



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

# Détecteurs à gaz

Benoît Sabot

# Ionisation des gaz

## Généralités

- ▶ L'interaction rayonnement-matière produit des électrons et de la chaleur:
- ▶ Rayonnement photonique (X ou  $\gamma$ ):
  - Effet photoélectrique (photoélectron)
  - Effet Compton (électron Compton)
  - Création de paires (électron et positon)
- ▶ Particules chargées ( $\alpha$ , électrons, ions lourds)
  - Ionisation directe et/ou création d'électrons secondaires
- ▶ Dans un gaz, les électrons créés peuvent exciter les molécules, produire des paires électron-ion... ou élever la température.

## Potentiel d'ionisation des gaz

**Création d'une paire électron / ion**

	Excitation potential [eV]	Ionization potential [eV]	Mean energy for ion-electron pair creation [eV]
H <sub>2</sub>	10.8	15.4	37
He	19.8	24.6	41
N <sub>2</sub>	8.1	15.5	35
O <sub>2</sub>	7.9	12.2	31
Ne	16.6	21.6	36
Ar	11.6	15.8	26
Kr	10.0	14.0	24
Xe	8.4	12.1	22
CO <sub>2</sub>	10.0	13.7	33
CH <sub>4</sub>		13.1	28
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		10.8	23

Energie moyenne :  $\cong 30$  eV

## Diffusion, transfert de charge et recombinaison

- ▶ A température et pression ambiante, mouvement Brownien des molécules de gaz (libre parcours moyen typique 10 nm-1  $\mu\text{m}$ )
- ▶ Diffusion des ions : profil gaussien d'écart-type  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{2Dt}$$

- ▶ D: coefficient de diffusion (théorie cinétique des gaz)
- ▶ Réactions entre électrons, ions et molécules de gaz:
  - Transfert de charge :  $X^+ + Y \longrightarrow X + Y^+$
  - Attachement électronique :  $e^- + X \longrightarrow X^-$
  - Recombinaison :  $e^- + Y^+ \longrightarrow Y$  (peu probable)  
 $X^- + Y^+ \longrightarrow X + Y$

## Causes de recombinaison

### ► Forte densité locale d'ions

- cas de forte irradiation

### ► Faible vitesse de dérive des ions vers les électrodes

- temps de transit de quelques dizaines de ms, même ordre de grandeur que la cinétique de recombinaison

### ► Les trajectoires suivent les lignes de champs, qui peuvent être compliquées aux extrémités

### ► Inhomogénéité du champ électrique

- zones mortes

## Mobilité des charges

$$v = \frac{\mu E}{P}$$

$v$  : vitesse ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$\mu$  : mobilité ( $\text{m}^2\cdot\text{Pa}\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$E$  : champ électrique ( $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ )

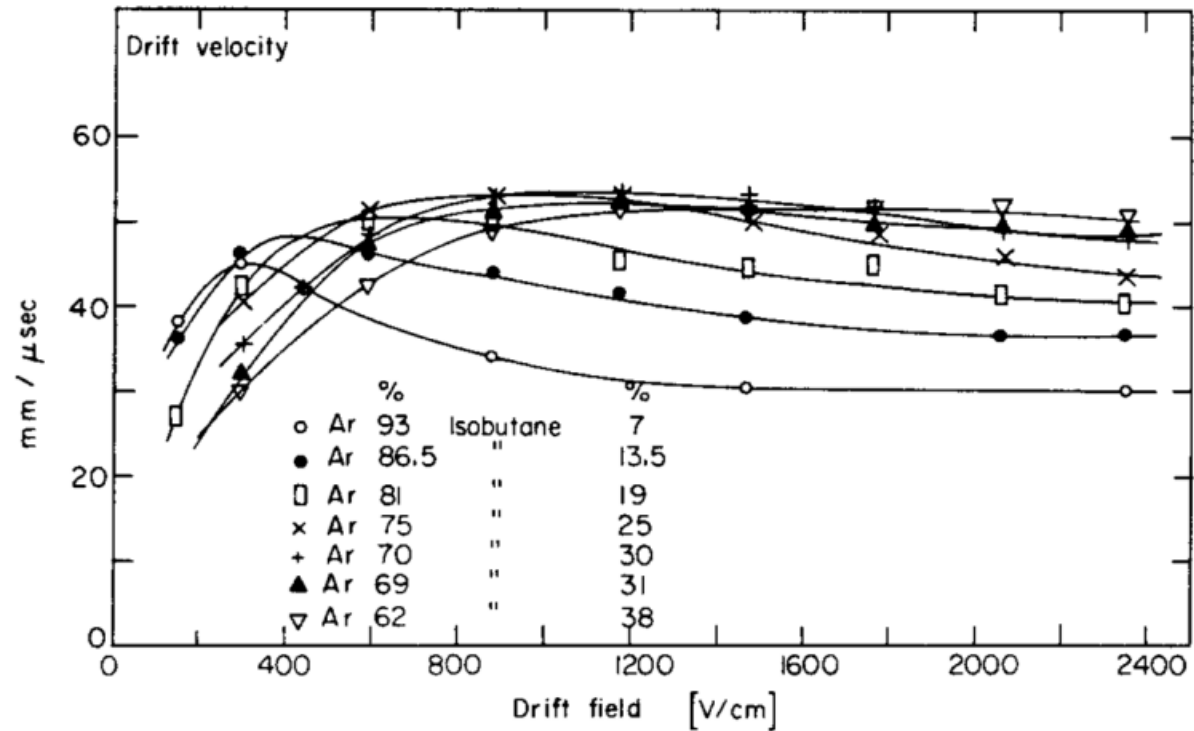
$P$  : pression (hPa)

### ► Ions

- $\mu \sim 10 \text{ m}^2\cdot\text{Pa}\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
- Application:  $V = 10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $P_{\text{atm}}$
- $v \sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Pour un compteur de 1 cm d'épaisseur : temps de transit des charges  $\sim 10 \text{ ms}$  (long !)

## Mobilité des charges

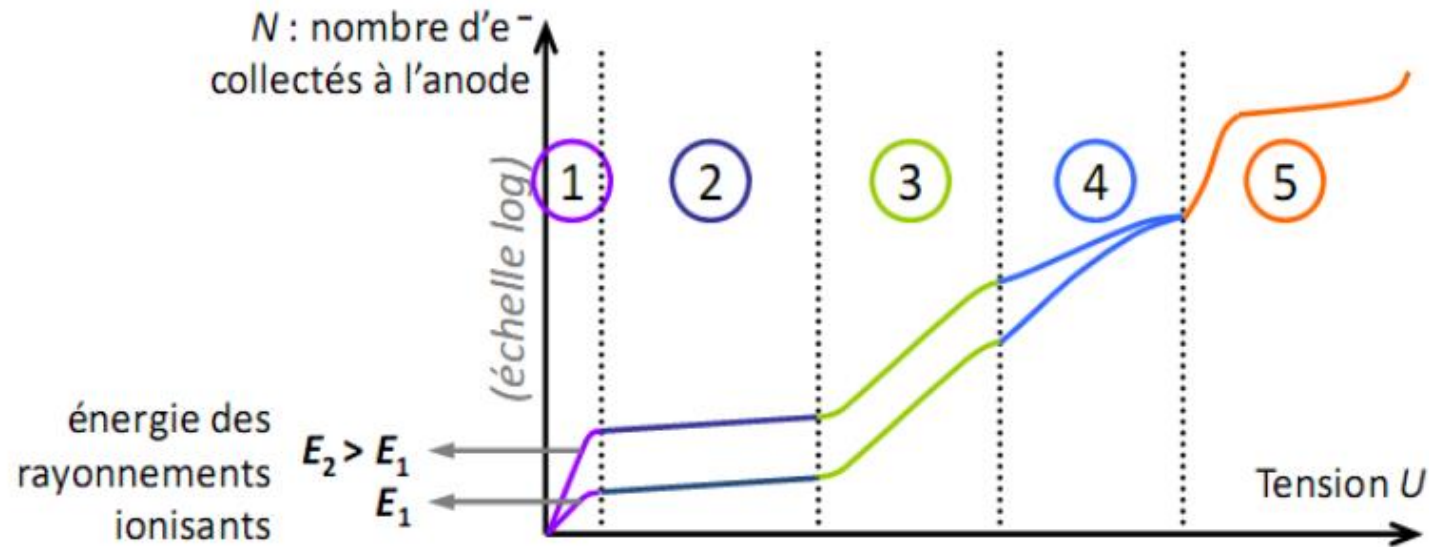
- **Electrons**,  $\mu$  1000 fois plus grand, temps de transit  $\sim 10 \mu\text{s}$



Vitesse des électrons dans Argon / Isobutane (Pression normale)



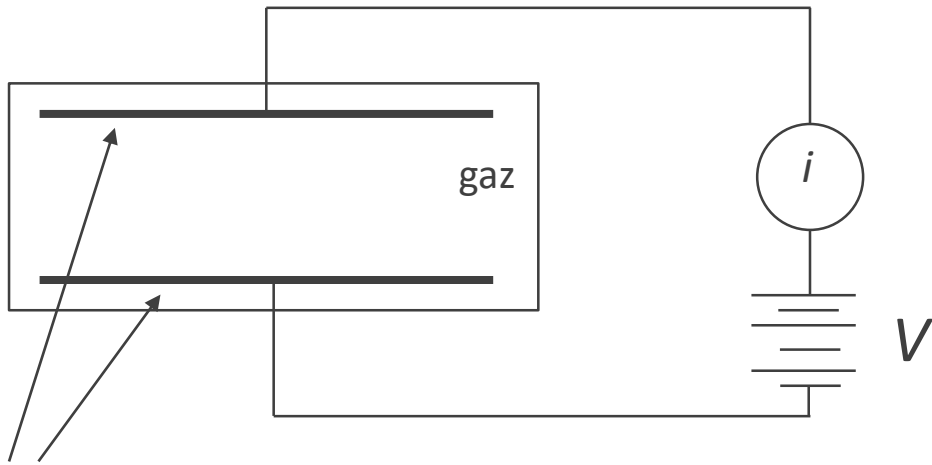
# Régime de fonctionnement



1	zone de recombinaisons ( $N$ augmente avec $U$ ) : de moins en moins de recombinaisons, de plus en plus de particules collectées aux électrodes
2	toutes les particules (ions et électrons) formées par ionisation primaire sont collectées : <b>chambre d'ionisation</b>
3	ionisations secondaires deviennent possibles : <b>compteur proportionnel</b>
4	ions formés $\Rightarrow$ écran autour de l'anode : compteur semi- proportionnel
5	chaque ionisation initiale déclenche ionisations secondaires en avalanche : <b>compteur Geiger-Müller</b>

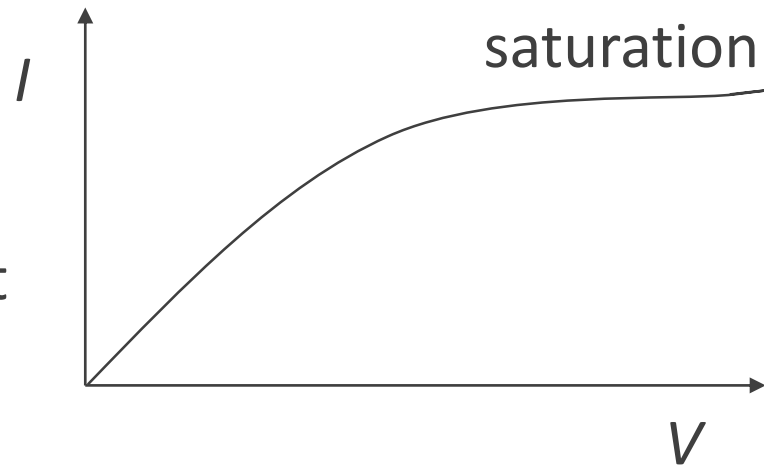
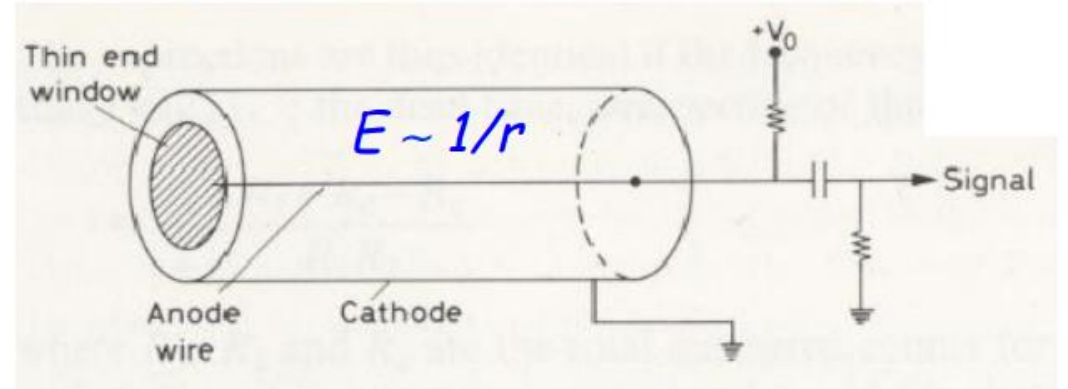
# Les détecteurs gaz – Chambre d'ionisation

## Chambre d'ionisation en mode courant

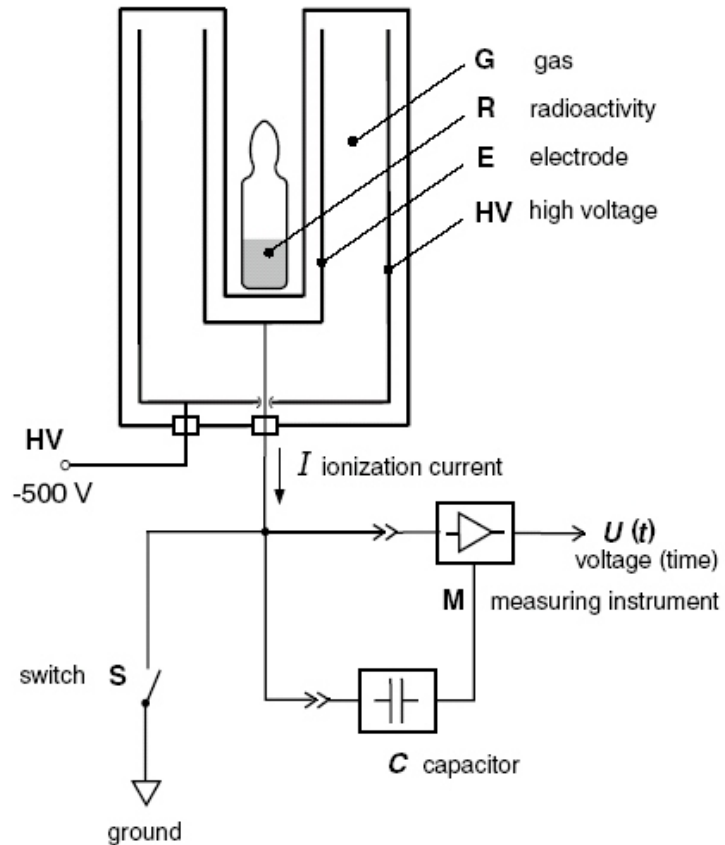


électrodes

Relation tension-courant



## Chambre d'ionisation (activimètre)

4 $\pi$  Ionization Chamber (IC)

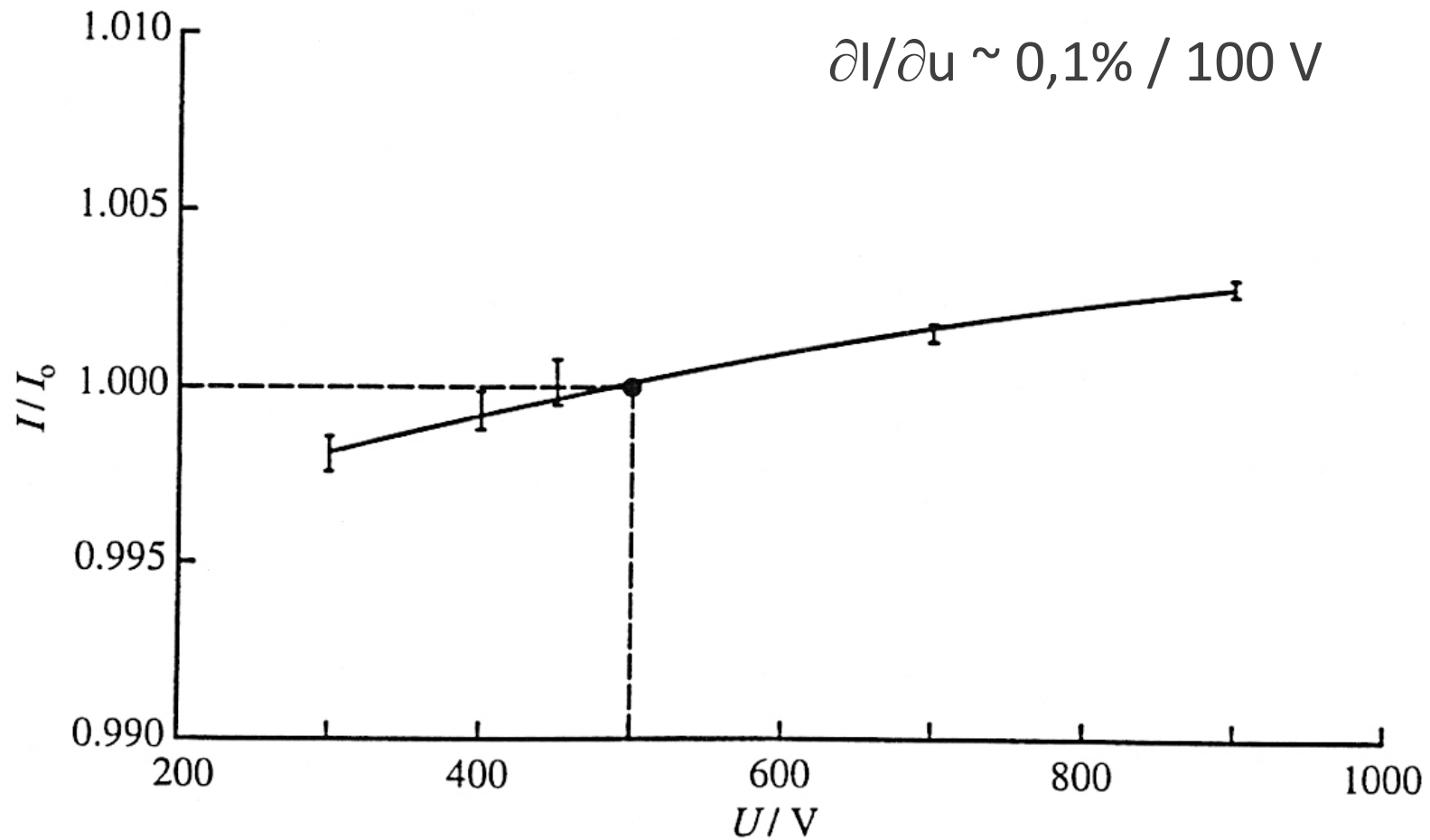
- ▶ Parois : acier, aluminium, laiton
- ▶ Gaz : argon, azote, méthane
  - $O_2$  est à proscrire (électronégatif, capte les électrons)
- ▶ Pression typique : 1-2 MPa (10 - 20 bars)
- ▶  $I = C \Delta U / \Delta t$
- ▶ Le rendement de détection dépend :
  - des matériaux,
  - de la tension de polarisation,
  - de l'homogénéité du champ électrique
  - de la pression du gaz

## Exemple d'activimètre



- ▶ Un activimètre est un système de mesure constitué des éléments suivants :
  - Une chambre d'ionisation à puits
  - Une alimentation haute tension stabilisée
  - Un électromètre pour la mesure de l'intensité du courant d'ionisation
  - Une électronique de calcul de l'activité
- ▶ Très utilisé dans le milieu médical pour mesurer l'activité de source radioactives liquides de volumes variables contenus dans des flacons ou des seringues ( $^{18}\text{F}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{201}\text{Tl}$  ...)
- ▶ De nombreux paramètres influencent la mesure

## Variation de la réponse avec la tension



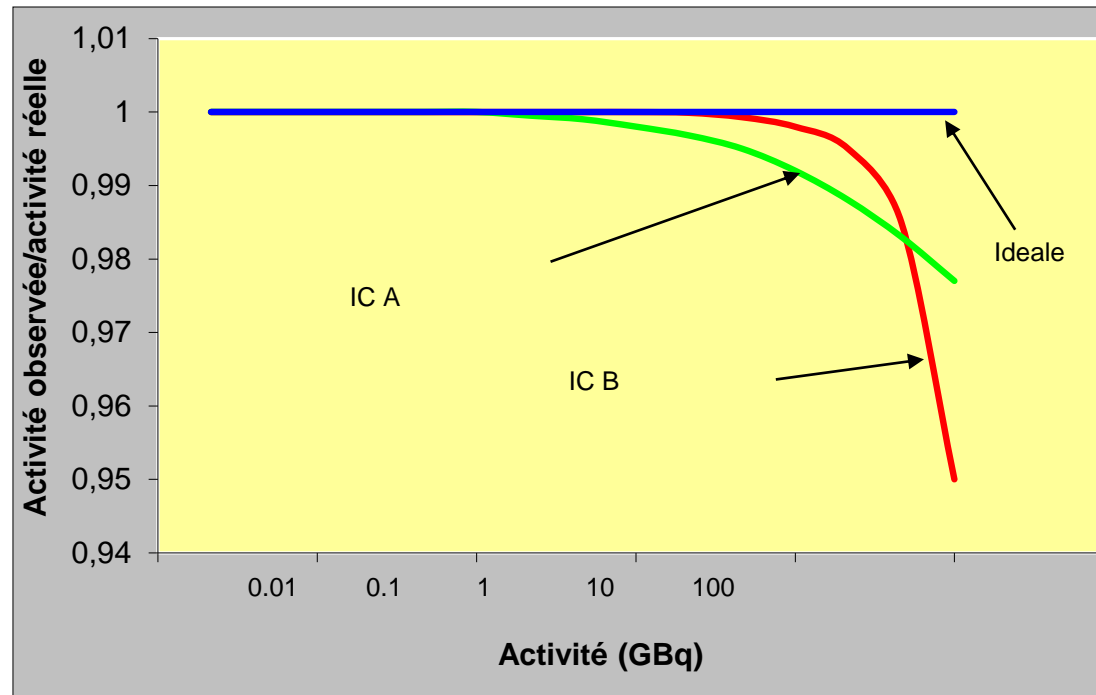
## Linéarité en fonction de l'activité

### ► Fortes activités

- forte densité locale de charges; effet d'écrantage du champs par charge d'espace; augmentation du nombre de recombinaisons

### ► Le rendement de détection diminue

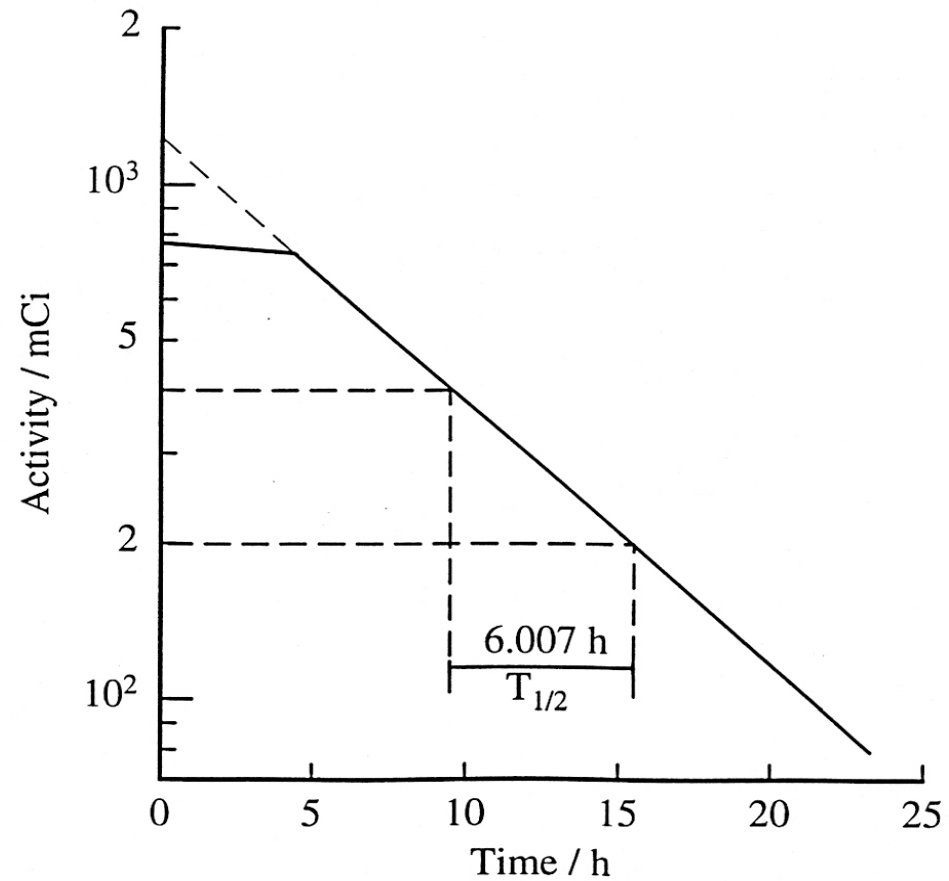
→ non linéarité





## Linéarité en fonction de l'activité

### ► Détermination de la non linéarité: mesure $^{99m}\text{Tc}$



## Amplificateur de courant

### ► Electromètre (amplificateur avec transistor FET)

- Résistance d'entrée  $\geq 100 \text{ T}\Omega$
- Très faible courant de fuite

### ► Gain du préamplificateur ( $A$ ) $\geq 10^5$

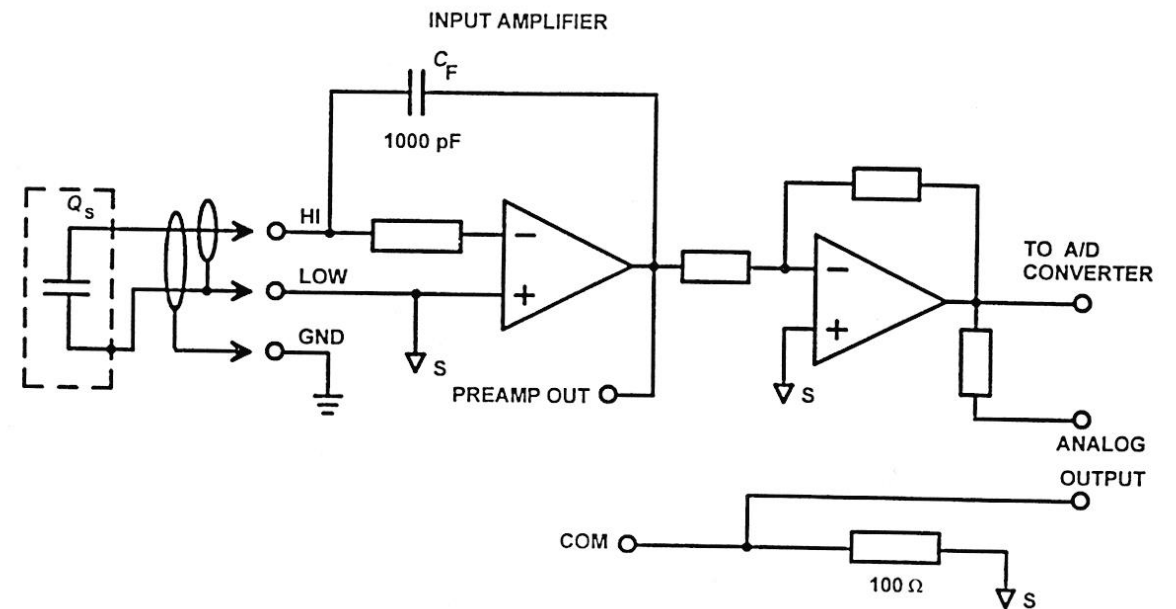
### ► Condensateur de contre-réaction de très haute qualité, ex. condensateur à air

- $C_F = 100 - 2000 \text{ pF}$

### ► Capacités parasites (chambre, câbles, etc.)

- quelques  $10^2$  à  $10^3 \text{ pF}$

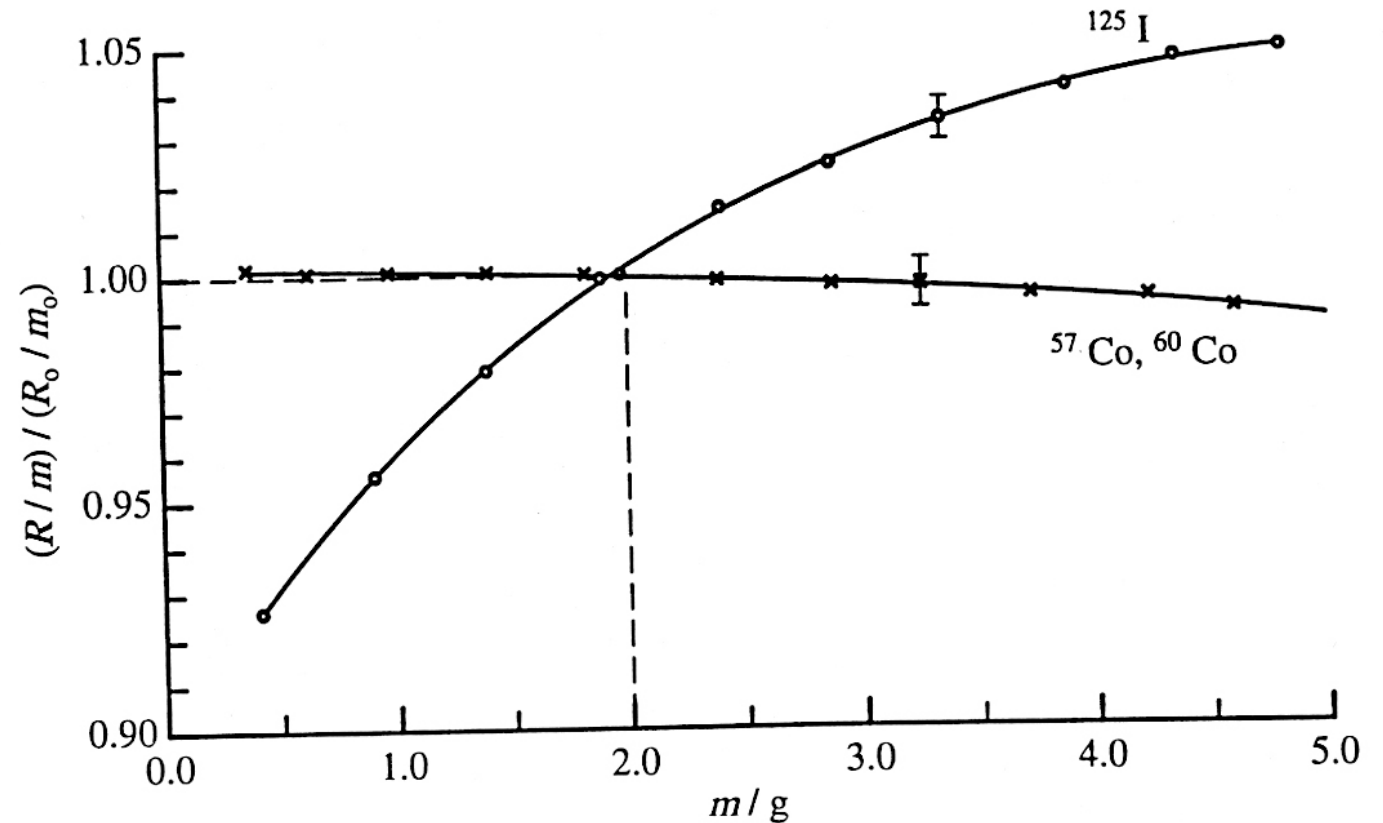
$$I = dQ/dt = C \cdot dV/dt$$



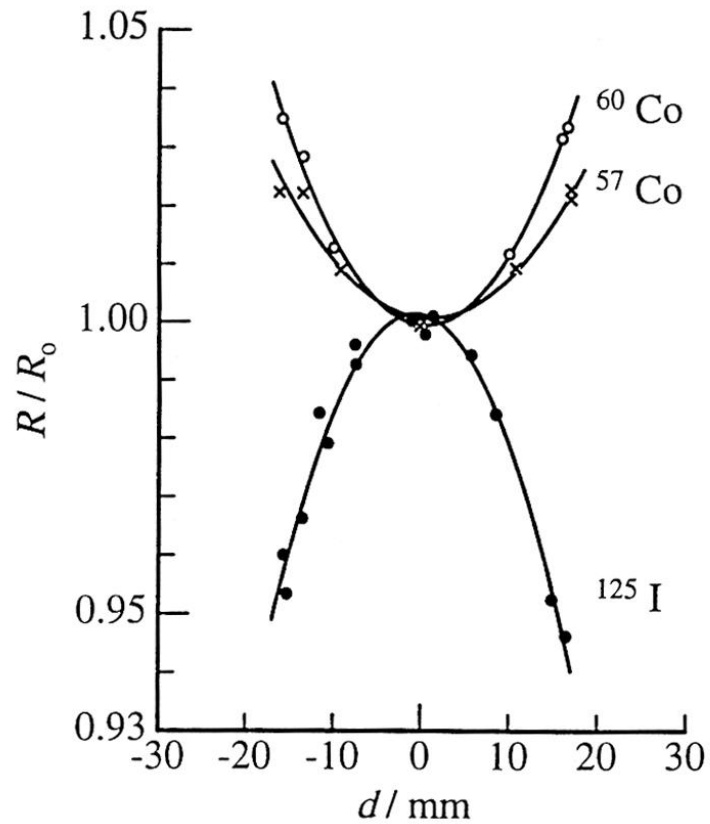
$$I_{\text{vrai}} = I_{\text{mesuré}} \left( 1 + \frac{(C_F + C_{\text{stray}})}{C_F} \times \frac{1}{A} \right)$$

## Variation du courant en fonction de la masse de solution

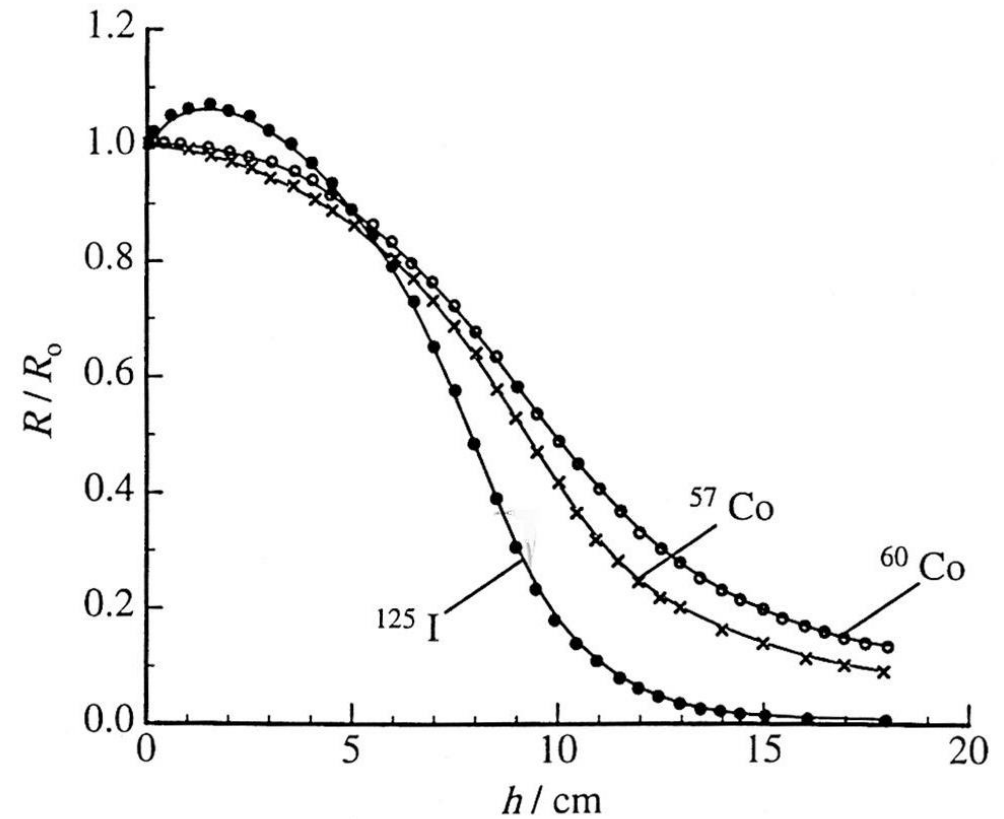
- ▶ Courant lu en fonction de la masse, normalisé à une masse de 2 g
- ▶ La variation dépend :
  - du contenant
  - du radionucléide
  - de la position dans la chambre



## Variation du courant en fonction de la position



horizontal

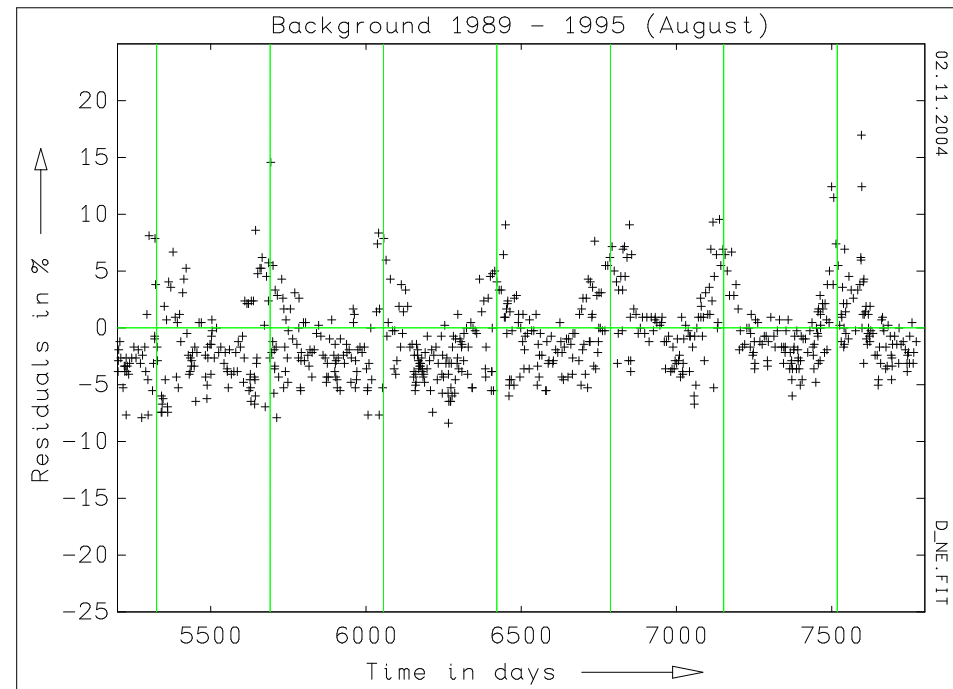


vertical

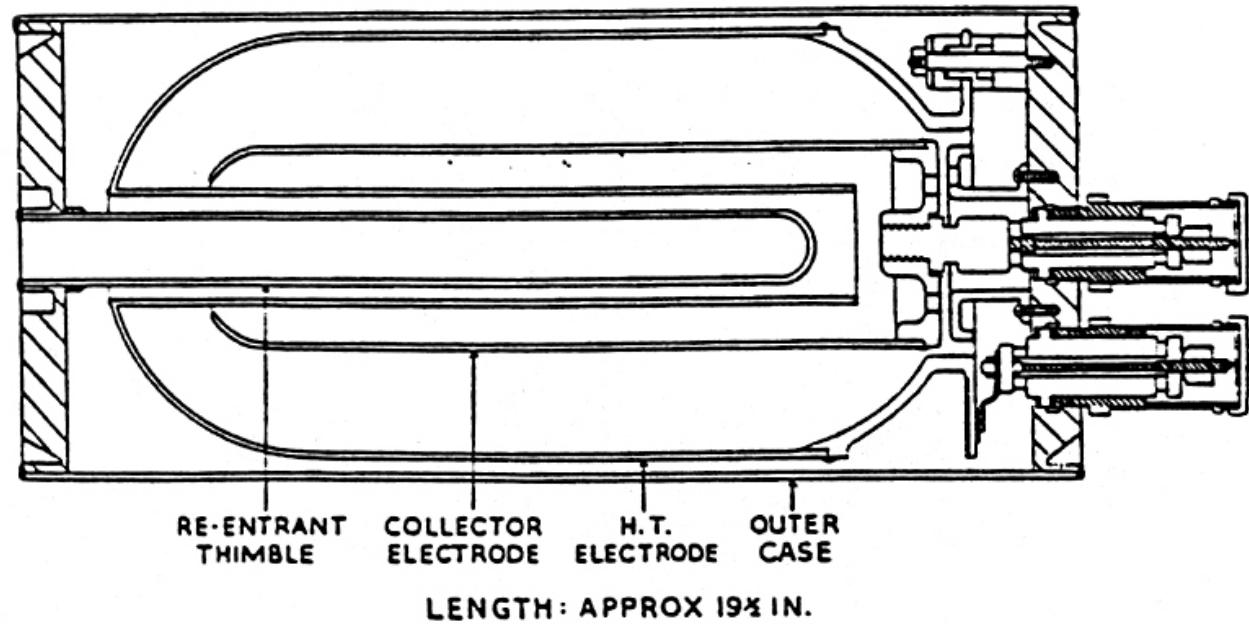
Déplacement dans le puits

## Corrections de mesure

- ▶ Il faut tenir compte de la présence éventuelle d'impuretés
- ▶ Pour corriger les variations de gain du système de mesure, on peut faire une mesure en comparaison à une source de référence (généralement  $^{226}\text{Ra}$ , période 1600 a)
- ▶ Mais la réponse de la source de référence peut varier dans le temps...

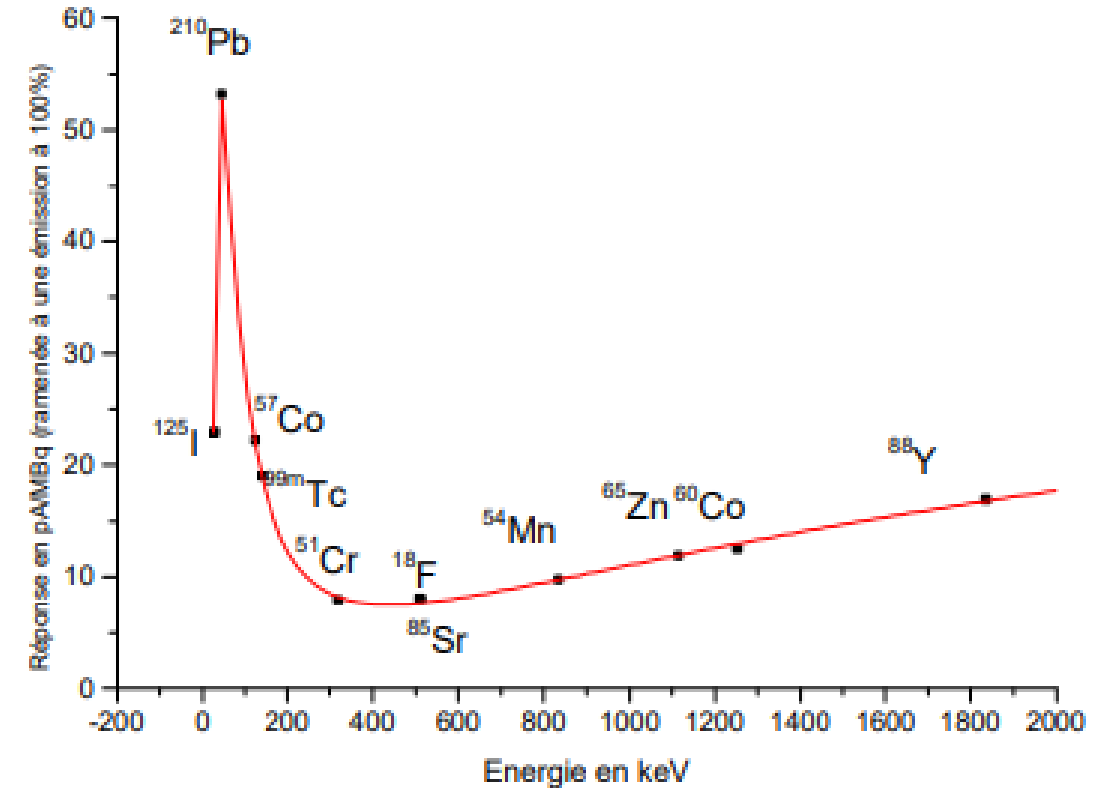
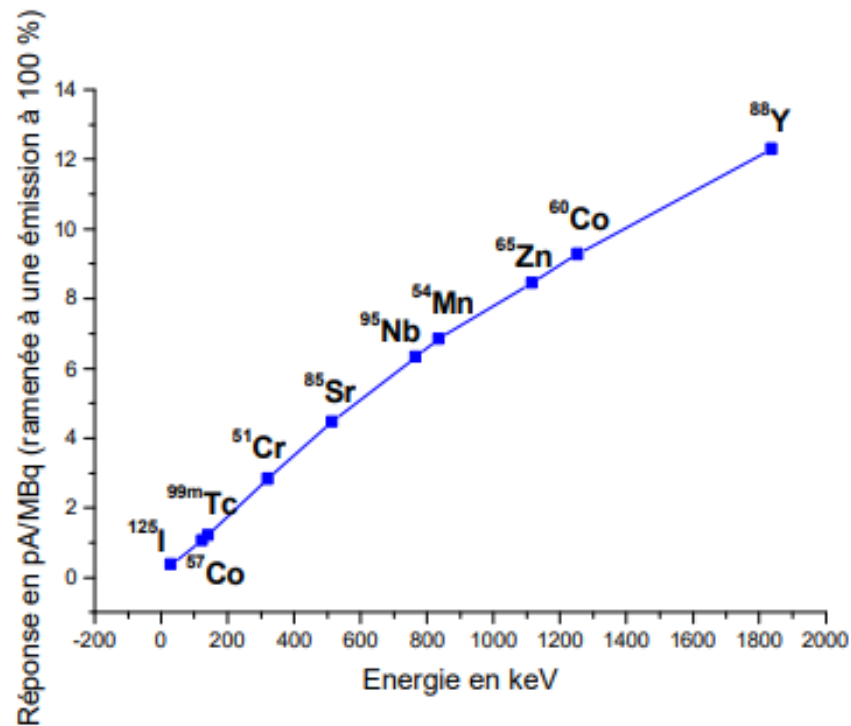


## Exemple: chambre d'ionisation sous pression



## Réponse en fonction des radionucléides

- Réponse d'une chambre d'ionisation remplie avec de l'azote en fonction de l'énergie du radionucléide

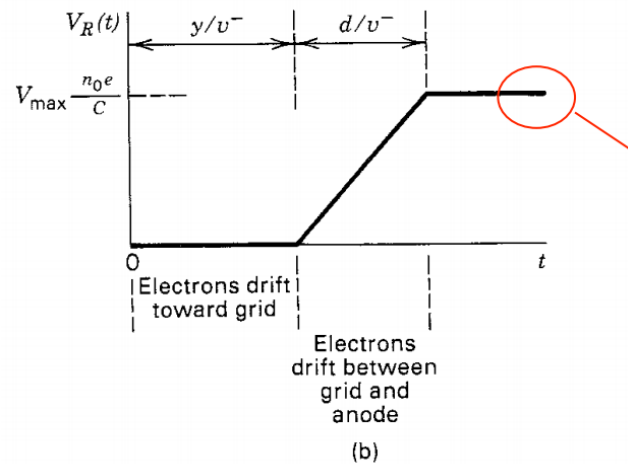
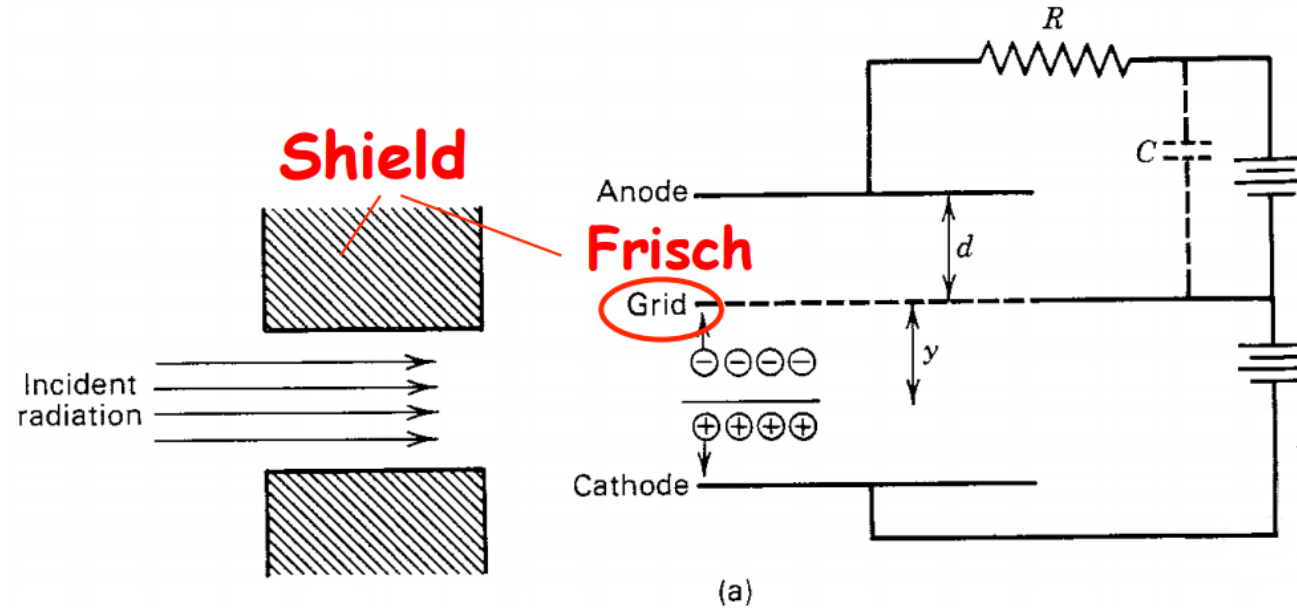


- Réponse d'une chambre d'ionisation remplie avec un mélange de 90 % d'argon et 10 % de xénon en fonction de l'énergie du radionucléide

# Les détecteurs gaz – Chambre à grille

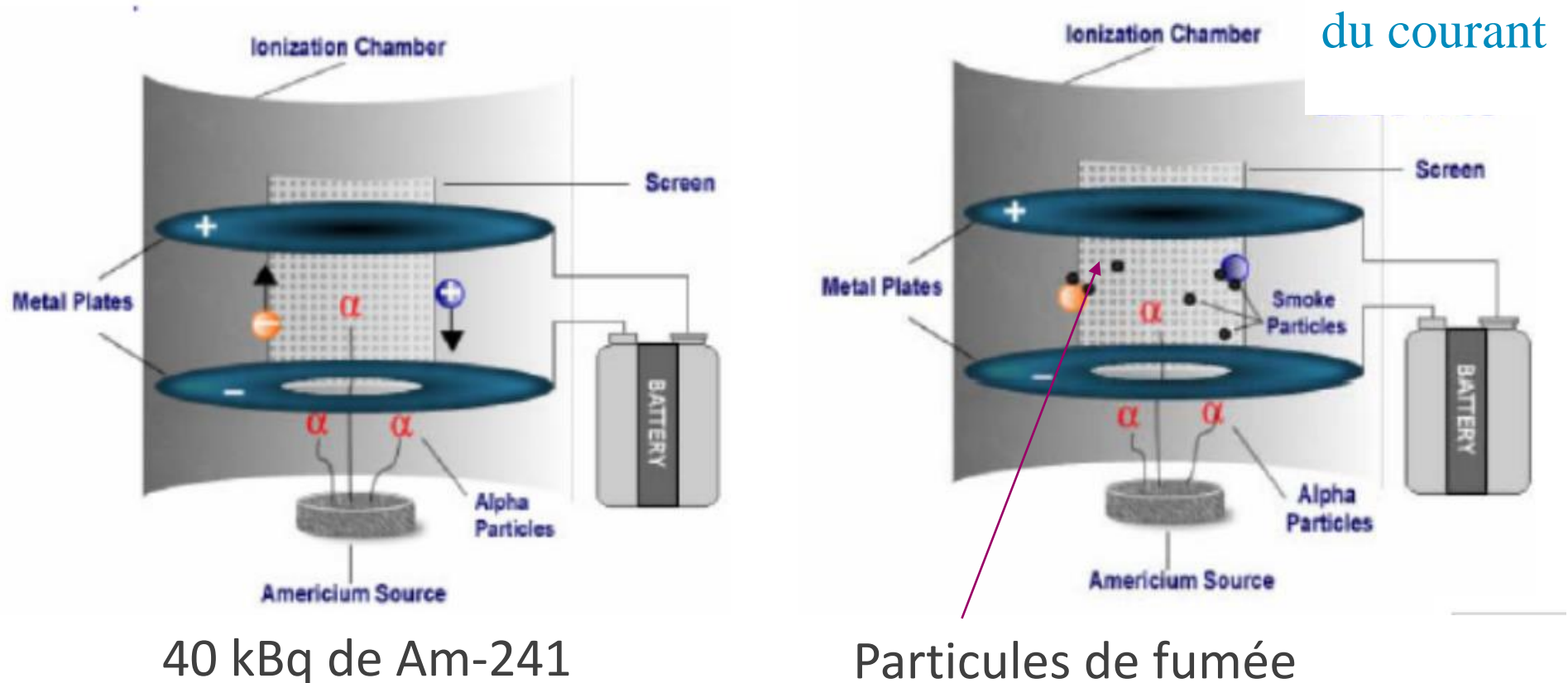


## Principe



Evolution de la tension au cours du temps (signal déterminé par la dérive des électrons vers l'anode)

## Exemple d'application : détecteur de fumée (ancien modèle qui n'existe plus)



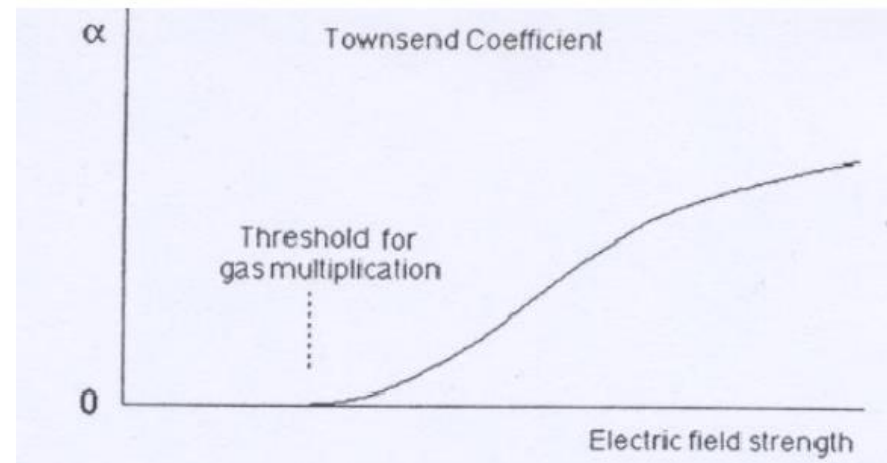
# Les détecteurs gaz – Compteur proportionnel

## Principe

- ▶ Multiplication des charges initialement produites par l'interaction rayonnement/gaz
- ▶ En augmentant le champ électrique, la vitesse des électrons devient suffisante pour ioniser d'autres molécules
  - $E_{\text{seuil}} \sim 10^6 \text{ V/m @ } 10^5 \text{ Pa}$
- ▶ Augmentation du nombre d'électrons par unité de longueur:
  - $\alpha$  : premier coefficient de Townsend

$$\frac{dn}{n} = \alpha \cdot dx$$

$$n(x) = n(0) \cdot \exp(\alpha x)$$



$$\alpha = 0 \text{ si } E < E_{\text{seuil}}$$

$$\alpha = k E \text{ si } E > E_{\text{seuil}}$$

## Coefficients de Townsend

G. Auremma et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 513 (2003) 484–489

487

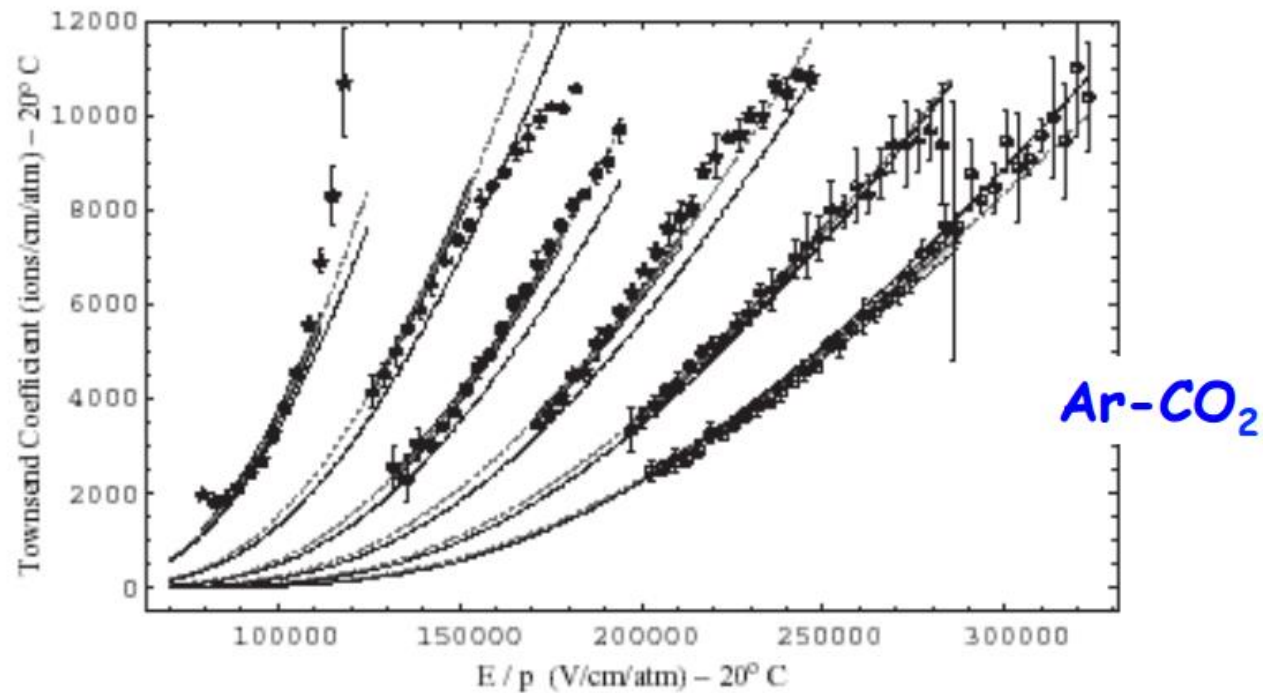
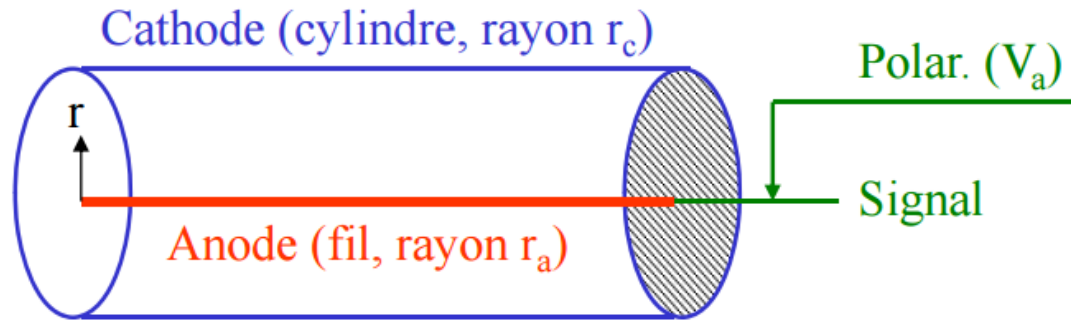


Fig. 2. Townsend coefficient vs. reduced electric field. The six curves are obtained for Ar-CO<sub>2</sub> mixtures spanning from 100–0% to 0–100% relative percentages. The thin dot-dashed lines are the predictions of Eq. (8) with the parameters  $A$  and  $B$  have been fitted separately for the pure gases. The heavy dashed lines are obtained from a two-dimensional fit of the entire data set with the same formula (see text).

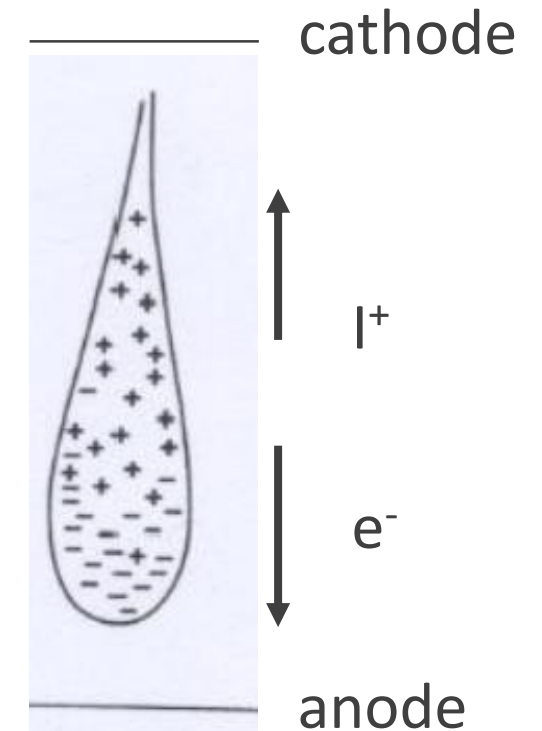
## Géométrie optimale : cylindre



Champ électrique :  $E(r) = V_a / r \cdot \log r_c / r_a$

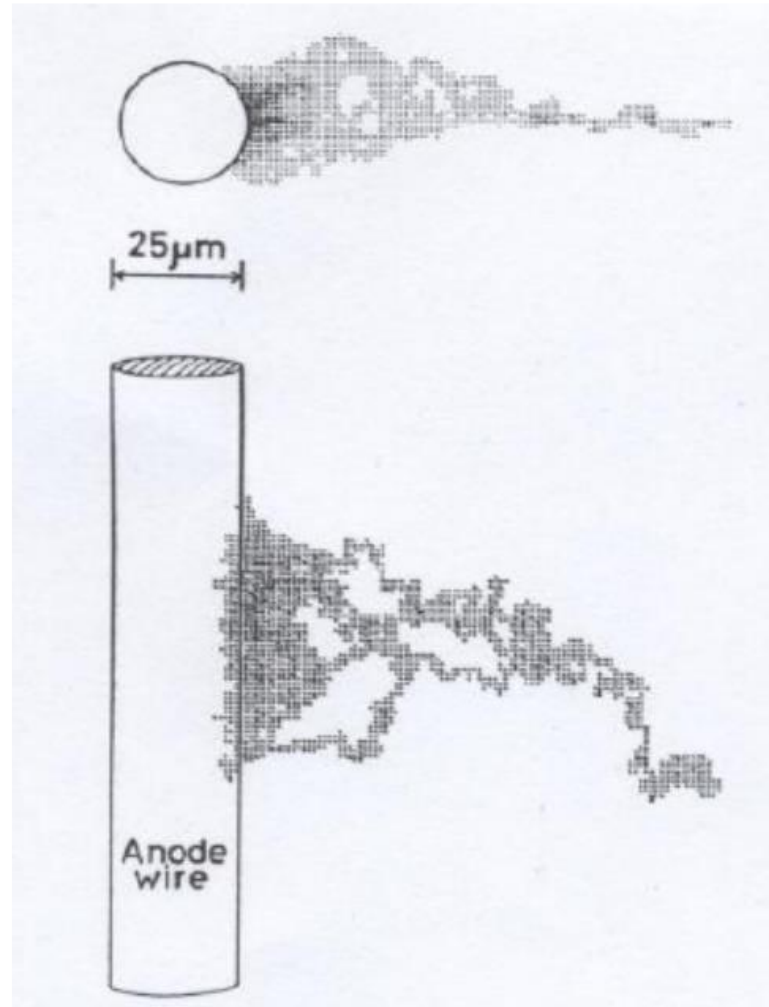
$$E(r) = \frac{V_a}{r \ln(b/a)}$$

$a$  : rayon anode  
 $b$  : rayon cathode

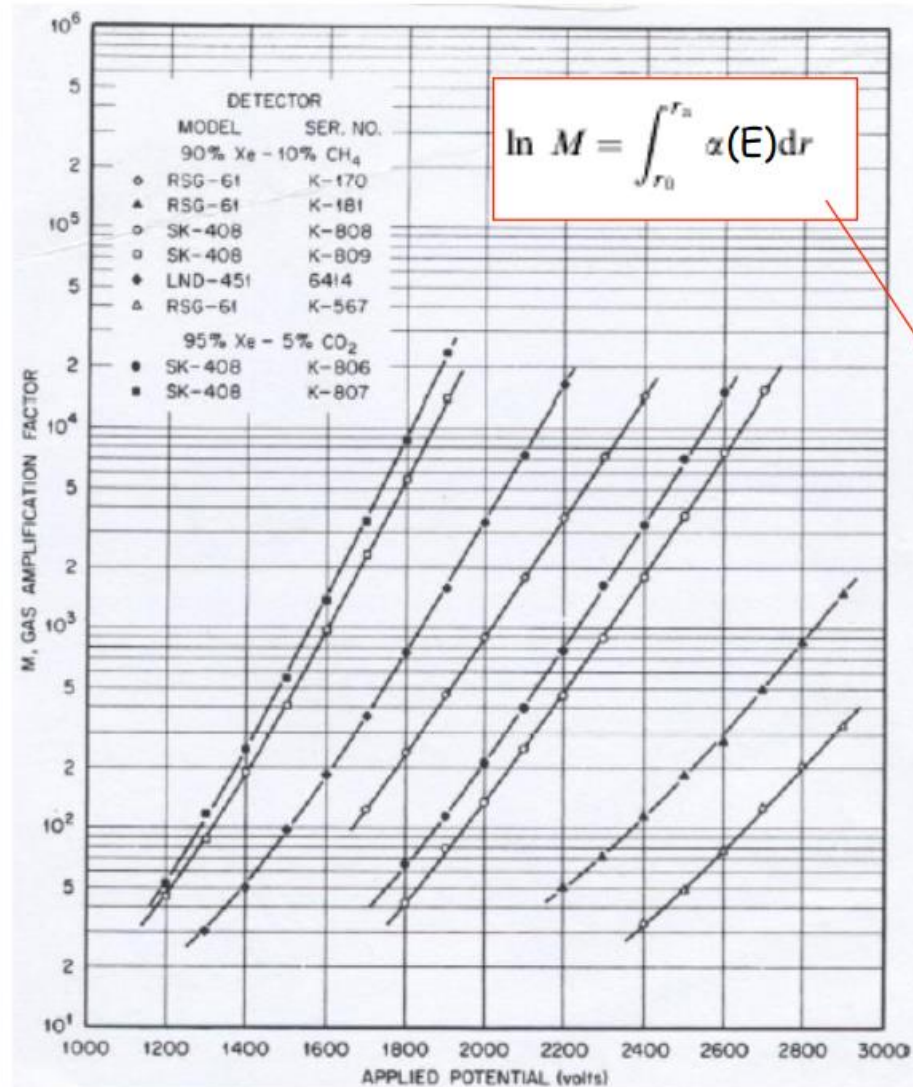


- ▶ Exemple :  $V_0 = 2000 \text{ V}$ ,  $a = 80 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $b = 1 \text{ cm}$ ,  $E(a) = 10^6 \text{ V/m}$
- ▶ Volume de multiplication uniforme  $\sim$  cylindre  $\varnothing 5 a$
- ▶ Pour une géométrie plane équivalente, il aurait fallu  $V_0 = 10^5 \text{ V}$  pour avoir le même champ électrique

## Simulation Monte Carlo



## Charge totale produite

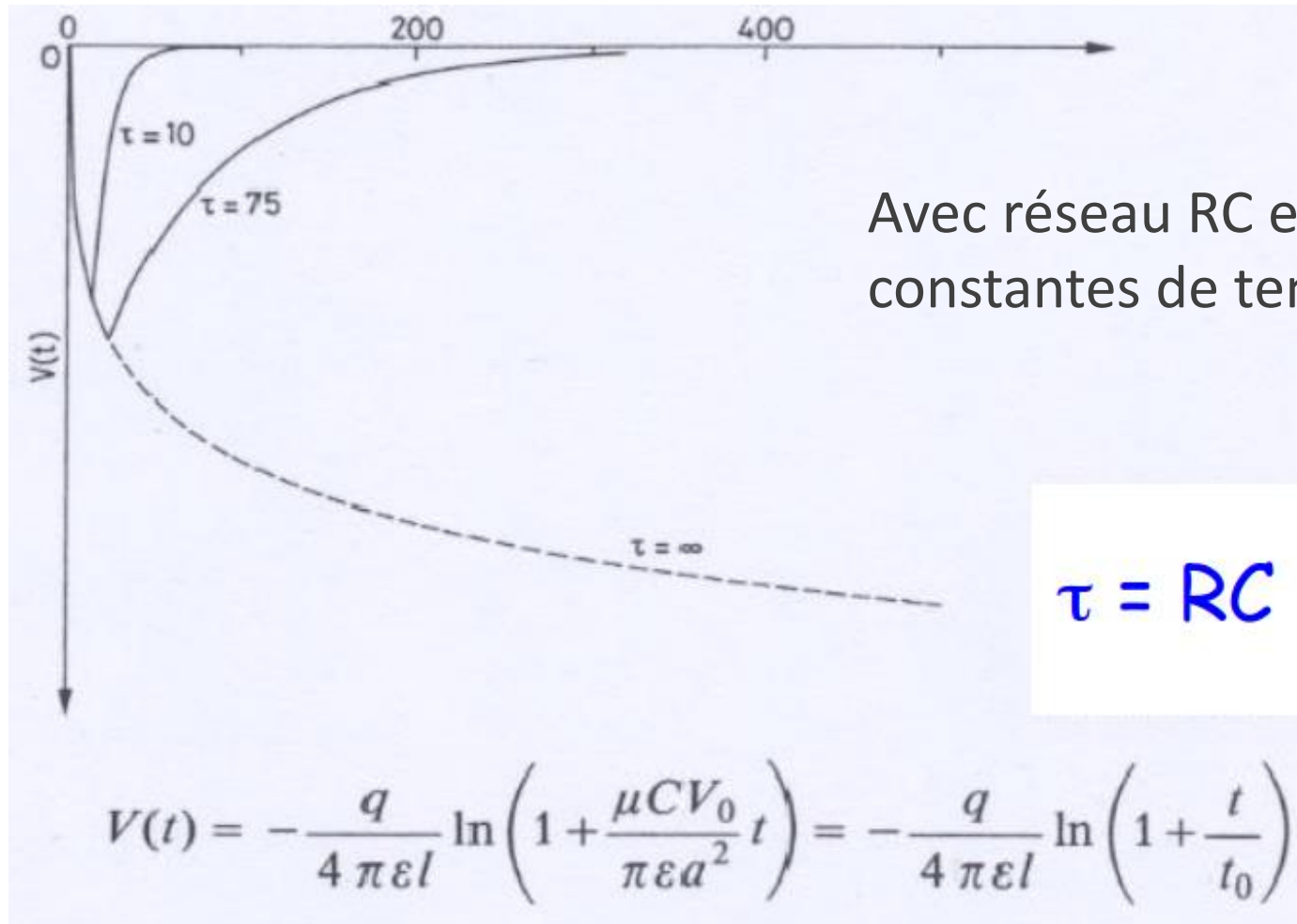


$$M = 10^2 \text{ à } 10^4$$

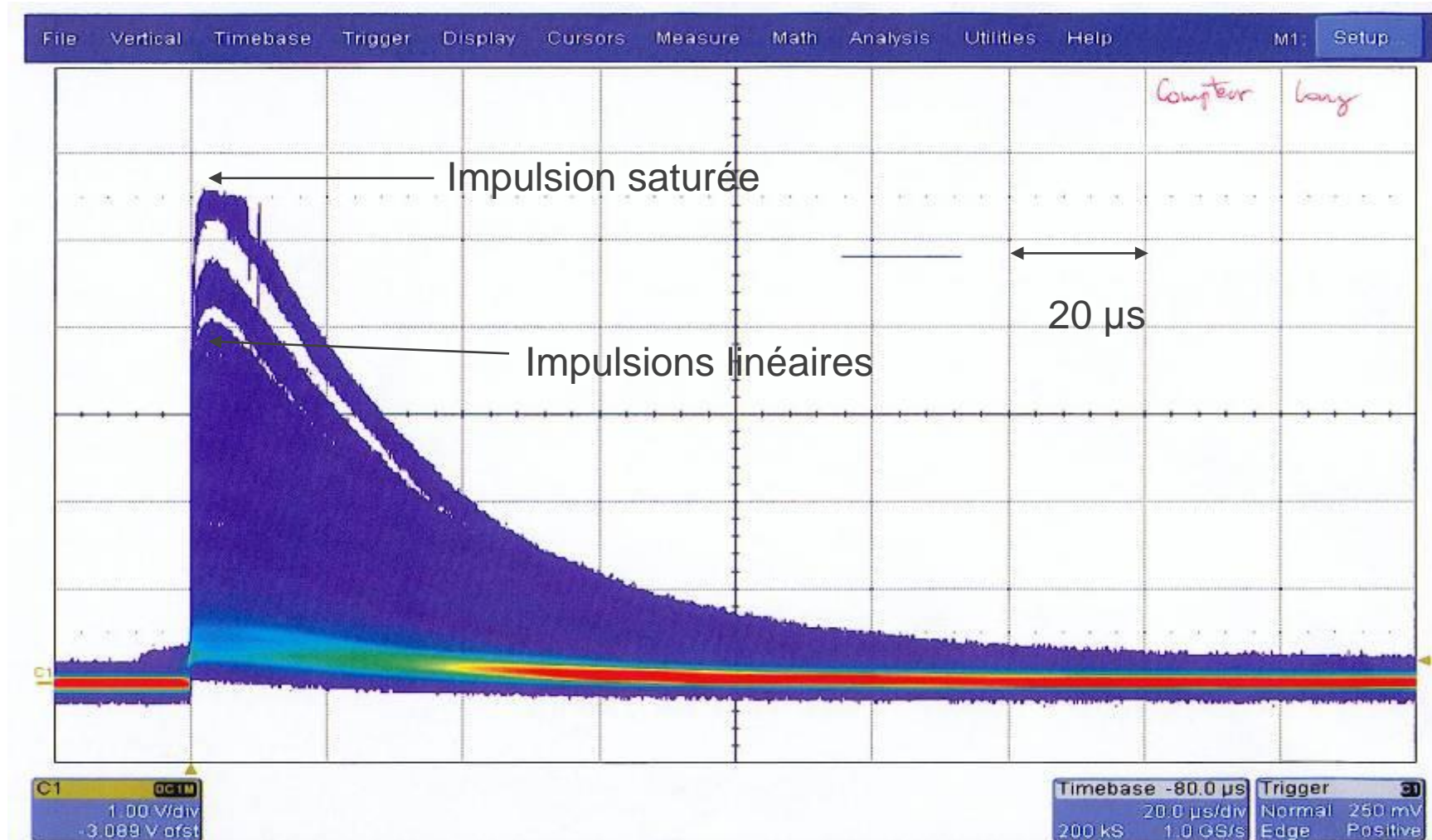
$$Q = n_0 e M$$



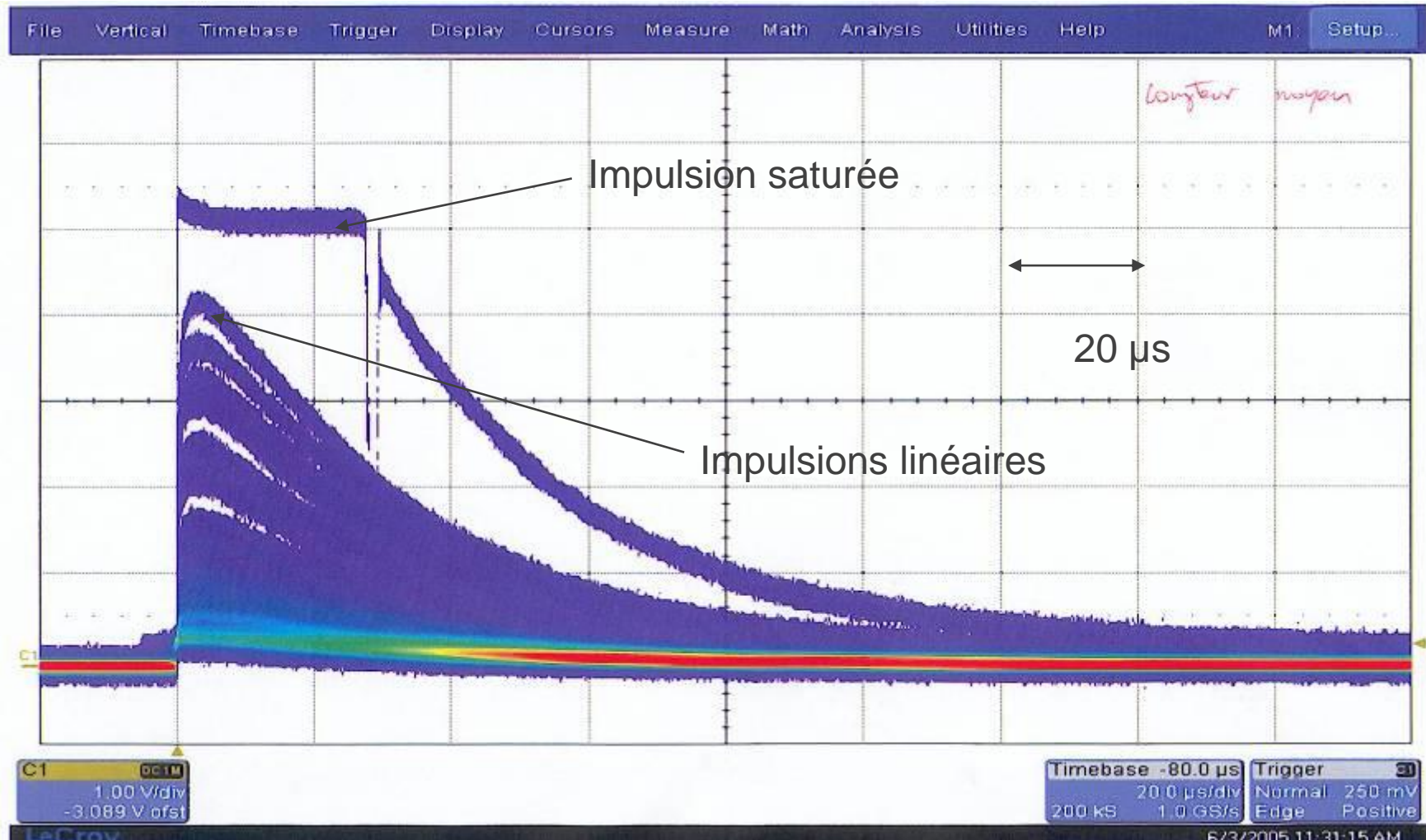
## Impulsion produite par un compteur proportionnel circulaire



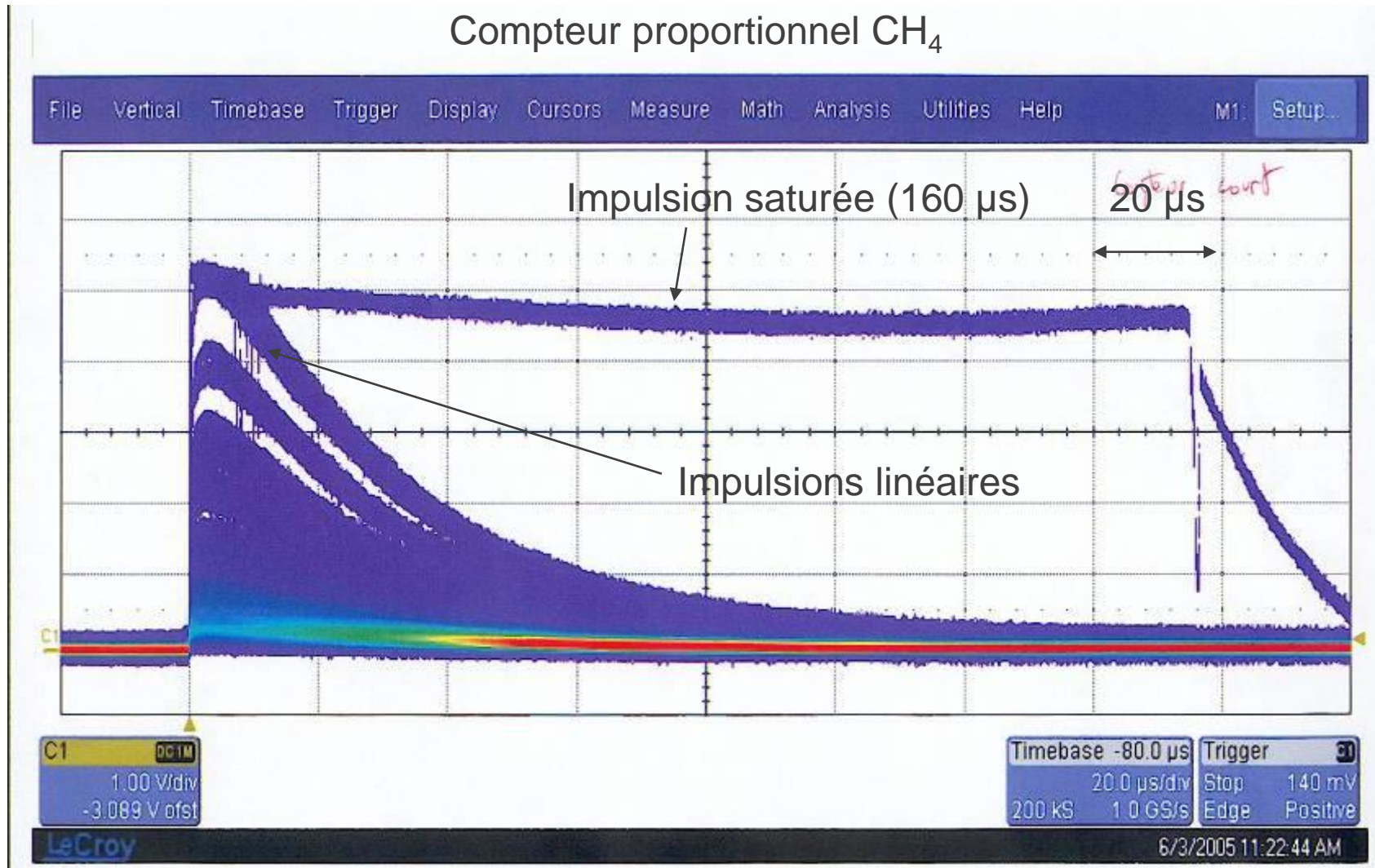
## Problèmes de saturation

Compteur proportionnel CH<sub>4</sub>

## Saturation (exemple)

Compteur proportionnel CH<sub>4</sub>

## Saturation (exemple)



## Conséquences des saturations

- ▶ **Temps mort** : après une impulsion saturante, le préamplificateur peut-être paralysé pendant un certain temps
- ▶ De façon générale on doit admettre que cela peut survenir après chaque impulsion enregistrée... et masquer des impulsions réelles pendant ce temps mort
  - des corrections de temps mort sont donc nécessaires (le temps de comptage effectif est le temps réel moins le temps mort)
- ▶ Un temps mort de durée supérieure aux temps morts intrinsèques du système de mesure peut (doit) être inséré pour faciliter la correction de temps mort

## Conséquences des post-impulsions

- ▶ Les post-impulsions sont corrélées avec l'impulsion initiale
  - La statistique de comptage n'est plus de type Poisson (agrégats)
  - La statistique de comptage n'est plus stationnaire
- ▶ Un temps mort doit être volontairement inséré pour masquer les post-impulsions

## Temps mort

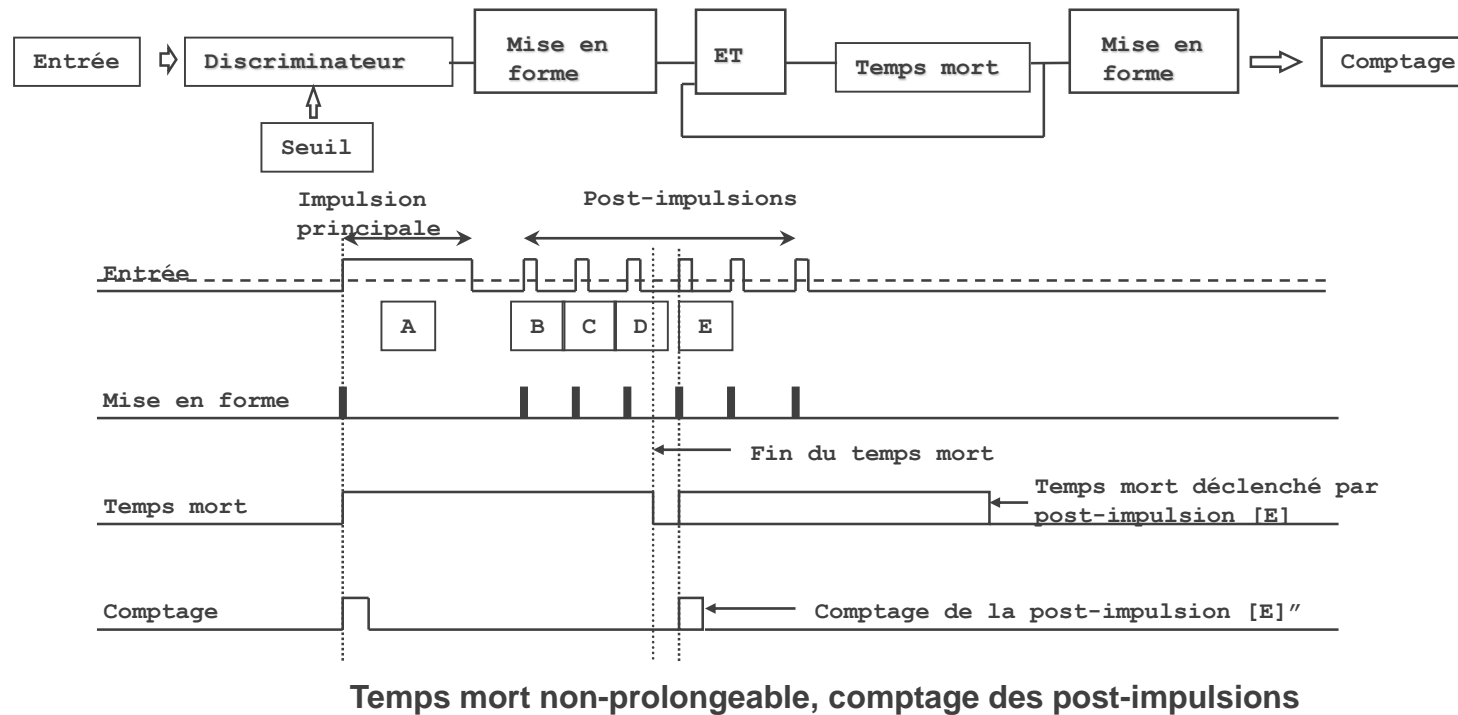
- ▶ **Durée pendant laquelle le système d'acquisition est "occupé" et ne peut pas enregistrer d'autre évènement**
- ▶ **Ce temps mort peut être inhérent aux composants de la chaîne de mesure (détecteur, préamplificateur, amplificateur, analyseur multicanal...) ou/et être volontairement ajouté pour éliminer les effets des saturations ou des post-impulsions**

## Point important

- ▶ **Quand il y a du temps mort (et il y en a toujours !) :**
  - Le système de mesure observe un échantillon du signal physique
  - Le taux de comptage est normalisé par le temps actif
- ▶ **Mais implicitement, cela suppose que la physique du phénomène observé est la même quand le système de mesure est en temps actif ou en temps mort**
  - Cela suppose que les évènements observés soient aléatoires et stationnaires
  - Sinon, cela ne fonctionne pas ( par exemple s'il y a des états métastables avec une durée de vie non négligeable devant la durée du temps mort)
- ▶ **C'est pourquoi il est impératif de supprimer les phénomènes parasites créant de la non-stationnarité (saturations, post-impulsions...) en ajoutant volontairement du temps mort**

## Le temps mort non prolongeable

- Sensible aux “temps morts cachés”. À haut taux de comptage, ce temps mort ne se comporte pas en fait comme non-prolongeable et les formules de correction deviennent caduques





## Un bon système de temps mort

- ▶ Autoriser une bonne évaluation du temps actif et fournir une bonne protection contre les post-impulsions, saturations, et autre impulsions parasites

!!!! Cette dernière fonction est souvent oubliée par les concepteurs de systèmes de mesure !!!!!

- ▶ Il ne faut pas que la durée de base du temps mort soit trop courte

- ▶ Type de temps mort :

- Non-prolongeable (fixe) : initié par tout évènement enregistré
- Prolongeable : initié par tout évènement détecté

- ▶ En réalité, le temps mort réel est un hybride de ces deux types idéaux...

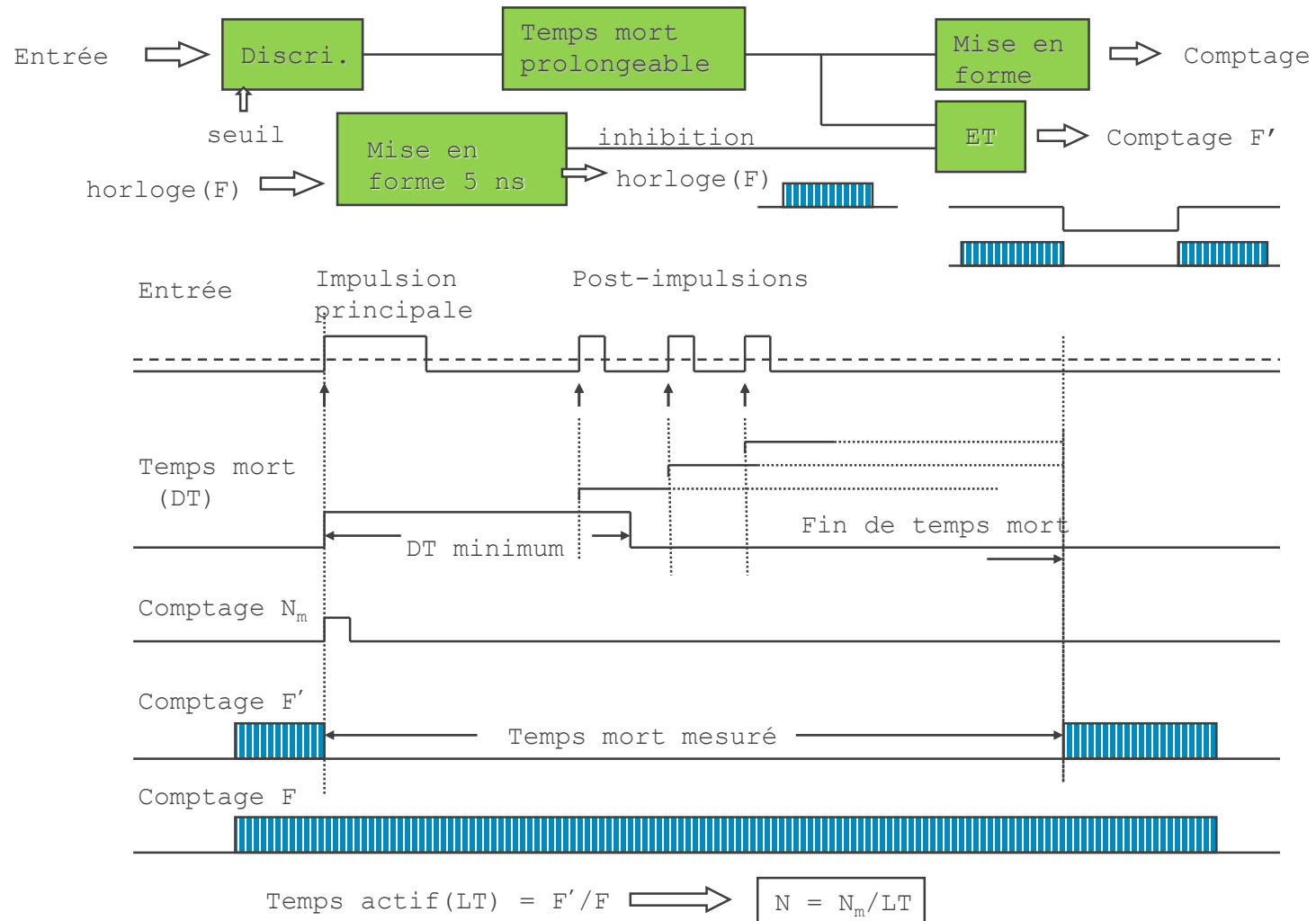
- ▶ On définit un temps mort général qui est une combinaison linéaire de temps morts :

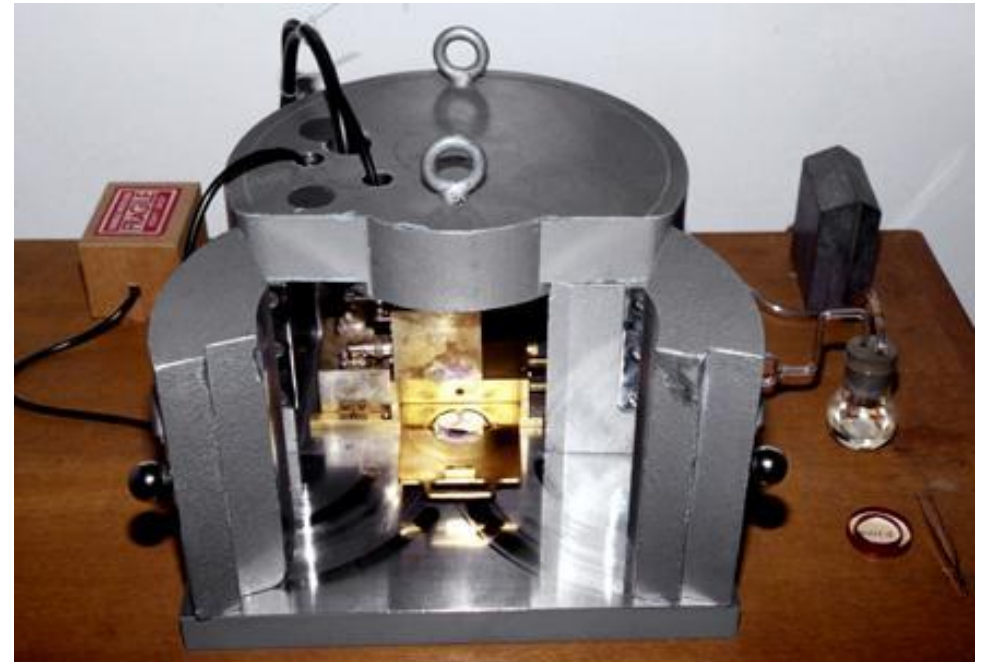
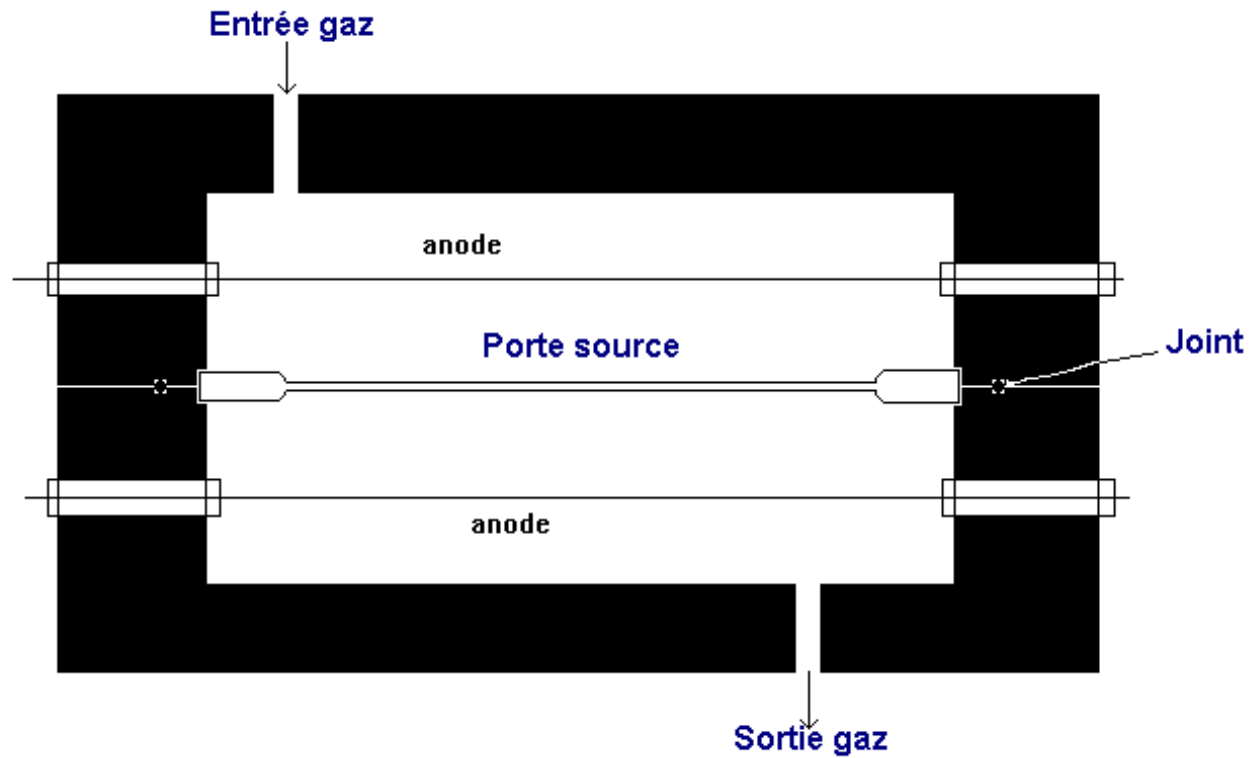
- Prolongeable avec une probabilité  $\theta$
- Non-prolongeable avec une probabilité  $(1-\theta)$

$$R = \frac{\theta \rho}{e^{\theta \rho \tau} + \theta - 1}$$

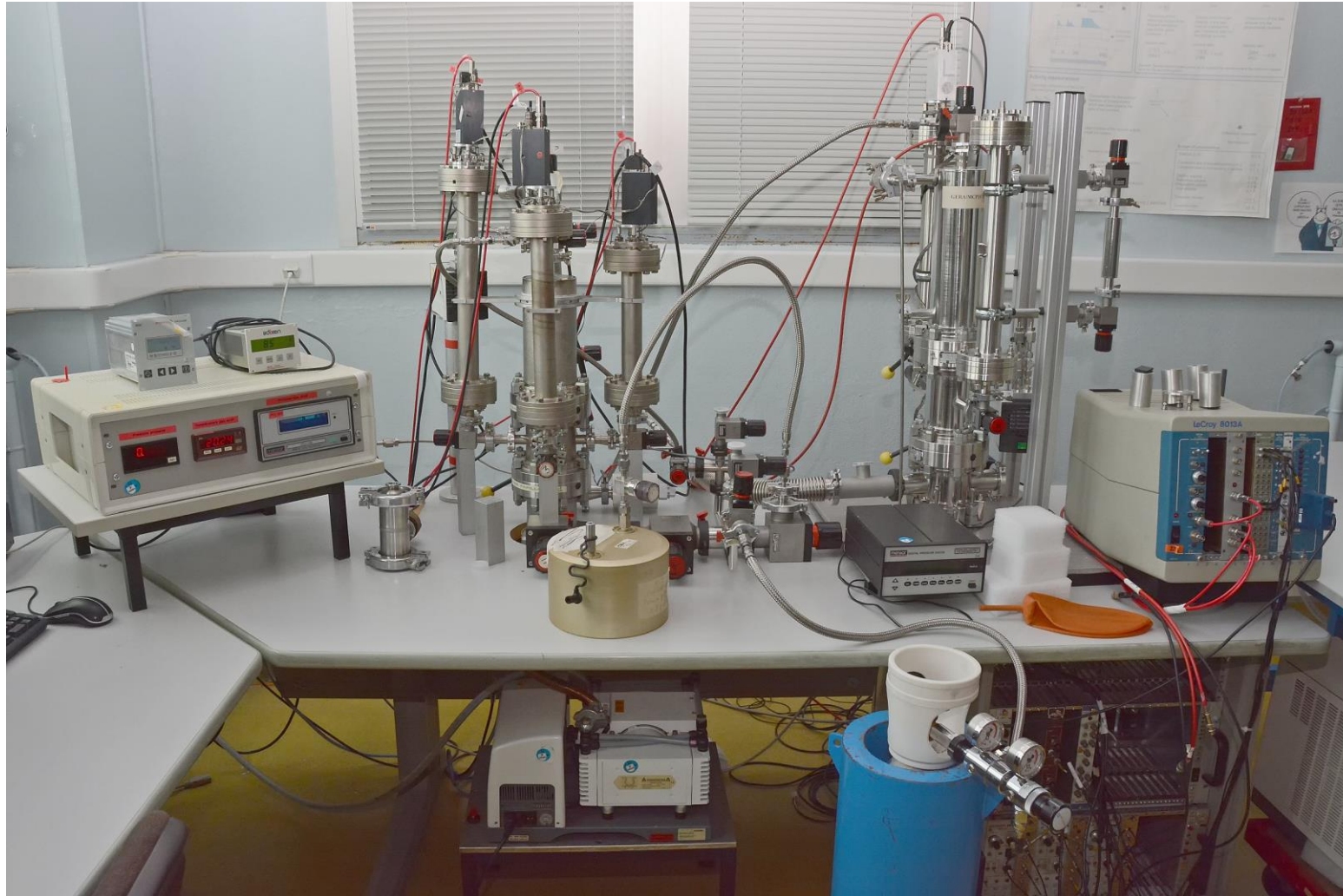
Taux de comptage observé
Taux réel (Poisson)
Durée de base du temps mort

## Le temps mort prolongeable



Exemple : compteur proportionnel  $4\pi$  du BIPM

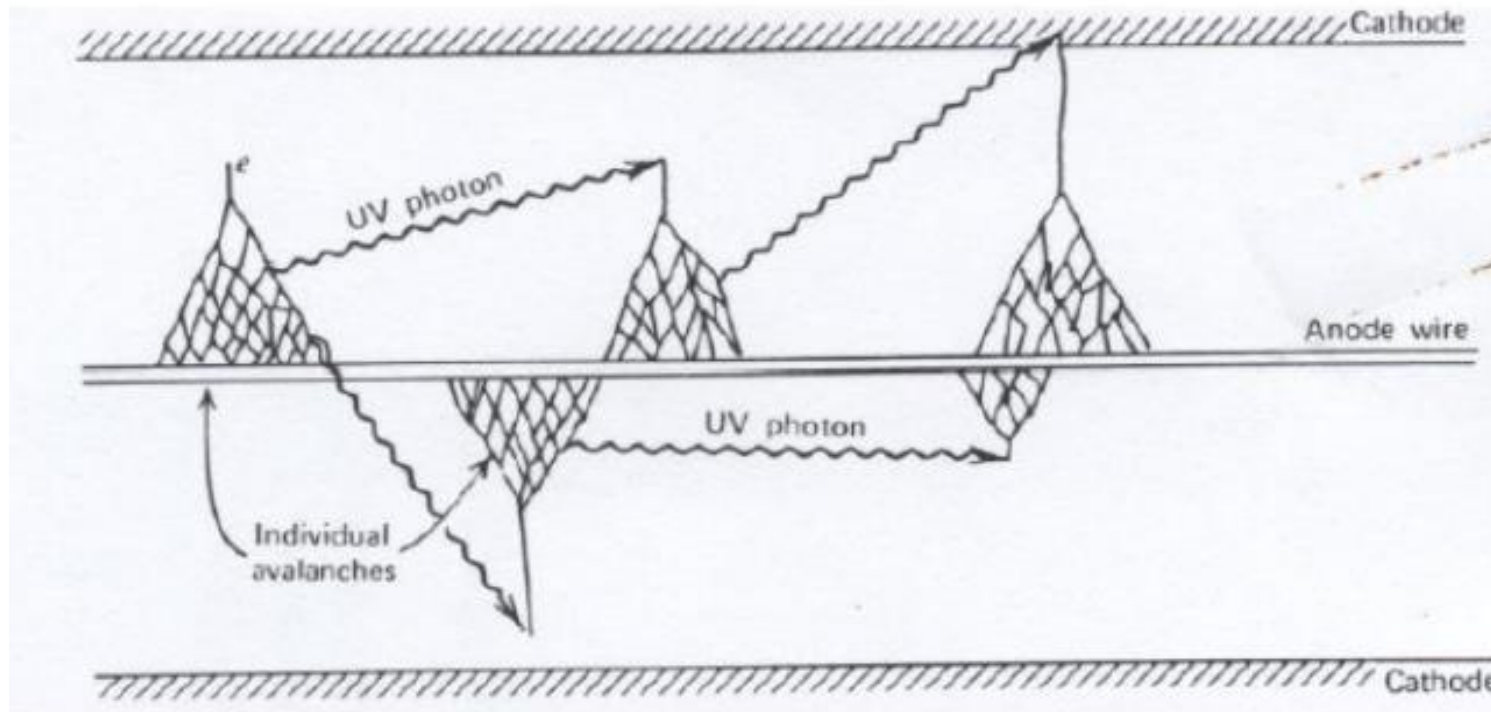
## Exemple de compteur : Compteur triple pour la mesure de gaz du LNE-LNHB



# Les détecteurs gaz – Geiger-Müller

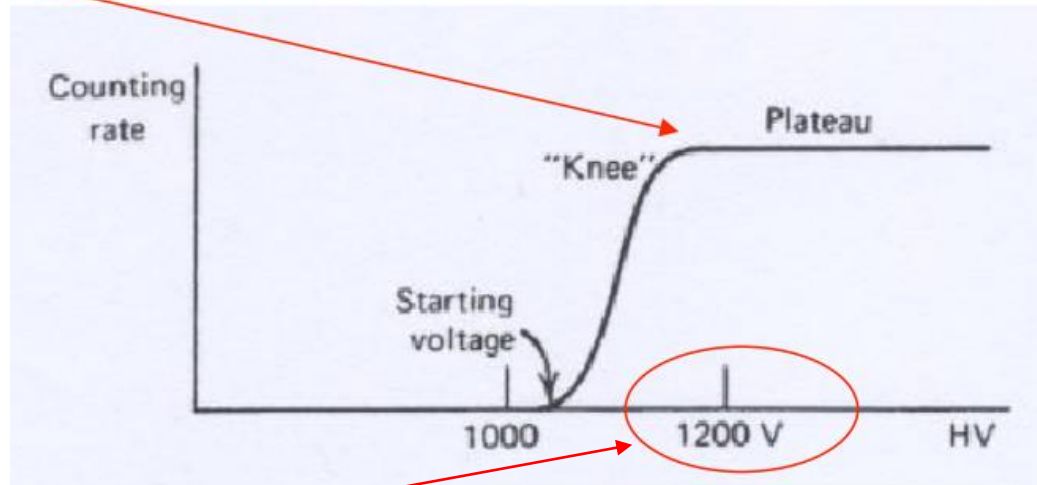
## Compteurs Geiger-Müller

- ▶ Très fort champ électrique, ionisation et excitation des molécules
  - Avalanches secondaires produite par les photons UV
  - $M \sim 10^{10}$



## Fonctionnement

- ▶ En général il faut utiliser des gaz rares (éviter la formation d'ions négatifs par le phénomène de multiplication)
- ▶ Fonctionnement en mode saturé :
  - pas d'information sur l'énergie
  - les impulsions sont identiques



- ▶ Tension de seuil dépendant du gaz et des dimensions du compteur

## En résumé

### ► Avantages :

- grand gain, électronique de traitement simplifiée
- bonne sensibilité

### ► Inconvénients :

- post-impulsions, fort temps mort (quelques ms)
- pas d'analyse spectroscopique possible

### ► **Détecteurs adaptés à des taux de comptage faibles**

### ► Des méthodes permettent de réduire le temps mort (électronique et par ajout de gaz « quencheur » limitant l'effet des UV)



## Exemples de compteurs





**Fin !**