



# TUTORIALE

## COMMENT FAIRE UNE MESURE EN RADIOPROTECTION ?

OU

## DE L'INCERTITUDE DE LA MESURE



Radioprotection cirkus

# SOMMAIRE



**Rappels physiques**

**Rappels réglementaires**

**Mesure de dose et de débit de dose**

**Mesures de contamination**

Je ne pourrais pas être exhaustif, tant il y a d'appareils à votre disposition pour faire les mesures. J'espère que nos amis constructeurs ne m'en voudront pas si je ne présente pas l'ensemble des catalogues !

Mais plusieurs questions qui vont se poser à vous :



énergie atomique • énergies alternatives

Qu'est ce que je veux mesurer ?

Une dose, un débit de dose, une activité ?

Quels sont les rayonnements qui vont être émis ?

Alpha, bêta, X, gamma, neutrons ,

Simple ou multiples ?

Cela passe donc par un peu de radioactivité et la connaissance des radionucléides ou des sources de rayonnements.

Et puis par un peu de connaissances sur les interactions rayonnements-matière.



# RAPPELS PHYSIQUES



## Rayonnements particuliers

Tissus mous :  $\alpha = 0,07$  mm  $\beta = 10$  mm

## Rayonnements électromagnétiques

**ARRÊT**

**ATTÉNUATION  
en nombre**

Déplacement d'électrons (charge électrique) et  
possibilité de rayonnements secondaires

**Ionisation**

**Excitation**

**Freinage**

interne

externe

noyau

**Photoélectrique**

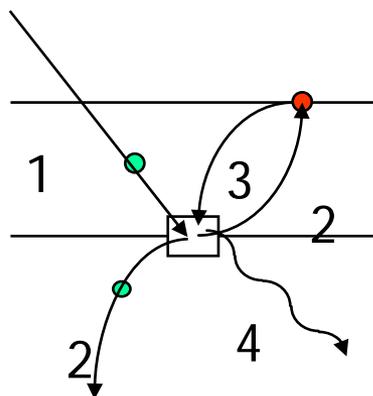
**Compton**

**Matérialisation**

Neutrons : particules avec un comportement proche  
des rayonnements électromagnétiques



# Principaux détecteurs

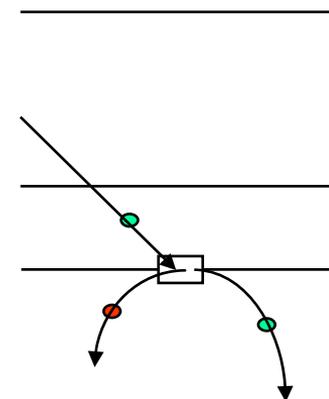


EXCITATION

couches  
électroniques  
plutôt externes

Émission  
photon lumineux

**DÉTECTEURS À SCINTILLATIONS**  
photomultiplicateur



IONISATION

couches  
électroniques  
plutôt internes

**DÉTECTEURS À GAZ**  
3 familles  
CI, CP, GM

# Principaux détecteurs



DÉTECTEURS À SEMI CONDUCTEURS

EX : DIODE SILICIUM

IONISATION

DÉTECTEURS RADIOTHERMOLUMINESCENTS

EX : FLi, OSL

EXCITATION

DÉTECTEURS RADIOPHOTOLUMINESCENTS

EX : Verres remplaceront les films

EXCITATION

ÉMULSION PHOTOGRAPHIQUE

IRSN : ARRET DE LA PRODUCTION EN 2007

IONISATION

# Electronique associée

## Les unités électroniques

préamplificateur

amplificateur

discriminateur (calibration et mise en forme)

sélecteur monocanal (deux discriminateurs  $\neq$  seuils)

sélecteur multicanaux (n sélecteurs monocanaux)

Dénombrement

Échelle de comptage

maîtrise du temps de comptage

statistique

contamination surfacique

Ictomètre

mesure du taux de comptage

Fonctionnement en courant

Moyenne des impulsions

débit d'équivalent de dose

## Qualification des matériels

### Au niveau international et national

La plupart des appareils répondent à des normes.

En France, certains matériels ont une homologation à ces normes prononcée par le centre technique d'homologation de l'instrumentation en radioprotection.

Le CTHIR dépend de l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. Il est basé sur le centre CEA de Saclay.



# RAPPELS RÉGLEMENTAIRES

## Contrôle d'ambiance



énergie atomique • énergies alternatives

Article R. 4451-30

Afin de permettre l'évaluation de l'exposition externe et interne des travailleurs, l'employeur procède ou fait procéder à des contrôles techniques d'ambiance.

Ces contrôles comprennent notamment :

1° En cas de risques d'exposition externe, la mesure des débits de dose externe avec l'indication des caractéristiques des rayonnements en cause ;

2° En cas de risques d'exposition interne, les mesures de la concentration de l'activité dans l'air et de la contamination des surfaces avec l'indication des caractéristiques des substances radioactives présentes.

Lorsque ces contrôles ne sont pas réalisés de manière continue, leur périodicité est définie conformément à une décision de l'Autorité de sûreté nucléaire prise en application de l'article R. 4451-34. (périodicité mensuelle).

## Mesures générales

Art. R. 1333-7. - Pour l'application de l'article L. 1333-1, le chef d'établissement ou le chef d'entreprise est tenu de mettre à disposition de la personne physique, responsable direct de l'exercice d'une activité nucléaire, tous les moyens nécessaires pour atteindre et maintenir un niveau optimal de protection de la population contre les rayonnements ionisants, dans le respect des prescriptions réglementaires qui lui sont applicables... Etc.

En outre, il réceptionne et étalonne périodiquement les instruments de mesure et vérifie qu'ils sont en bon état et utilisés correctement.



# MESURES DE DOSE ET DE DÉBIT DE DOSE

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



énergie atomique • énergies alternatives

## Les Chambres d'ionisation



Mesurent les gamma les X et les bêta (plutôt forte énergie)

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



énergie atomique • énergies alternatives

exemple : BABYLINE



Chambre d'ionisation 515 cm<sup>3</sup>

Mesure un débit de dose  
0,1 mGy/h à 100 mGy/h

Estime H\* (10) (3)

Estime H' (0,07)

Réponse de 10 keV à 2 MeV

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



## Chambre d'ionisation

Mesures au contact "sous-estimée"

Volume : Avantage et inconvénient

Réponse indépendante de l'énergie

Mesures sous épaisseurs de référence :

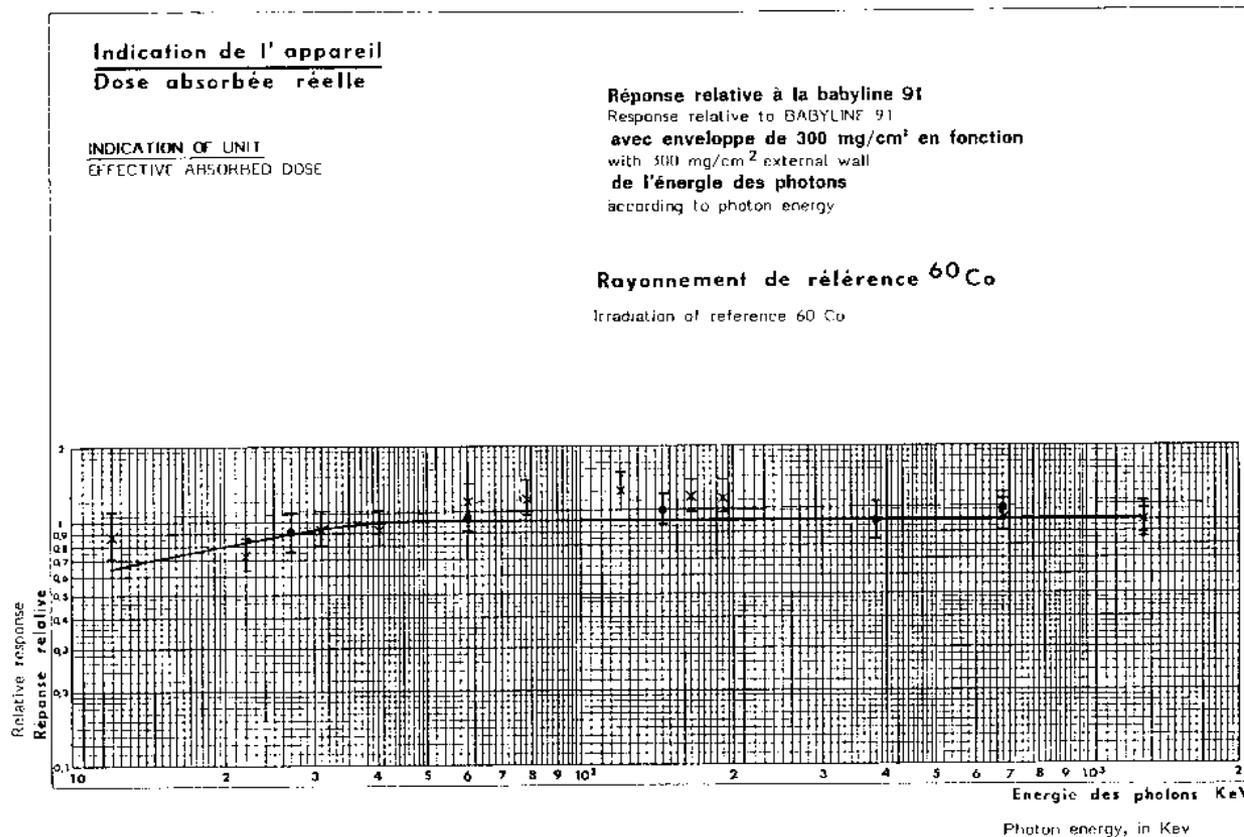
300 et 7 mg.cm<sup>-2</sup>

Anisotropie (importante si l'énergie est faible)

**Certains matériels ont une HOMOLOGATION CTHIR**

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE

## Linéarité à partir de 60 keV



# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE

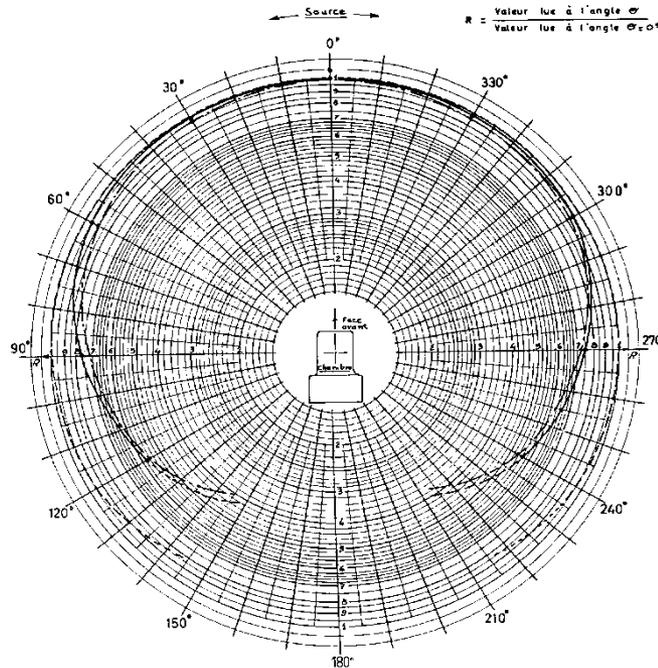
## Anisotropie (importante si l'énergie est faible)



energie atomique • energies alternatives

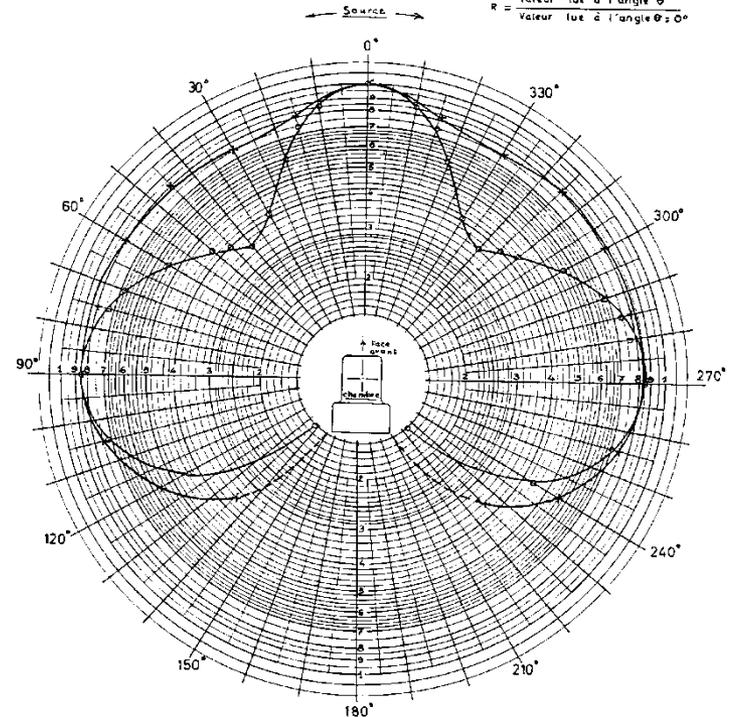
$$R = \frac{\text{Valeur lue en } \theta \text{ angle}}{\text{Valeur lue en } \theta = 0^\circ \text{ angle}}$$

$$R = \frac{\text{Valeur lue en } \theta \text{ angle}}{\text{Valeur lue en } \theta = 0^\circ \text{ angle}}$$



ISOTROPIE DE LA BABYLINE 91

<sup>90</sup>Sr Energie γ 1.17 MeV avec ou sans enveloppe 200 mg/cm<sup>2</sup> - - - - -  
<sup>90</sup>Sr Energie γ 0.33 MeV sans enveloppe 200 mg/cm<sup>2</sup> - - - - -  
<sup>241</sup>Am Energie γ 0.056 MeV avec enveloppe 200 mg/cm<sup>2</sup> - - - - -  
 sans enveloppe 200 mg/cm<sup>2</sup> - - - - -  
 (Document CIA)



ISOTROPIE DE LA BABYLINE 91

<sup>76</sup>Ge Energie γ 0.019 MeV avec enveloppe 330 mg/cm<sup>2</sup> - - - - -  
 sans enveloppe 330 mg/cm<sup>2</sup> - - - - -  
 (Document CEA)

## MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



énergie atomique • énergies alternatives

Mesure au contact

Babyline : 14  $\mu\text{Gy}/\text{h}$

Dosimètre Fli : 1  $\text{mGy}/\text{h}$

A 30 cm : 1  $\mu\text{Gy}/\text{h}$



# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



## Les Geiger-Müller compensés



Mesurent les gamma

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



Exemple : 6150 AD6



Geiger-Müller compensé

Mesure  $H^*$  (10)

1  $\mu\text{Sv/h}$  à 1 Sv/h

selon le détecteur utilisé

Réponse de 60 keV à 1,3 MeV  
pas parfaitement linéaire

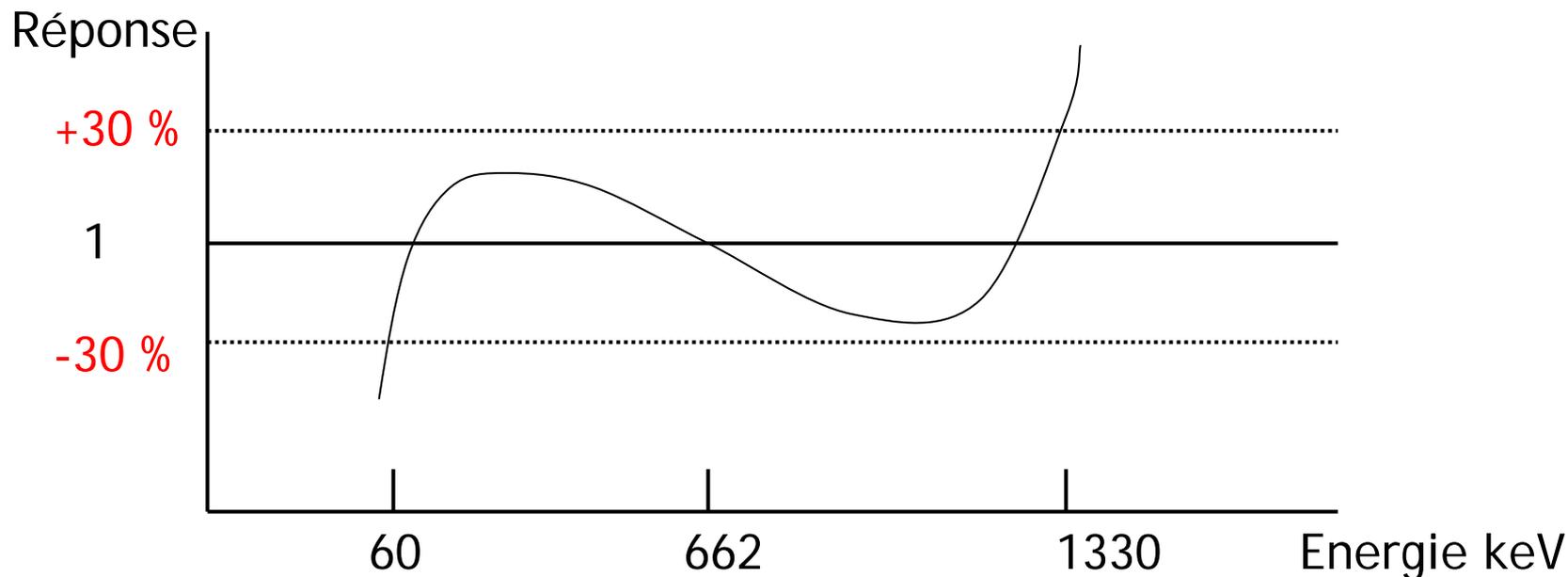
# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



energie atomique • energies alternatives

## Limites de mesure

Allure de la courbe de réponse d'un Geiger-Müller compensé. En dehors de la validité en dessous de 60 keV et au-dessus de 1,3 MeV



# MESURE DU DÉBIT DE DOSE

## « incertitude » de mesure entre deux appareils

Le 2 février 2007, le CEA xxx a fait transporter des poubelles de décroissance vers le CEA yyy.

Au départ les mesures de radioprotection étaient de :

Contact colis 0.65 mSv/h

1 m du colis 0.08 mSv/h, donnant un IT de 8

Appareil utilisé : Babyline 81

A l'arrivé à yyy les mesures de radioprotection étaient de :

Contact colis 0.9 mSv/h

1 m du colis 0.13 mSv/h, donnant un IT de 13

Appareil utilisé : AD 6

# MESURE DU DÉBIT DE DOSE

« incertitude » de mesure entre deux appareils



energie atomique • energies alternatives

Le référentiel de l'installation de réception prévoit que les colis ne peuvent être acceptés que si le DeD à 1m est inférieur ou égal à 0.1 mSv/h. En conformité avec ce référentiel, le colis a été refusé et renvoyé au CEA xxx où les mesures de radioprotection d'arrivée ont été effectuées :

Contact colis 0.8 mSv/h

1 m du colis 0.09 mSv/h, donnant un IT de 9

Appareil utilisé : Babyline 81

Qui détient la vérité ?

Radionucléide : cobalt 60

# MESURE DU DÉBIT DE DOSE

« incertitude » de mesure entre deux appareils



Qui détient la vérité ?

Radionucléide : cobalt 60

Les deux appareils donnent les valeurs selon leurs courbes de réponse. Il suffit de constater qu'il y a une sur estimation du débit de dose pour le Geiger-Müller compensé pour constater que l'on a en fait la même mesure.

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



énergie atomique • énergies alternatives

## Les compteurs proportionnels - exemple FH40



Mesure l'équivalent de dose ambient  
 $H^*$  (10)

0.5  $\mu\text{Sv/h}$  à 100 mSv/h

Réponse de 30 keV à 4 MeV

Existe version bas bruit de fond

Mesurent les gamma et les X

# MESURE DU DÉBIT DE DOSE

## Comparatif entre deux appareils



energie atomique • energies alternatives

Lors du contrôle mensuel, on place la même source de Co-60 (donc pas de problème de détection d'aucun des appareils) au contact de chaque appareil et on note environ 5  $\mu\text{Sv/h}$  pour le 1<sup>er</sup> (compteur proportionnel) et environ 17  $\mu\text{Sv/h}$  pour le 2<sup>e</sup> (GM compensé), soit 70 % d'écart.

Qui détient la vérité ?

Radionucléide : cobalt 60

# MESURE DU DÉBIT DE DOSE

« incertitude » de mesure entre deux appareils



Qui détient la vérité ?

Radionucléide : cobalt 60

Les deux appareils donnent les valeurs selon le volume de leur détecteur (homogénéité au niveau du volume de détection) et la distance à laquelle il se trouve par rapport au point en contact avec la source.

On doit avoir, en fait, la même mesure.

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



energie atomique • énergies alternatives

## Les scintillateurs



Mesurent les gamma et les X

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE

cea

énergie atomique • énergies alternatives

Exemple : AT1123



Scintillateur plastique

Mesure H\* (10)

1  $\mu$ Sv/h à 10 Sv/h (!)

Gamme d'énergie : 15 keV - 10 MeV

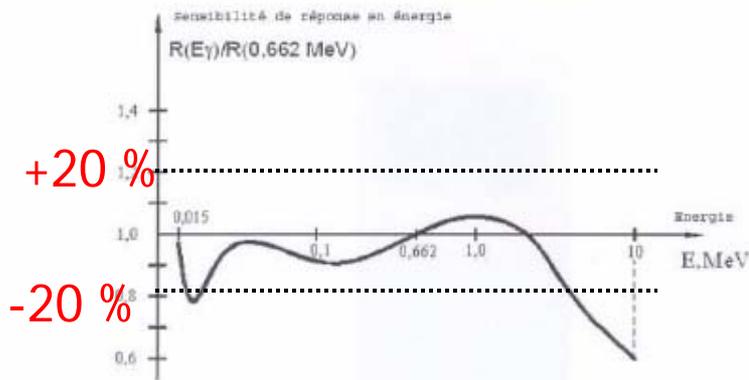
Réponse très rapide

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE

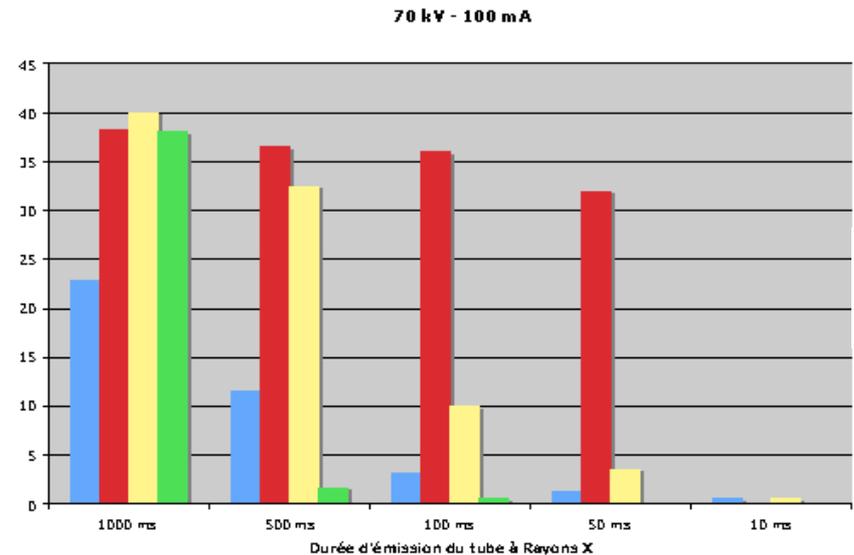
## Réponse en énergie



Annexe A : Réponse énergétique relative du radiamètre par rapport l'énergie du rayonnement (Réf : Cs137 : 662 keV)



## Temps de réponse



# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



Reste des questions :

Mesure des débits de dose oui ! Mais la réglementation précise aussi

**Profondeur, peau, cristallin**

Choix des appareils pour de plus faibles profondeurs

Choix des appareils pour de faibles débits de dose.



# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



Pour ceux qui auraient des neutrons...

Appareillage très technique  
D'où leur coût



# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



Reste des questions :

Difficile de connaître, sur le terrain, l'énergie des neutrons

**(la neutronique, c'est un métier !)**

Faire une mesure sans spectre de référence (neutrons rapides, thermiques ...) comporte un risque d'erreur

Comment réaliser un étalonnage type des appareils ?

# MESURE DE LA DOSE ABSORBÉE et DU DÉBIT DE DOSE



## Précautions d'emploi pour tous les détecteurs

Mise en fonctionnement quelques minutes avant la mesure

Evaluation du bruit de fond (mesure en l'absence de toute radioactivité)

Attention aux chocs



# MESURES DE CONTAMINATION SURFACIQUE

# MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE



energie atomique • energies alternatives

ECM 21

Échelle de Comptage

associés à différentes sondes

maîtrise du temps de comptage



MIP 10

Mini Ictomètre Portatif

mesure un taux de comptage



## DE NOUVEAUX MATÉRIELS



- Généraliste: SABG-15 G-M Pancake 15 cm<sup>2</sup>



- Gamma sensibilité moyenne: SG-1R
  - 1"x1" NaI(Tl) - 200 µSv/h maximum



- Gamma sensibilité élevée: SG-2R
  - 2"x2" NaI(Tl) - 50 µSv/h maximum



- Alpha petite surface: SA-20
  - ZnS 20 cm<sup>2</sup>

- Bêta petite surface: SB:20
  - Plastique fin 20 cm<sup>2</sup>



- Alpha grande surface: SA-100
  - ZnS 100 cm<sup>2</sup>

- Bêta grande surface: SB-100
  - Plastique fin 100 cm<sup>2</sup>

**Attention  
aux fenêtres  
des  
compteurs !**

# MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE



## Sonde X

Détection  $E_{\min} > 5 \text{ keV}$

Détection  $E_{\max} : 200 \text{ keV}$

## Sonde bêta GM

dite sonde bêta mous

Geiger-Müller

## Conseils et limites d'utilisation

Sensible à d'autres rayonnements  
Détection de sources émettant des  
gamma à distance

Utile pour les sources en médecine  
nucléaire

Utile pour les sources dans les INB

Sensible à TOUS les autres  
rayonnements (sonde à tout  
faire)

Attention aux forts taux de  
comptage (temps mort)

Durée de vie

# MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE



energie atomique • energies alternatives

## Tableau récapitulatif pour l'utilisation pratique des sondes

Sonde	Appellation	Type de compteur	Rayonnements détectés	Sensibilité aux autres rayonnements	Mouvement propre
alpha	SA	SZn	$\alpha$	-	1 à 2 imp/min
bêta faible énergie	SBM	Compteur Geiger-Müller	$\beta$ $E_{\beta\max} > 50 \text{ keV}$	Tous les autres	1 à 2 imp/s
bêta	SB	Scintillateur plastique	$\beta$ $E_{\beta\max} > 200 \text{ keV}$	X et $\gamma$	1 à 2 imp/s
X	SX	Nal mince (2mm)	X et $\gamma$	$\beta$ (électrons)	10 à 20 imp/s
gamma	SG	Nal épais (2 cm)	$E_{\gamma} > 200 \text{ keV}$	-	20 à 40 imp/s

# MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE



energie atomique • energies alternatives



## MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE



energie atomique • energies alternatives

Compteur proportionnel à gaz  
Fenêtre : surface 12 cm x 19 cm  
Pas de Rendement mais possibilité  
lecture  $i.s^{-1}$  ou  $Bq.cm^{-2}$  !

(facteur de conversion)  
(quel est l'étalon ?)

Fenêtre en mylar :  $2 mg.cm^{-2}$   
Détection bêta



Détecteurs : Scintillateur plastique  
Surface de détection : 200 cm<sup>2</sup>  
à 300 cm<sup>2</sup>

Affichage : Cps, Bq, Bq/cm<sup>2</sup>

Bibliothèque : 20 radionucléides

Exemples de rendements moyens pour  
des sources de 100 cm<sup>2</sup> :

$^{14}C$  » 14 %

$^{60}Co$  » 23 %

$^{241}Am$  (a) » 22%

$^{241}Am$  (a, b) » 40%

$^{90}Sr/^{90}Y$  » 50 %



# MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE



energie atomique • energies alternatives

**Ce qu'il ne faudrait pas faire !**



**Cherchez l'erreur**

# MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE

## Cas du tritium

Mesure directe impossible avec des détecteurs.  
Mesure indirecte avec un frottis et comptage par scintillation liquide



# MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE



energie atomique • energies alternatives

Reste des questions :

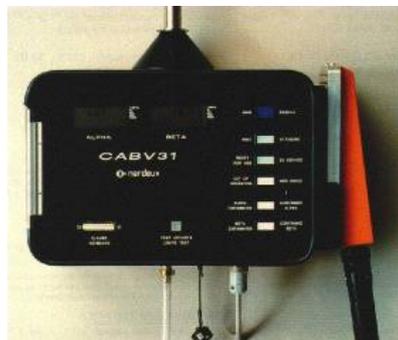
La connaissance des formes physico-chimique n'est pas toujours évidente

(gaz, vapeur, OBT)

# MESURE DE LA CONTAMINATION CORPORELLE



Les mains et les pieds c'est bien...



OU



Ne pas oublier les vêtements !



# MESURES DE CONTAMINATION ATMOSPHERIQUE

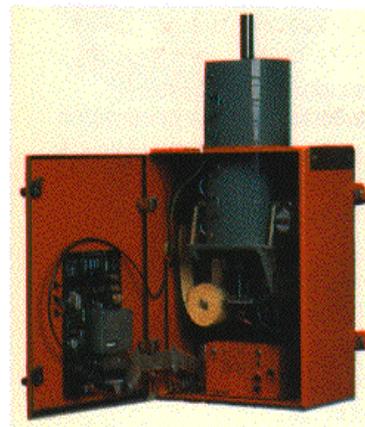
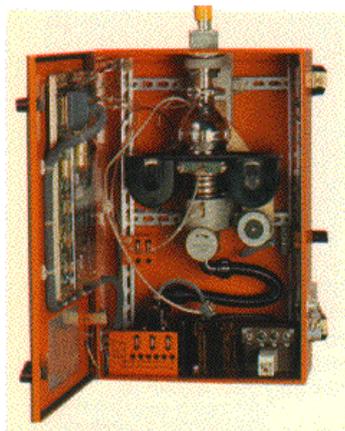
# MESURE DES AÉROSOLS ET DES GAZ



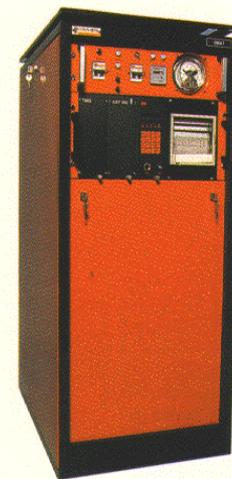
energie atomique • énergies alternatives



Prélèvement  
sur filtre



Moniteurs de  
contamination  
atmosphérique



Chambres  
différentielles

**Matériel fait pour les installations nucléaires !**

## MESURE DES AÉROSOLS



energie atomique • energies alternatives

Mesure de l'exposition interne

Mesure de l'activité volumique

Appareil de Prélèvement Atmosphérique

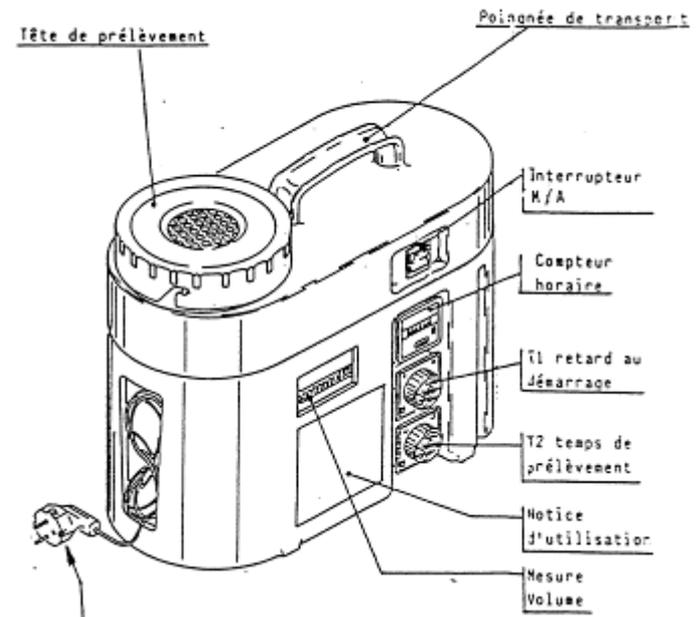
Prélèvement sur filtre fixe

Débit :  $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Utilisation pendant les heures de travail

Cartouche charbon pour les iodes

Comptage et résultats à postériori



## MESURE DES AÉROSOLS



energie atomique • energies alternatives

Mesure de l'exposition interne

Mesure de l'activité volumique

Appareil de Prélèvement Atmosphérique

Prélèvement sur filtre fixe

À fort débit

Exemple :  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Pour les situations d'incidents

Comptage et résultats

à postériori



## MESURE DE LA CONTAMINATION ATMOSPHÉRIQUE



Ne pas oublier :

Prendre en compte la décroissance du radon et ses descendants

Comment va évoluer l'activité sur le filtre :

$A_0$  l'activité initiale de chaque descendant

L'activité totale déposée sera donc celle du polonium 218 plus celle du plomb 214 plus celle du bismuth 214. Les autres descendants n'intervenant pas. Le plomb 210 a lui une période trop longue.

Soit donc une activité totale égale à  $A_0 \times 3$  (en supposant encore une fois que le facteur d'équilibre est de 1)

On obtient le centième de l'activité initiale au bout de 140 minutes

On obtient le millième de l'activité initiale au bout de 222 minutes (excellent moyen mnémotechnique)

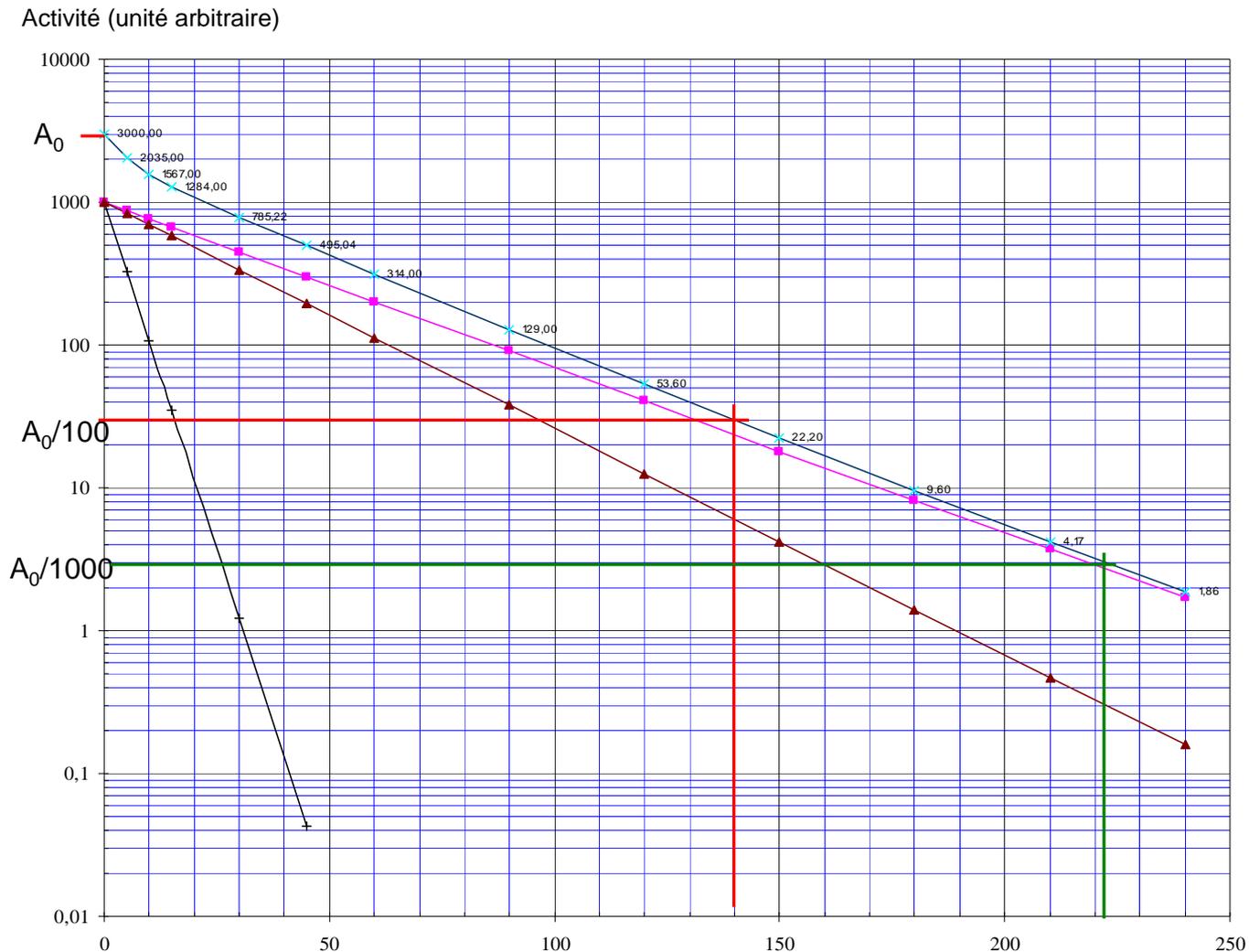
En affinant cela donne une pseudo période égale à 22,5 minutes

# MESURE DE LA CONTAMINATION ATMOSPHÉRIQUE

Décroissance des descendants du radon



energie atomique • energies alternatives



Bleu = A totale  
 Noir = A Po218  
 Rose = A Pb214  
 Marron = A Bi214

## MESURE DES GAZ

### Mesure TRITIUM

Autres gaz détectés : Kr85, Xe133, C14, ...

limite de détection : 2500 Bq/m<sup>3</sup>

mesure différentielle





# LES CORRECTIONS À APPORTER AUX COMPTAGES

# LES CORRECTIONS A APPORTER AUX COMPTAGES



Pour les appareils donnant des taux de comptage, pour passer à une **activité**, il faut effectuer les corrections suivantes :

La perte au comptage : temps de résolution

Le bruit de fond

Le rendement de mesure

## LA PERTE AU COMPTAGE TEMPS DE RÉOLUTION



$$n_v (\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}) = \frac{n_c (\text{imp} \cdot \text{s}^{-1})}{1 - n_c \tau (\text{s})}$$

Exemple

Compteur Geiger-Müller  $\tau = 100 \mu\text{s}$

Si  $n_c = 500 \text{ imp} \cdot \text{s}^{-1}$

$n_v = 526 \text{ imp} \cdot \text{s}^{-1}$

## LA PERTE AU COMPTAGE BRUIT DE FOND

Exemple  $n_{\text{net}} = n_v - n_{\text{bdf}}$

Compteur Geiger-Müller

$n_{\text{mp}} = 2 \text{ imp} \cdot \text{s}^{-1}$

$n_{\text{net}} = 526 - 2 = 524 \text{ imp} \cdot \text{s}^{-1}$

## LA PERTE AU COMPTAGE LE RENDEMENT DE MESURE



énergie atomique • énergies alternatives

C'est le paramètre le plus difficile à évaluer car il est fonction :

de la nature des rayonnements

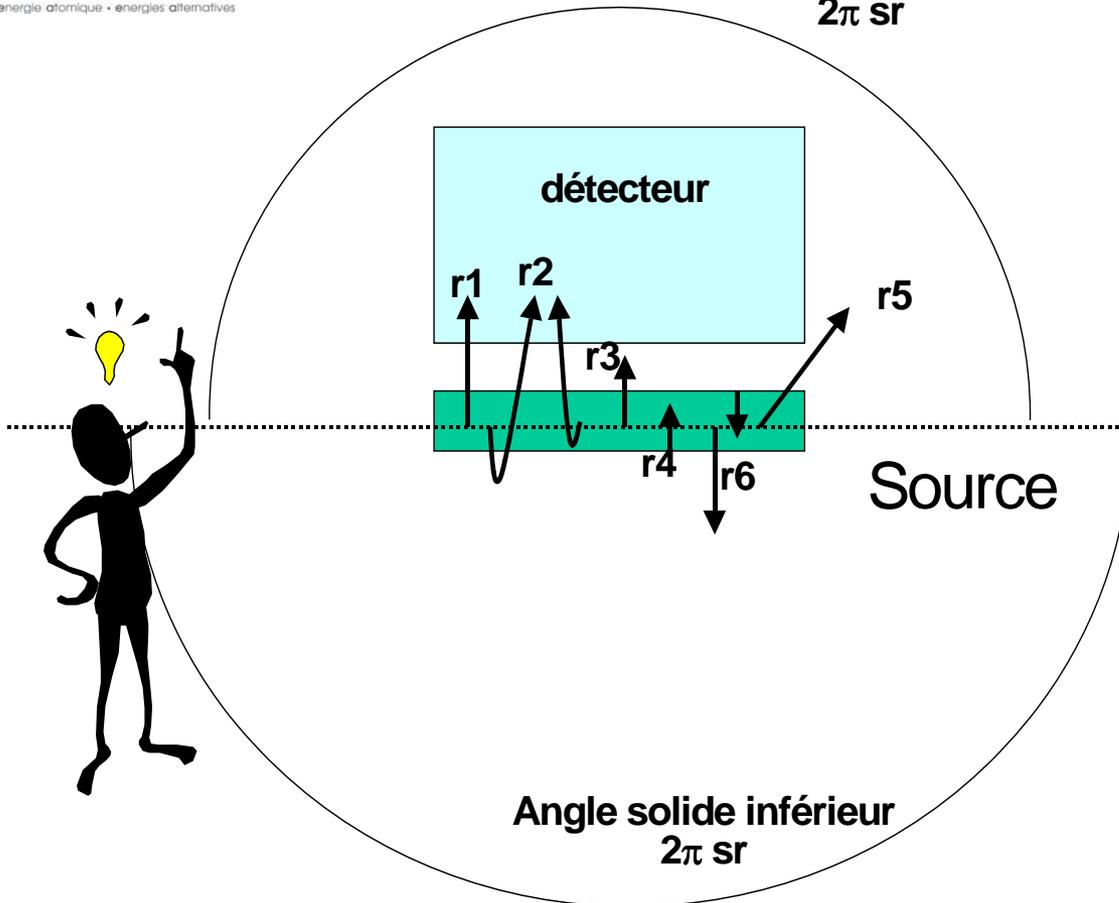
de la distance entre source radioactive et détecteur

de la nature du support

de la taille de la source radioactive

$$A \text{ (Bq)} = \frac{n \text{ (imp} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{R_{\text{global}}}$$

# LA PERTE AU COMPTAGE LE RENDEMENT DE MESURE



$$A = r1 + r2 + r3 + r4 + r5 + r6$$

$$q_{2\pi} = r1 + r2 + r3 + r5$$

$$\varepsilon_s = q_{2\pi} / A$$

$$\varepsilon_i = n / q_{2\pi}$$

$$I_i = n / r1 + r2$$

$\varepsilon_i$  = rendement de mesure  
donné par les constructeurs

$$A = n / \varepsilon_i \times 0,5$$

Cas des bêta



# QUE RETENIR ?

## QUE RETENIR

Il n'y a pas de bons ou de mauvais détecteurs, compteurs,... (au niveau professionnel bien entendu)

Il est nécessaire de définir parfaitement ce que l'on veut mesurer. Même si ce sont des appareils de terrain, cela reste des appareils fragiles (et relativement chers)

Tous les appareils doivent être périodiquement contrôlés et être également faire l'objet d'une vérification périodique de l'étalonnage selon une périodicité définie dans la réglementation.  
Ce sera la garantie de vos mesures.



Je vous incite à vous rendre sur les stands des constructeurs et à exprimer vos besoins, auprès de ceux qui sont absents.

**Société**

**Emplacement du siège**

ALGADE

Bessines sur Gartempe (Haute-Vienne)

APVL

Saint Cyr sur Loire (Indre et Loire)

ARIES

Chatillon (Hauts de Seine)

BERTHOLD

Thoiry (Yvelines)

CANBERRA

Montigny le Bretonneux (Yvelines)

CARMELEC

Perpignan (Pyrénées orientales)

MEDI TEST

Saclay (Essonne)

MIRION

Lamanon (Bouches du Rhône)

PREMIUM ANALYSE

Norroy le Veneur (Moselle)

SAPHYMO

Massy (Essonne)

SDEC FRANCE

Tauxigny (Indre et Loire)

PTW

Freiburg (Allemagne)

**MERCI DE VOTRE ATTENTION**



Radioprotection cirkus