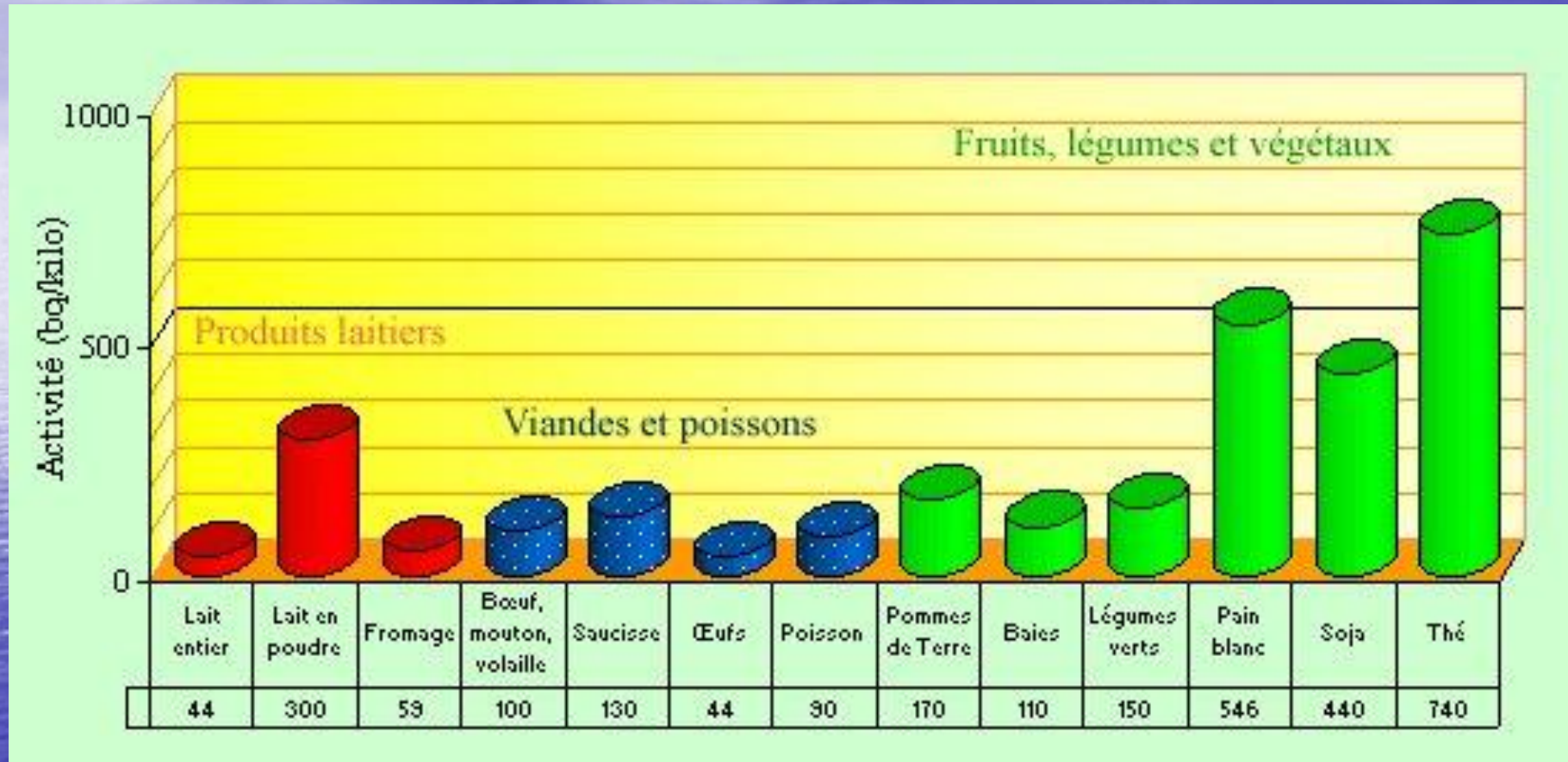
# Conséquences (11/21)

## Transfert de la radioactivité



# Conséquences (12/21)

## Bq et alimentation

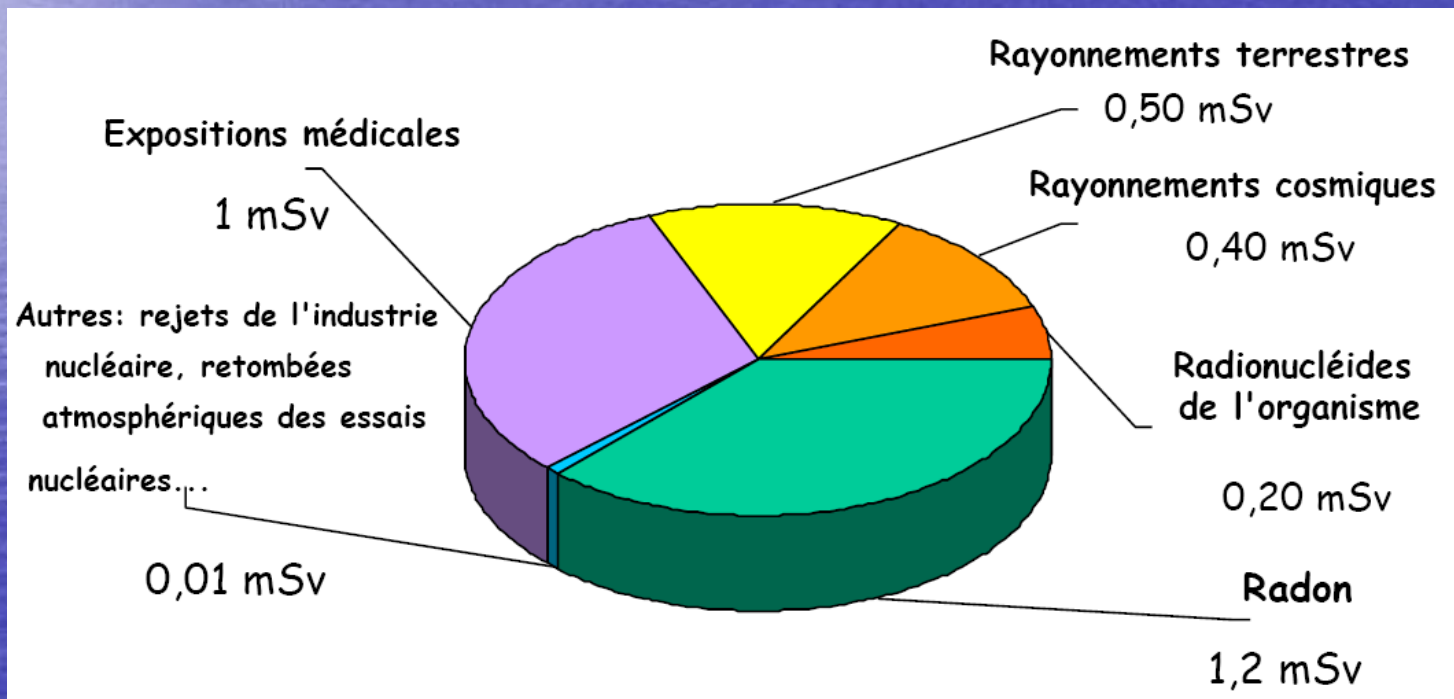


Des activités de quelques centaines de becquerels (Bq) par kilogramme ou par litre peuvent sembler élevées, mais rappelons, à titre de comparaison, que l'activité de notre corps s'élève à 8000 (Bq) pour un homme de 70 kg.

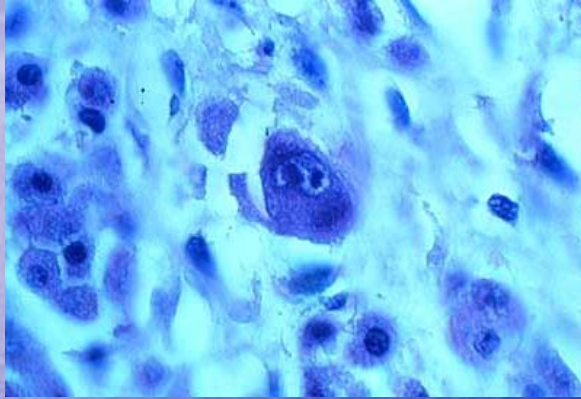


# Conséquences (13/21)

## Sources d'exposition

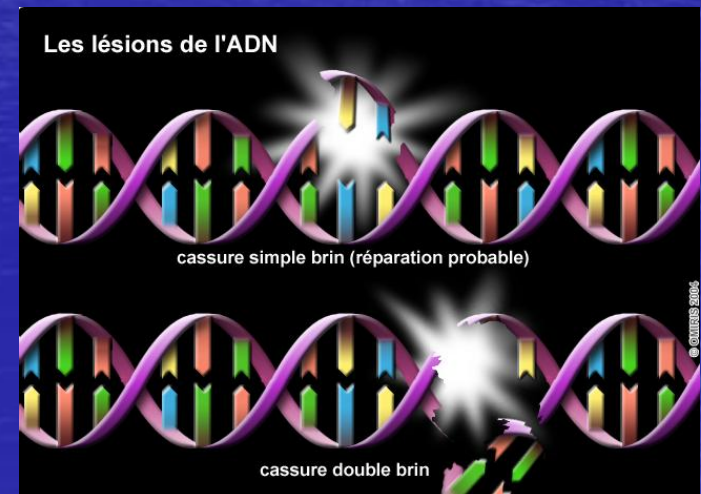
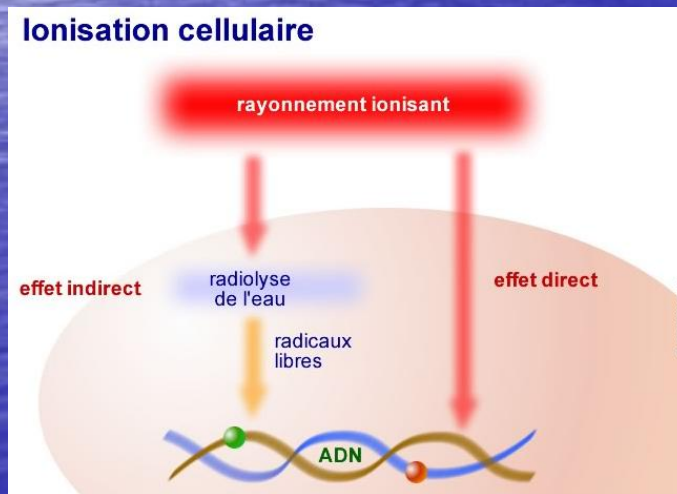


# Conséquences (14/21)



Cellule = 80 % d'eau

Le vecteur EAU = modèle physique

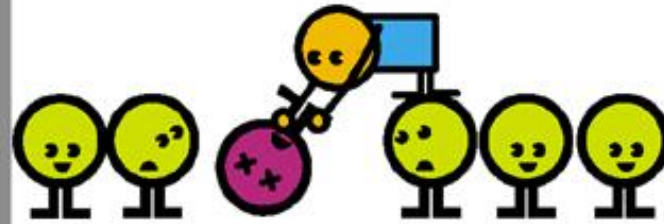


# Conséquences (15/21)

## La réparation de l'ADN



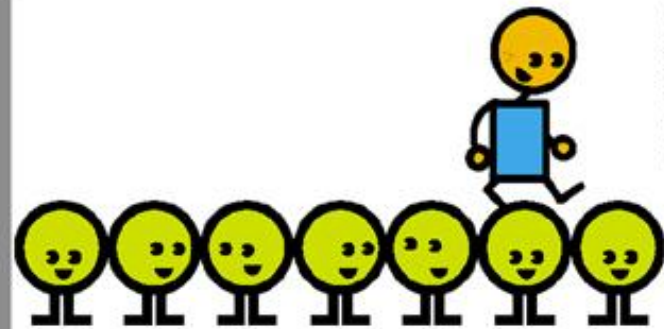
1. Reconnaissance



2. Retrait

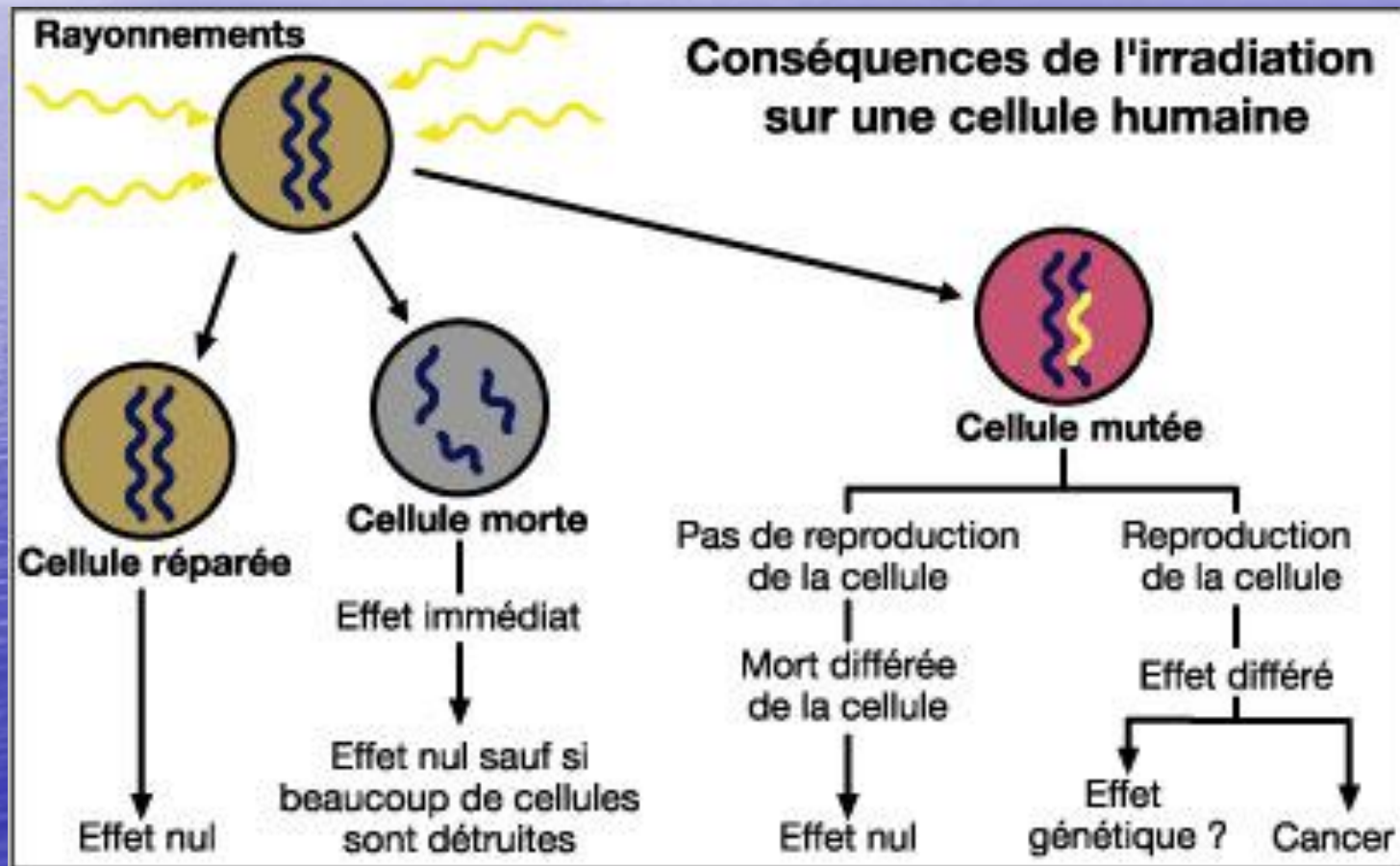


3. Réparation



4. Reconstitution

## Effets des rayonnements



# Conséquences (17/21)

## Effets déterministes ou obligatoires à seuil :

- à dose égale mêmes pathologies développées,
- pas forcément grave,
- temps de latence très faible (heures, mois).

Irradiation globale						
Dose en Gy	< 1	2 à 2,5	3 à 5	5	8	10
Effets	Discrète baisse des globules blancs neutrophiles (leucopénie)	Nausées, vomissements, hospitalisation indispensable, atteinte de la moelle osseuse (anémie, infections, hémorragies)	Aggravation de tous les signes Erythème cutané, perte de cheveux	Dose létale 50 DL 50 = 50 % de décès	Atteinte intestinale et respiratoire	Coma DL 100 = 100% de décès Mort probable en qq heures à 15 jours

# Conséquences (18/21)

Irradiation locale			
Dose en Gy	3	5	7
Effets	Seuil de l'érythème si dose unique 10 Gy en dose fractionnée	Sur les testicules <b>stérilité définitive</b>	Sur les ovaires <b>stérilité définitive</b>

Dose en Gy: 10 à 20 radiodermite (brûlure 2<sup>ème</sup> degré)  
> 25 radionécrose (risque de cancer)

# Conséquences (19/21)

## Effets stochastiques ou aléatoires sans seuil :

- pas de relation dose pathologie,
- forcément grave,
- temps de latence très grand.

<b>Cancers radio induits</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Risques incontestablement accru pour des doses <math>&gt; 0,5</math> Gy</li><li>• Moins sûrs pour <math>&lt; 0,2</math> Gy</li><li>• Leucémies, thyroïde, seins, pulmonaires par inhalation</li></ul>
<b>Effets génétiques</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Par modifications des cellules de la reproduction</li><li>• Transmission aux descendants (études sur l'animal pour doses supérieures <math>0,5</math> Gy)</li></ul>

# Conséquences (20/21)

## Effets sur l'embryon et le fœtus

effets tératogènes\* et fœtotoxiques\*\*

<b>Avant le 9<sup>ème</sup> jour</b>	<b>Tout ou rien</b> <b>Avortement ou enfant normal</b>
<b>Du 9<sup>ème</sup> jour au 60<sup>ème</sup> jour</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Dose &lt; 0,2 Gy aucune conséquence</li><li>• Sinon éventuels retards mentaux, malformations</li><li>• Augmentation du risques de cancer de l'enfant (mère irradiée &gt; 0,2 Gy)</li></ul>

\* : effet provoqué par certaines substances qui, en cours de grossesse, sont responsables de malformations de l'embryon lors de son développement in-utero

\*\* : atteinte de la croissance ou fonctionnelle des organes en place

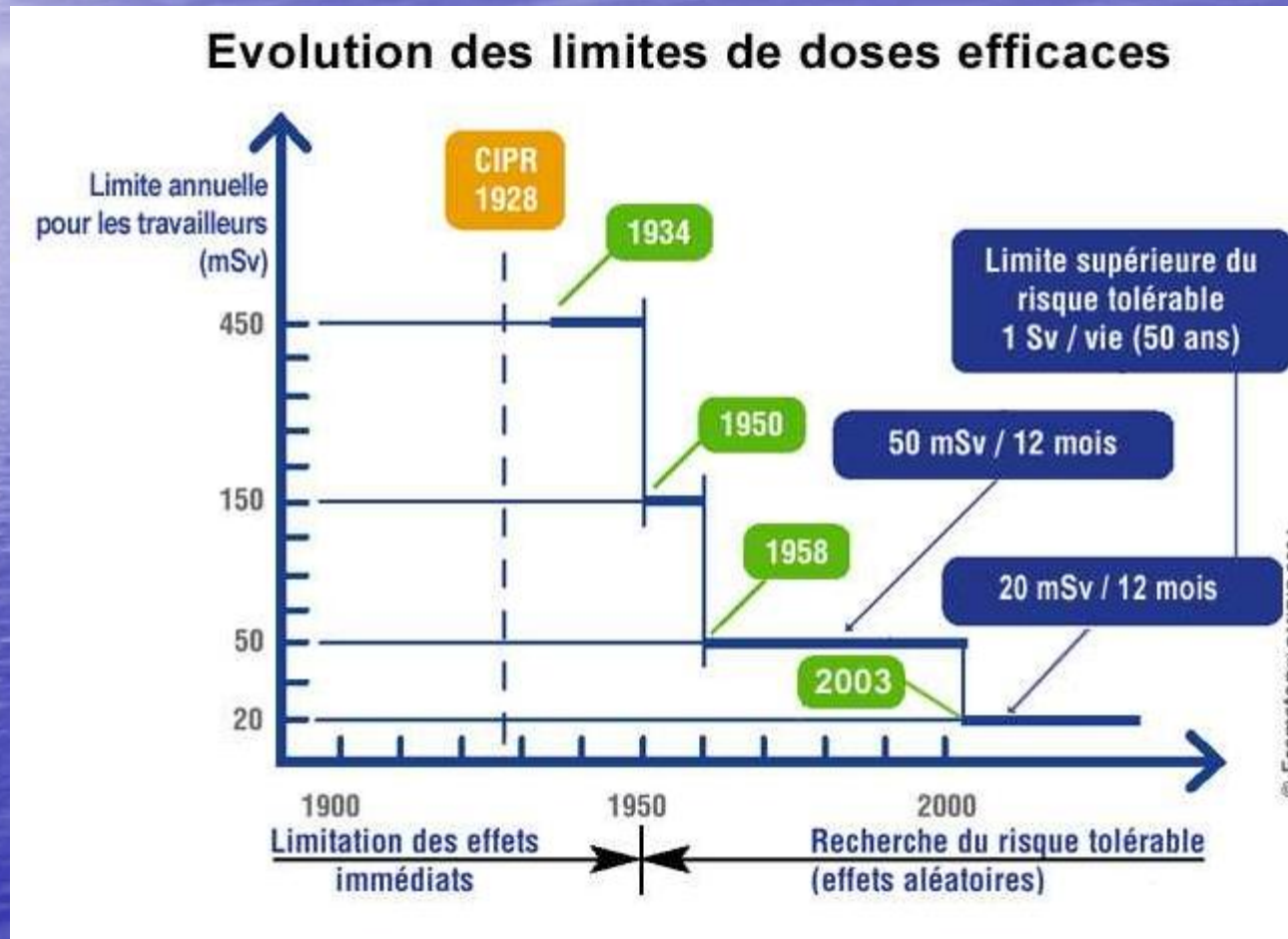


# Conséquences (21/21)

## Tableau comparatif des effets déterministes et stochastiques :

Effets <b>déterministes</b>	Effets <b>stochastiques</b>
cause: destruction massive des cellules	cause: lésions non réparées de l'ADN
obligatoires (ils apparaissent toujours)	aléatoires
pathologies diverses	cancers et effets génétiques
dose seuil d'apparition: 0,2 - 0,3 Gy	pas de dose seuil d'apparition
manifestation précoce	manifestation tardive
gravité dépendante de la dose	gravité indépendante de la dose
clairements décrits	non spécifiques

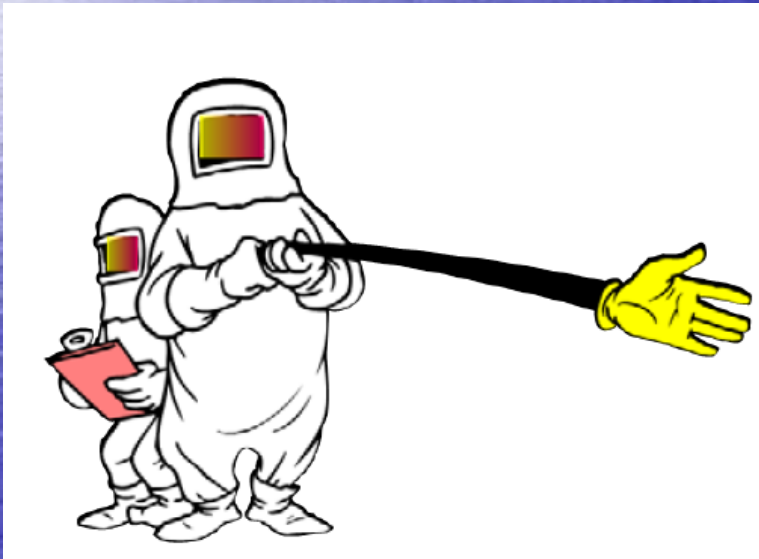
## Principe de limitation



# Parades (2/19)

<b>Sur 12 mois consécutifs en mSv</b>		<b>Cat. A</b>	<b>Cat. B</b>	<b>Apprenti et étudiant (de 16 à 18 ans)</b>	<b>Public</b>	<b>Femme enceinte</b>
<b>Dose efficace</b> Exposition interne et externe		<b>20</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Dose équivalente</b>	<b>crystallin</b>	<b>150</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>1</b>
	<b>mains, avant- bras, pieds et chevilles</b>	<b>500</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>50</b>	<b>1</b>
	<b>peau (dose moyenne pour 1 cm<sup>2</sup>)</b>	<b>500</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>50</b>	<b>1</b>

## DTE



**DISTANCE**



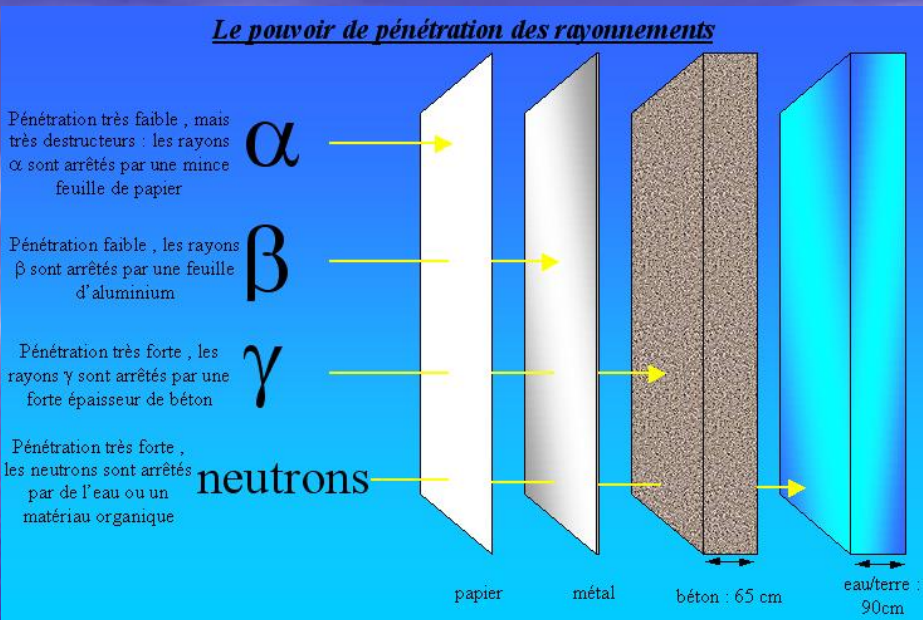
**TEMPS**



**ECRAN**

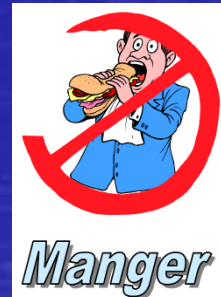
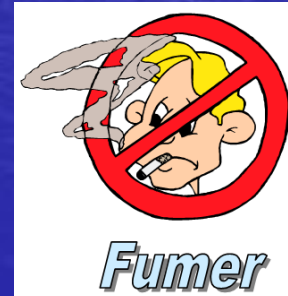
# Parades (4/19)

## Exposition externe



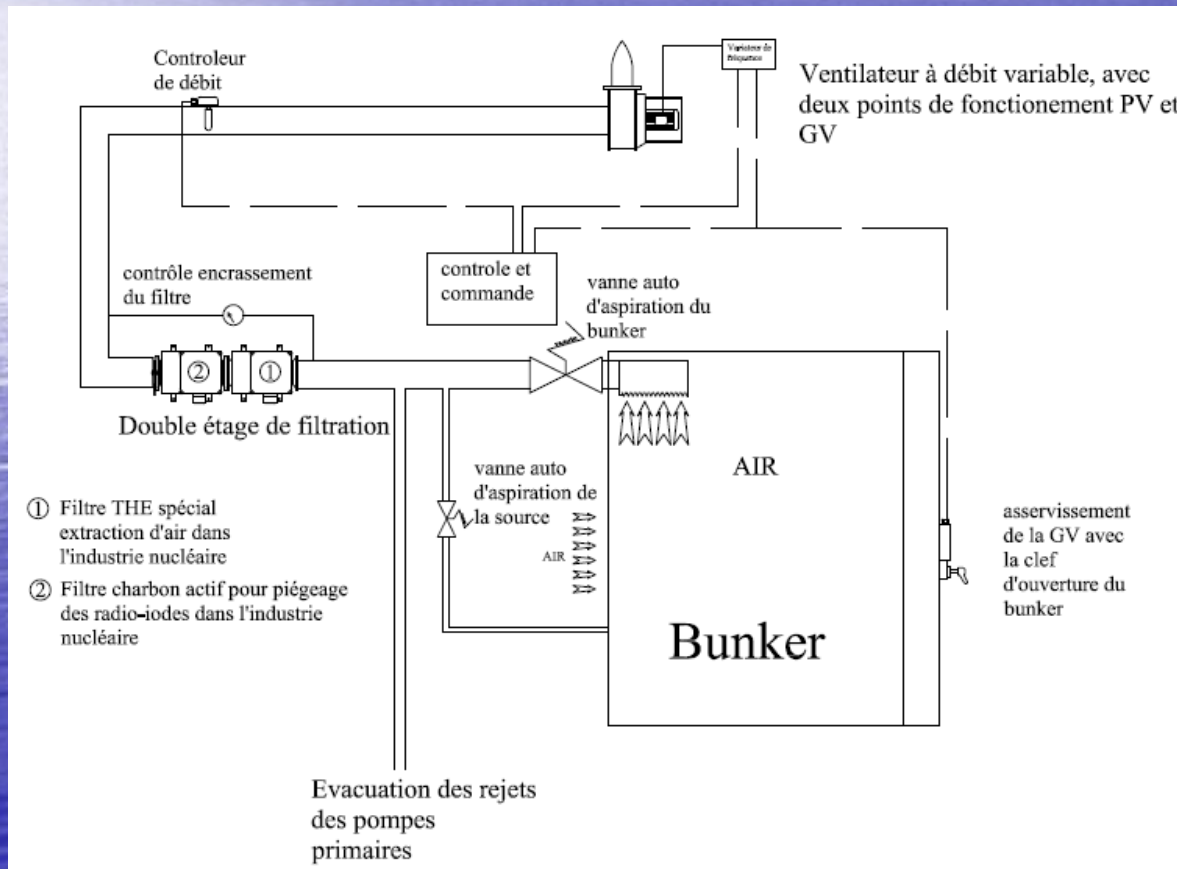
## Exposition interne

Ventilation nucléaire  
 filtre charbon + THE



# Parades (5/19)

## Système de ventilation du bunker



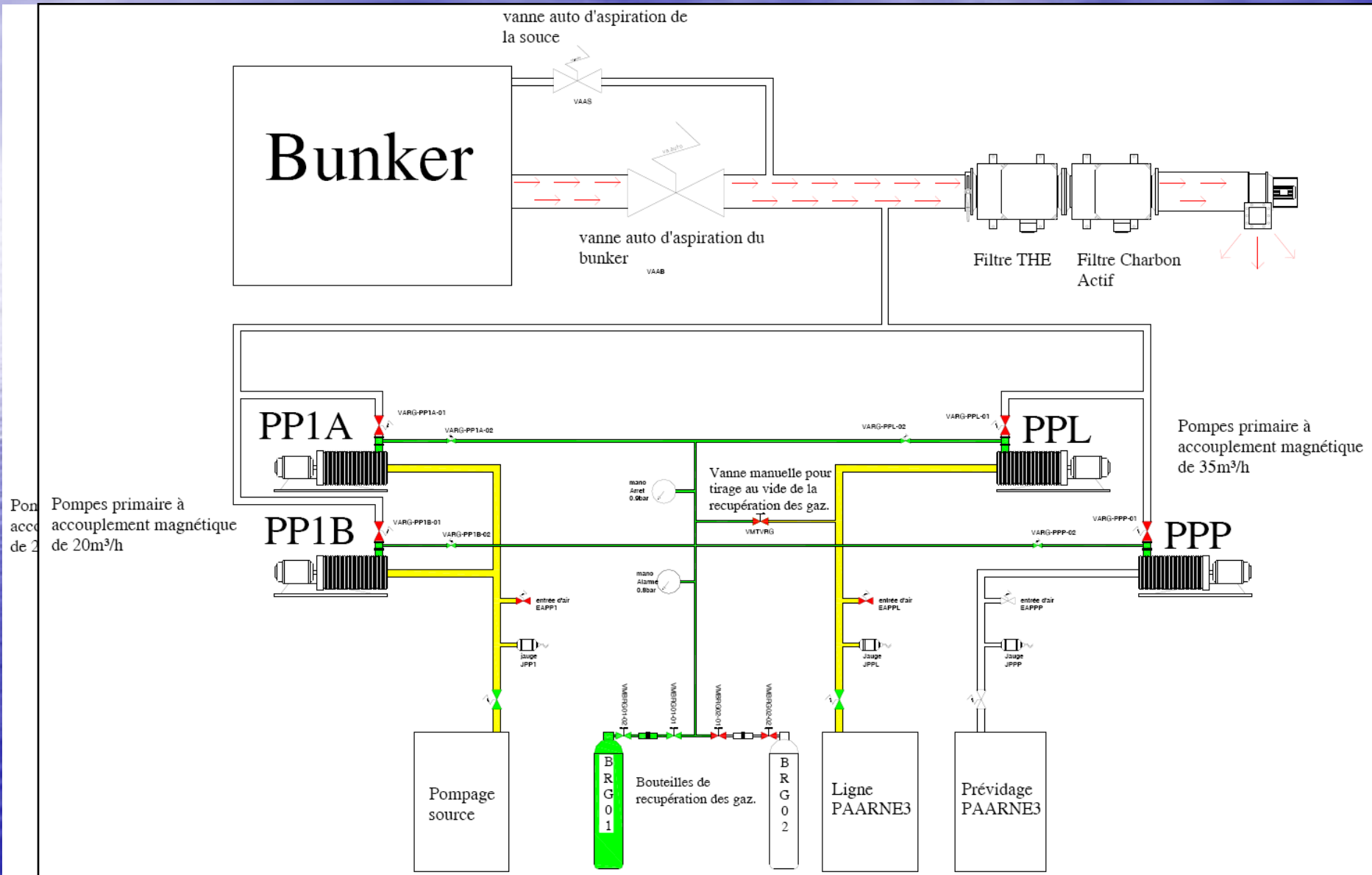
$^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$	9,96 min
$^{16}\text{O}(n,2n)^{15}\text{N}$	122 s
$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$	7,13 s
$^{14}\text{N}(n,nT)^{11}\text{C}$	20,5 min
$^{16}\text{O}(n,2n\alpha)^{11}\text{C}$	20,5 min
$^{40}\text{Ar}(n,\alpha)^{37}\text{S}$	5 min
$^{40}\text{Ar}(n,p)^{40}\text{Cl}$	1,35 min
$^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}$	1,83 h

Système asservi à la position de la porte lourde soit 700 ou 1500 m<sup>3</sup>/h.

Synthèse défauts de fonctionnement et commandes PV et GV pilotage depuis pupitre PAARNe

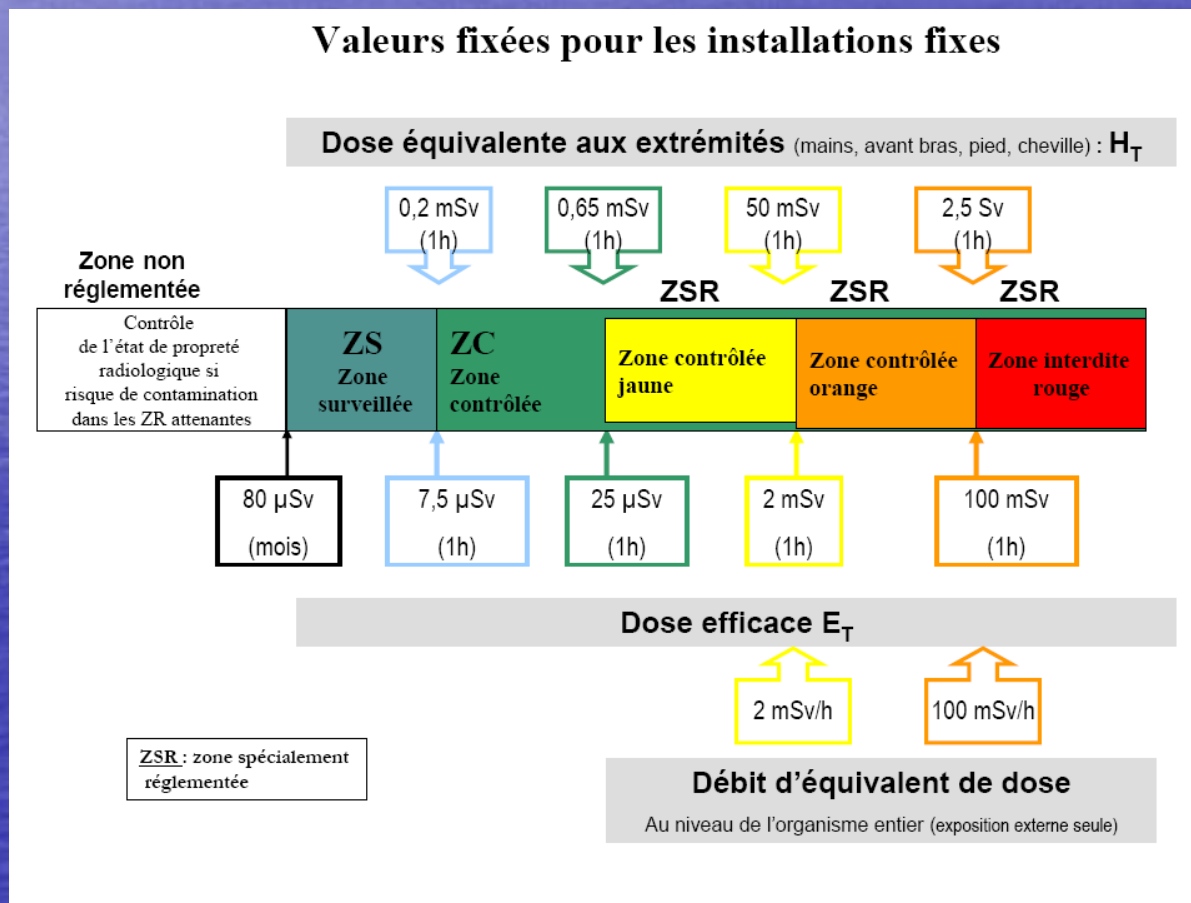
# Parades (6/19)

## Circuit dédié à la récupération des gaz et pré vidage des bouteilles



## Zonage (arrêté du 15 mai 2006) :

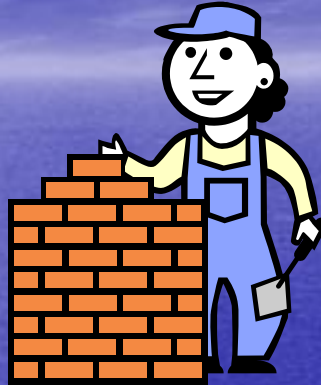
- Prévoir le risque, quantifier l'exposition attendue ;





# Parades (8/19)

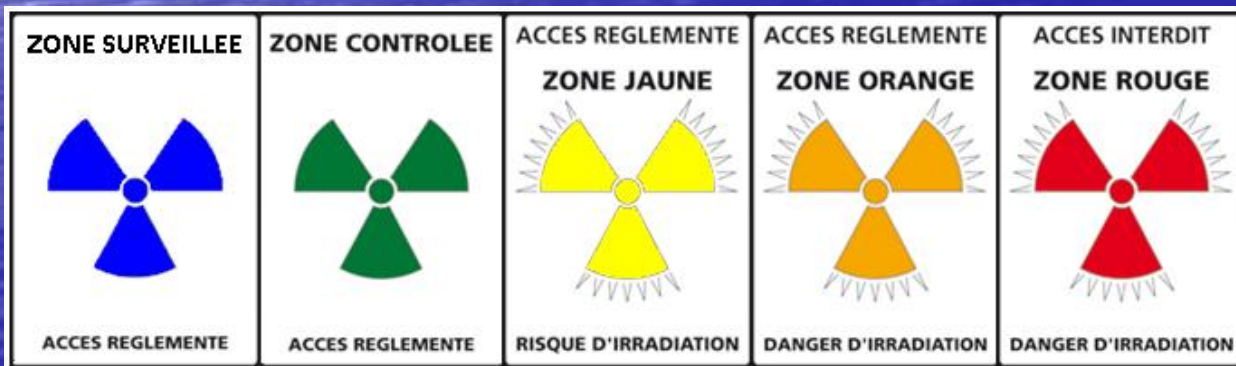
- Essayer de le réduire autant que faire se peut ;



- Balisage du risque ;



Rayonnements ionisants



Source de haute activité

# Parades (9/19)

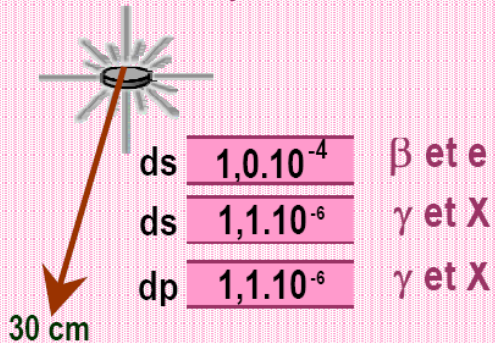
## Prévision : assez aisée pour une source permanente

Source de haute activité de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $A = 2 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 20 \text{ GBq}$

A 30 cm « dp » (dose corps entier) = 22 mSv/h

Exposition externe ( $\mu\text{Sv/h}$ )  
pour une activité de 1Bq

Source ponctuelle



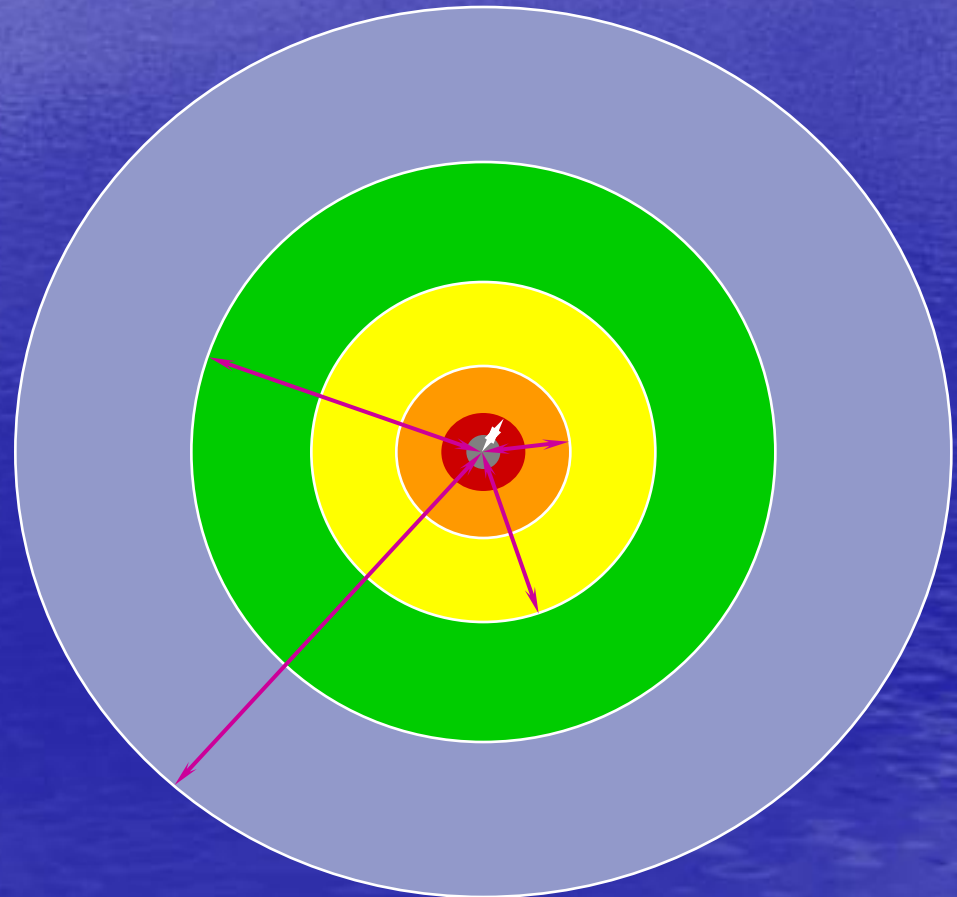
Ø ZI = 14 cm

Ø ZO = 1 m

Ø ZJ = 9 m

Ø ZC = 16 m

Ø ZS = 63 m



## **Autour des accélérateurs, plus complexe :**

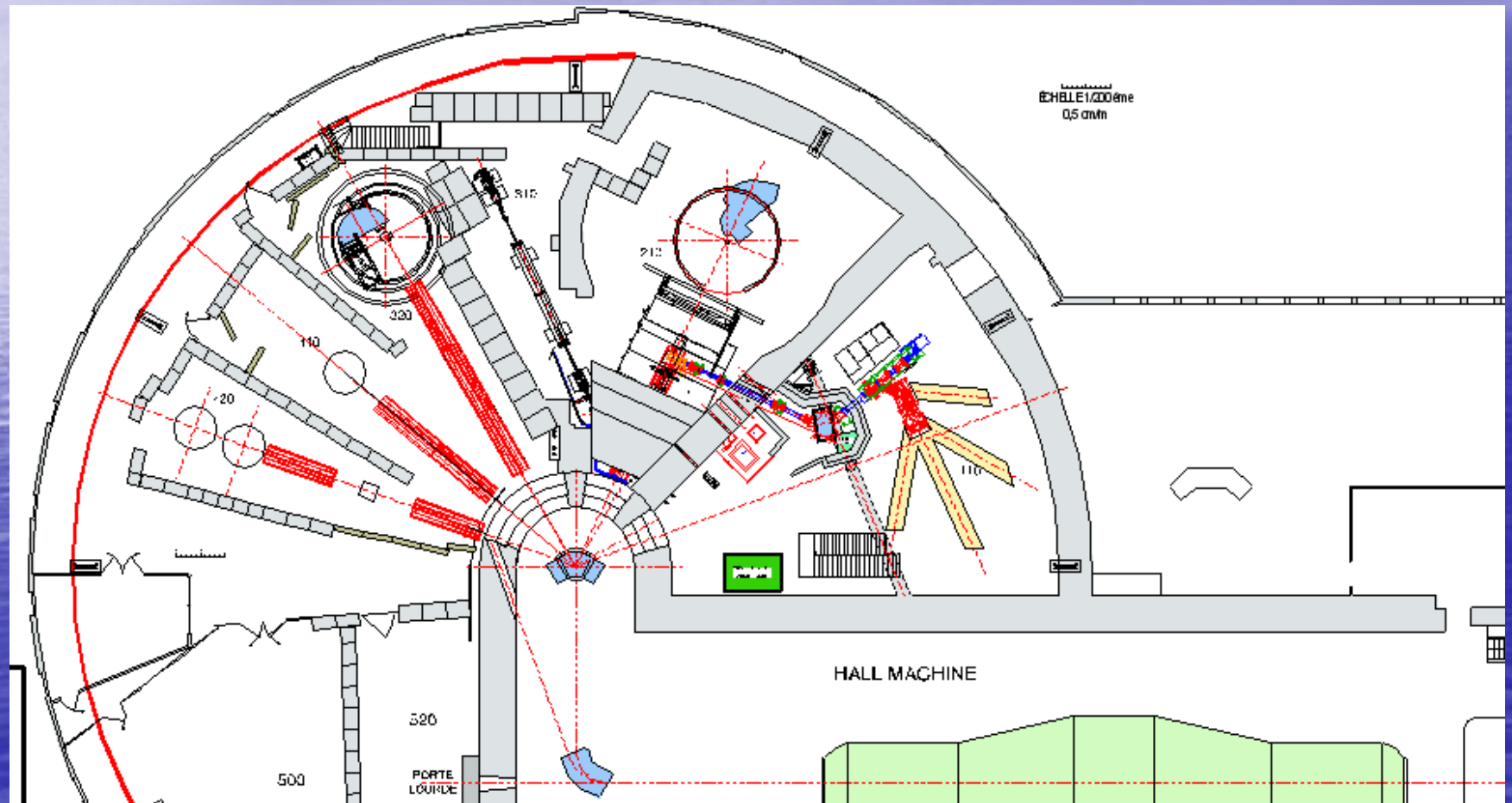
- Multiplicité des rayonnements à prendre en compte ,
- Caractère non permanent du faisceau ,
- Intensité variable et nature du faisceau ajustable .

## **Simulation mathématique, utilisation de code comme FLUKA :**

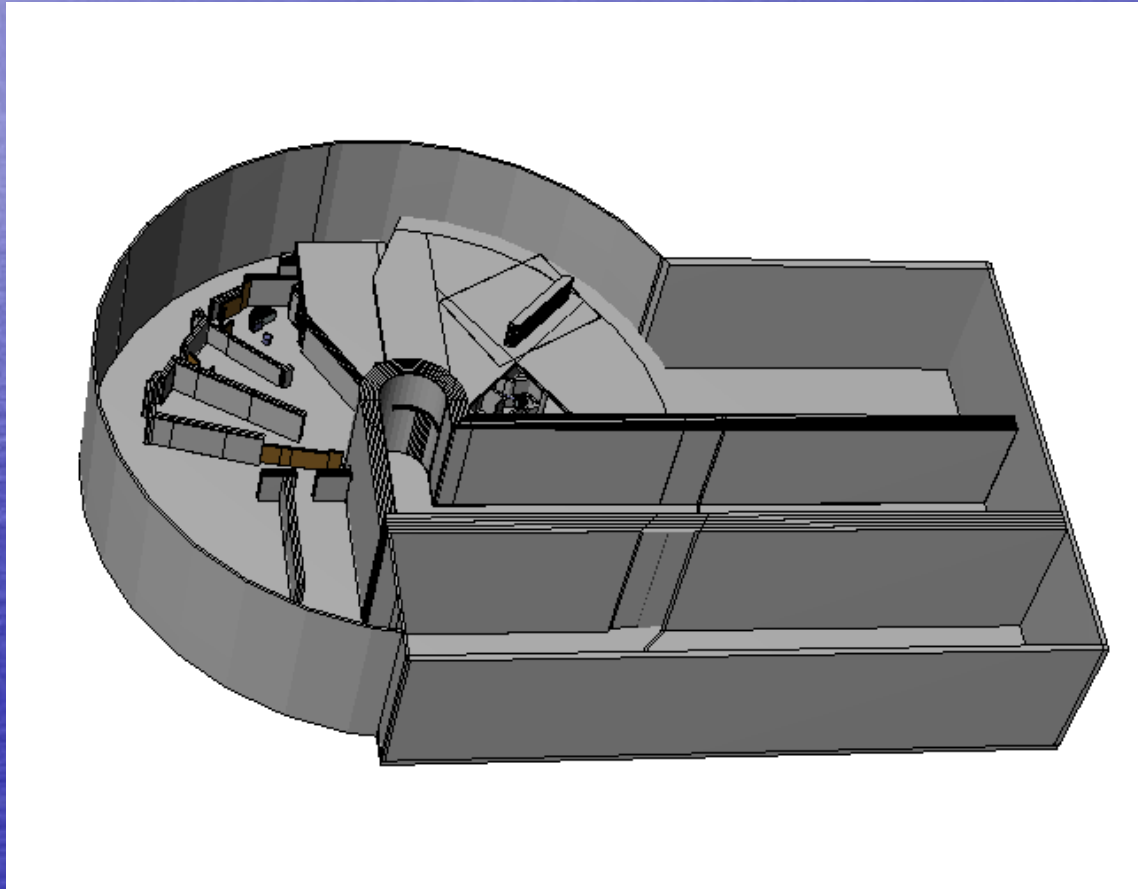
**Méthode de Monte Carlo basée sur des tirages de nombres aléatoires , du traitement d'une particule simulée de son lancement jusqu'à sa « mort », en tenant compte de toutes les interactions qu'elle est susceptible de subir.**

**Le code peut ainsi simuler une large gamme des interactions « particule-matière », et cela sur un vaste domaine d'énergie pour les différents types de particules.**

## Plan de l'installation ALTO



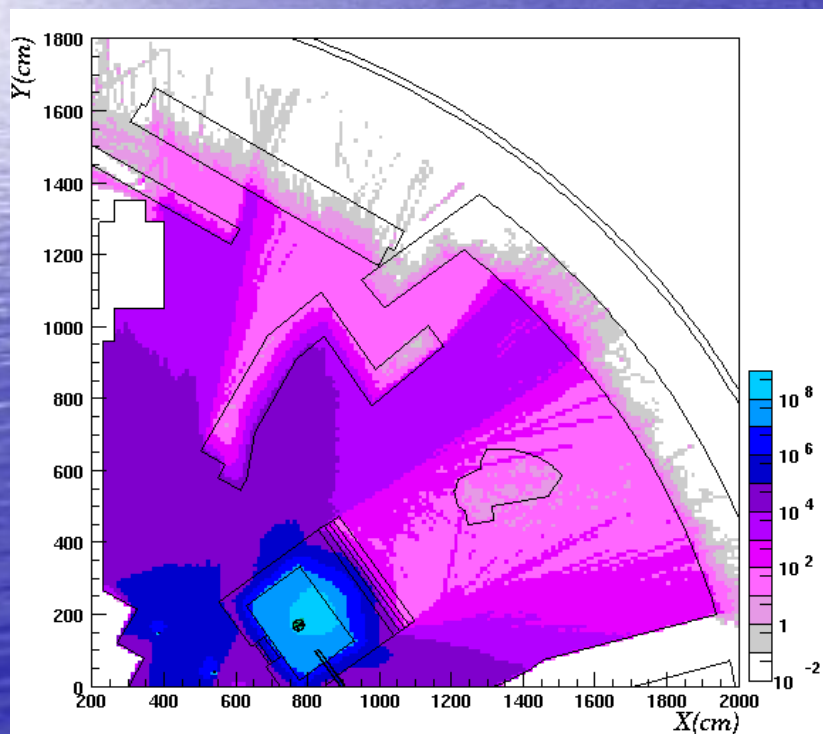
## Reconstitution de la géométrie pour FLUKA



# Parades (13/19)

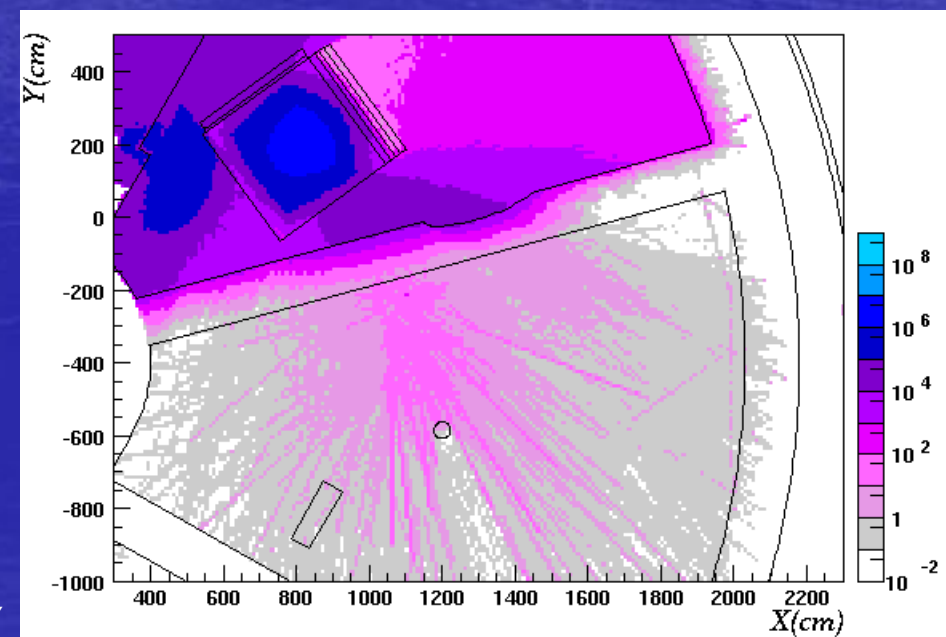
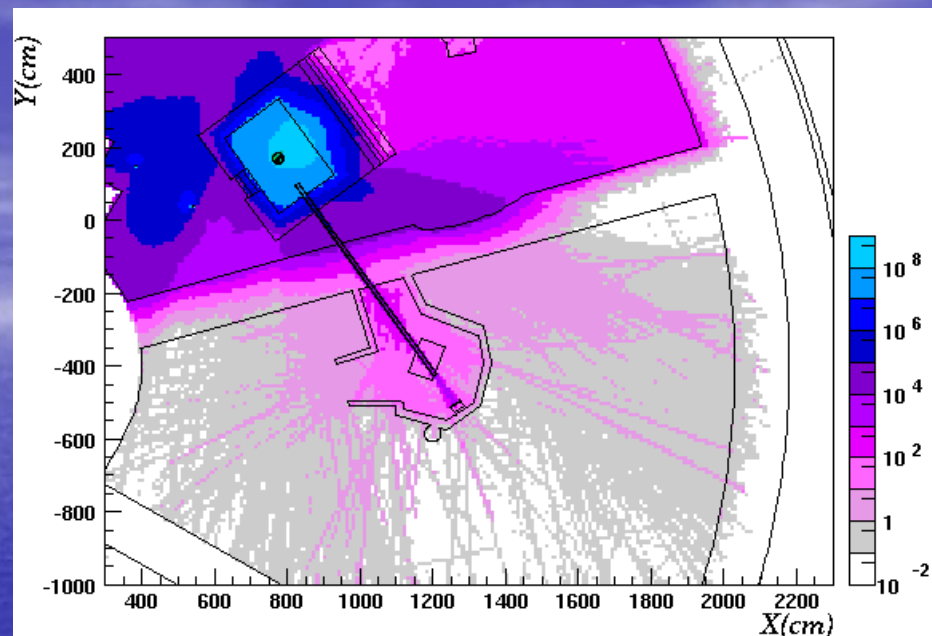
Prévisions sur 10 cycles  
de 15 000 000 de particules

Salle 210-310

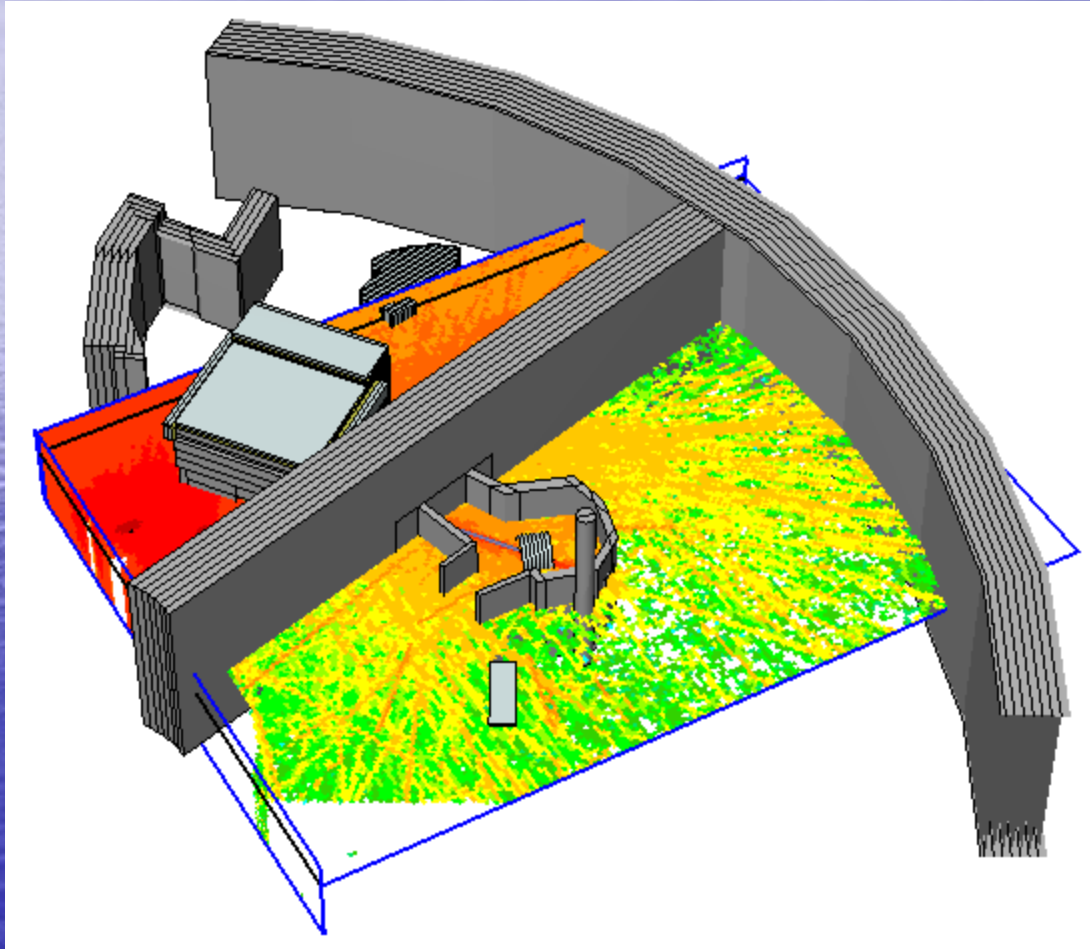


Salle 110, zone POLAREX

Salle 110, lignes de physique



# Parades (14/19)



Autre utilitaire de  
représentation graphique

# Parades (15/19)

## Evolution de l'installation

Avant les électrons



Après :  
environ 230 t  
de blindage local





# Parades (16/19)

## Outils de surveillance en continu des installations

- Toute ouverture de porte non voulue,
- Tout dépassement de seuil préréglé,
- Toute anomalie dans un des maillons de la chaîne de sécurité,



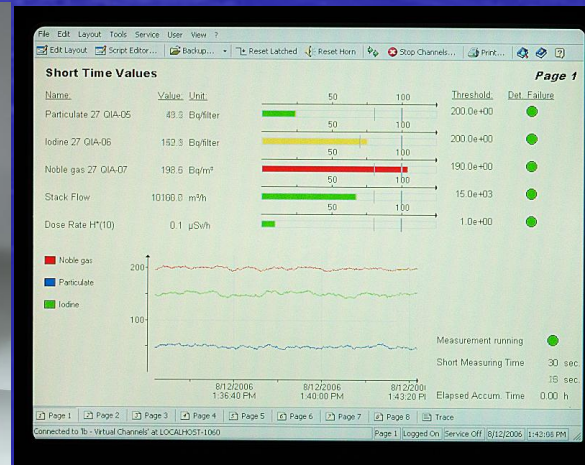
**Arrêt instantané du faisceau**



**Balise  $\gamma$**

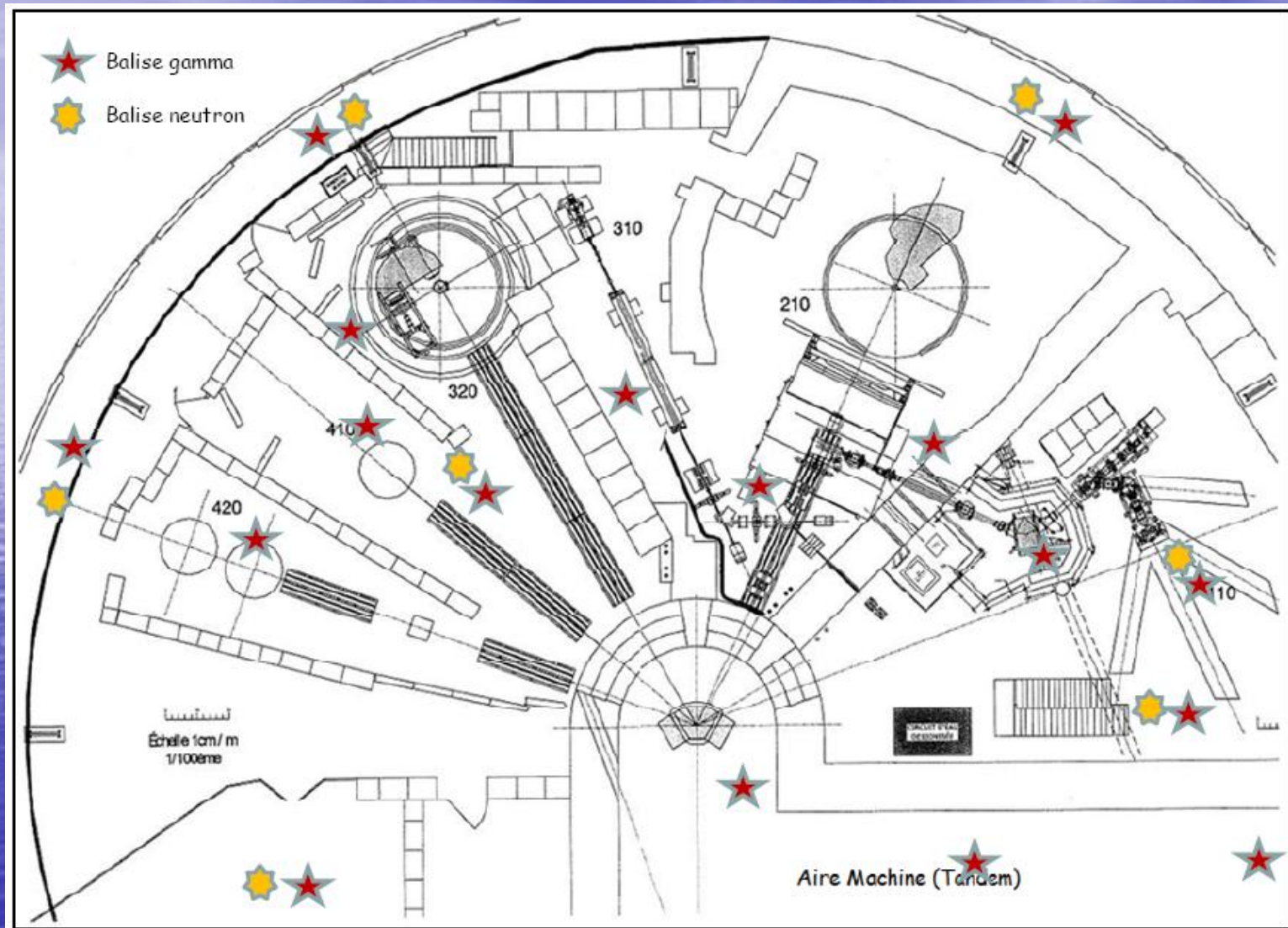


**Balise n**



**Ensemble de contrôle**

# Parades (17/19)



Implantation du nouveau système de surveillance sur ALTO

### Dès accès en ZS minima : port de la dosimétrie passive IPN ORSAY → RPL



Cette technique est basée sur le principe de quantification d'une émission de lumière. Cette luminescence est induite par un détecteur en verre contenant des impuretés (argent), préalablement exposé aux rayonnements ionisants, et après excitation optique avec un faisceau laser UV (320nm). La luminescence est proportionnelle à la dose absorbée. Ce détecteur est contenu dans un système de filtration offrant 5 plages de lecture et permettant la mesure des équivalents de dose Hp(10) et Hp(0,07) dans des champs de rayonnements photons, bêta et X.



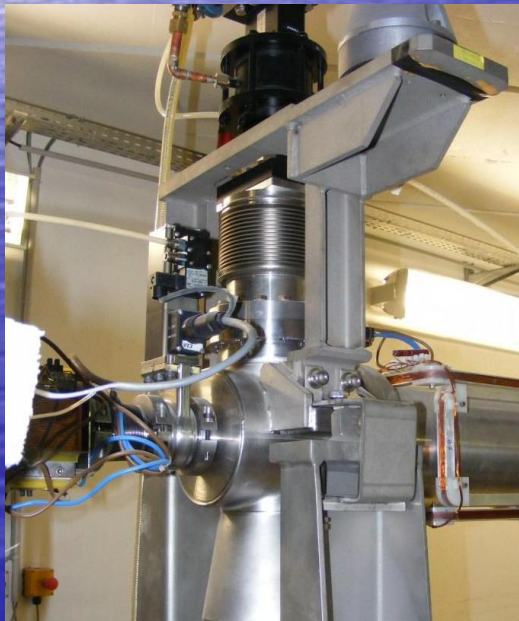
### Dès accès en ZC minima : port de la dosimétrie active IPN ORSAY → DMC2000XB et GN

Lecture directe de la dose ou débit de dose avec alarme sonore pré-réglée.

# Parades (19/19)

## Les opérations de maintenance :

- importance du choix des matériaux\* optimisant l'activation ;
- utilisation de raccords rapides, de brides, pour optimiser le temps ;
- prévoir l'utilisation d'un blindage local mobile pour optimiser le risque à la source ;
- dans les cas les plus sévères prévoir de la télé-opération (accélérateur de puissance, utilisation de flux de neutrons intenses ;
- limiter le matériel présent dans les zones les plus irradiantes (bunker d'ALTO).



\* : collimateurs, déflecteurs, arrêts faisceau,...



## **Sources et remerciements :**

- **division accélérateur IPN Orsay ;**
- **site ATSR, présentation M. AMMERICH ;**
- **site LA RADIOACTIVITE.COM coréalisé avec la participation de l'IN2P3 ;**
- **site du CERCA LEA ;**
- **site de BERTHOLD FRANCE ;**
- **guide pratique  
« Radionucléides&Radioprotection » ;**
- **CD OMIRIS, Outil Multimédia d'Information sur les Rayonnements Ionisants et la Santé.**