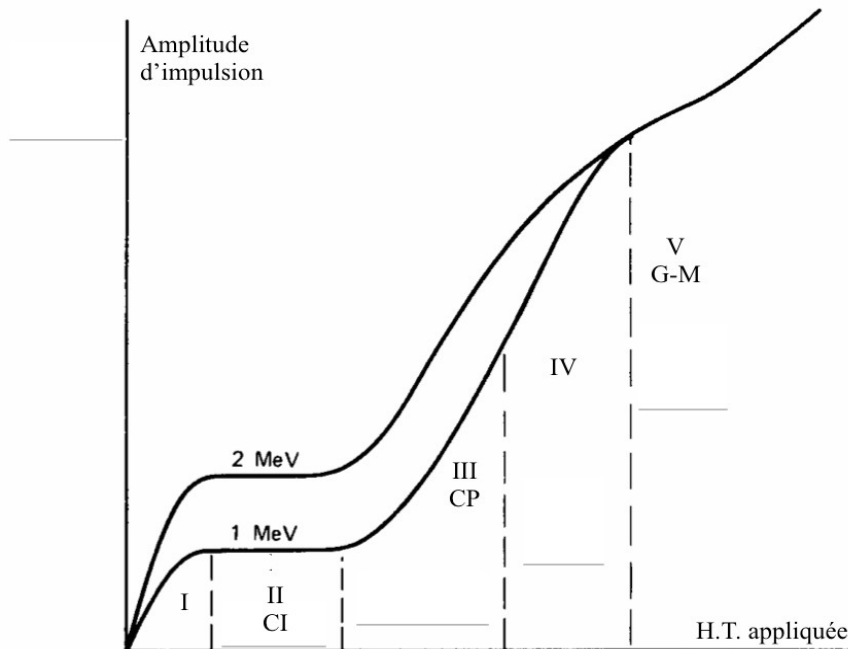


## Détecteur à Gaz

Le principe de fonctionnement des détecteurs gazeux est basé sur l'ionisation du milieu (= production de paires électron-ion) lors du passage du rayonnement incident.

Selon la haute tension de polarisation appliquée, on distingue six classes d'opérations des détecteurs à gaz :



**Figure 1 :** Les différentes régions d'opération des détecteur à gaz. L'amplitude d'impulsion est présentée en fonction de la haute tension appliquée pour des rayonnements incidents qui ont déposé deux valeurs différentes d'énergie.

### Zone I : Région de Recombinaison

Dans le cas où le champ électrique (la haute tension) appliqué entre les électrodes est faible, les électrons et les ions, tout de suite après sa production, peuvent alors se recombiner et reconstituent des atomes neutres.

### Zone II : Région de Saturation des ions (Chambre d'ionisation- CI)

En augmentant la haute tension, la recombinaison est empêchée, et toutes les charges produites se dérivent vers les électrodes. On obtient dans ce cas un signal qui reflète la charge totale d'ionisation.

### Zone III : Région du Compteur Proportionnel (CP)

Si la tension appliquée au détecteur est suffisamment haute, les électrons libérés seront accélérés par le champ électrique et ils gagnent assez d'énergie pour produire des ionisations secondaires. Le nombre totale des charges, dans ce cas, est proportionnel au nombre d'ionisation initial (→ amplification importante des charges).

### Zone VI : Région de Proportionnalité limité

Dans cette région, l'amplitude des impulsions croît non linéairement avec le nombre initial des paires électrons-ions (nombres des charges). Cette non proportionnalité est due au mouvement lent des ions positives qui influe le champ électrique interne (dans le détecteur) et change sa forme.

### **Zone V : Région du Geiger-Müller**

En augmentant le champ électrique appliqué encore plus fort, les énergies des électrons primaires augmentent très rapidement et ils ionisent d'autres ions. Une avalanche (multiplication très rapide) d'électrons libres se produit, et ainsi on aboutit à des impulsions ayant la même amplitude et qui ne traduisent aucune propriété de rayonnement incident. C'est le régime du Geiger-Müller (G-M).

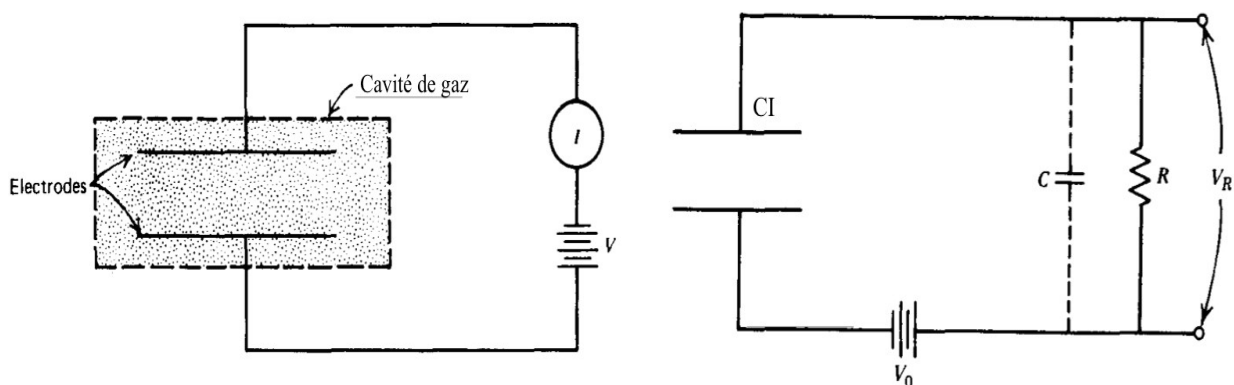
### **Zone IV : Région de Décharge**

Au dessus de la tension maximale du G-M, le compteur devient instable, et il est siège d'une succession des décharges.

## **1. Chambre d'Ionisation (CI)**

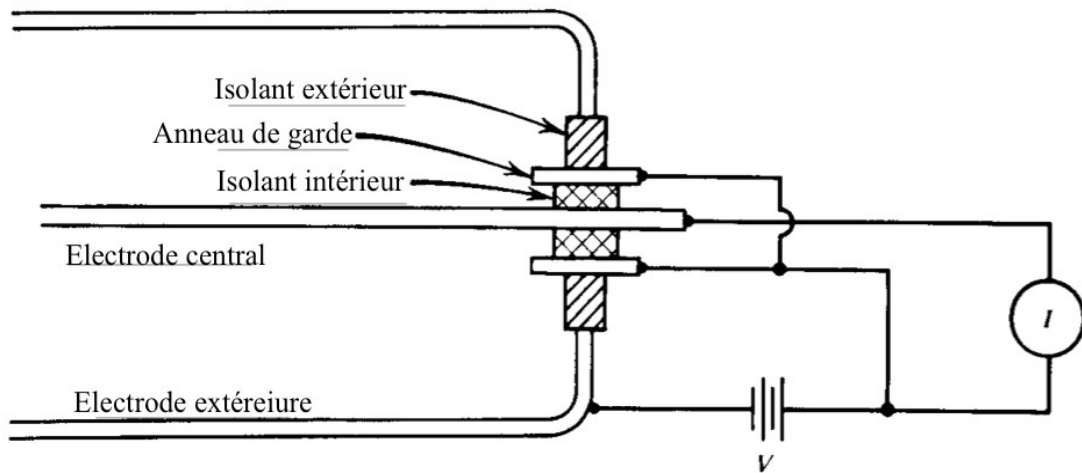
### **1-a. Description et Constitution**

La chambre d'ionisation est constituée d'une enceinte de gaz représentant le milieu détecteur et de deux électrodes servant à appliquer un champ électrique uniforme.



**Figure 2 :** Les composantes basiques d'une CI à électrodes parallèles, opérée en mode courant à gauche et en mode impulsion à droite.

- Selon l'application, la chambre peut avoir différentes formes et géométries, plannaire ou cylindrique dont le fil axial représente l'anode et sa couverture représente la cathode. Les électrodes peuvent aussi être des plaques parallèles.
- Le gaz de remplissage de la chambre est généralement l'air ou aussi l'argon. La pression du gaz est souvent atmosphérique.
- Les isolants déposés entre la cathode et l'anode (voir figure 3) conduisent à des courants de fuite qui peuvent influencer la forme du signal. Et afin de surmonter ce problème, on utilise des anneaux de garde dont le rôle est de réduire les effets de courant de fuite.



**Figure 3 :** Schéma représentatif d'une CI de géométrie cylindrique utilisant un anneau de garde.

### 1-b. Collection des Charges

- L'Ionisation : est le seul phénomène existant dans la CI. La particule incidente doit transférer une énergie supérieure ou égale à l'énergie d'ionisation des atomes ou des molécules gazeuses.

Gas	1er Potentiel d'Ionisation (eV)	Valeurs de $w$ (eV/paire)	
		Electrons rapides	Particule alpha
Ar	15.7	26.4	26.3
He	24.5	41.3	42.7
H <sub>2</sub>	15.6	36.5	36.4
N <sub>2</sub>	15.5	34.8	36.4
Air		33.8	35.1
O <sub>2</sub>	12.5	30.8	32.2
CH <sub>4</sub>	14.5	27.3	29.1

**Tableau 1 :** Quelques valeurs du potentiel moyen d'ionisation  $w$  pour les électrons et les particules  $\alpha$  dans divers gaz.

- Migration (Mobilité) des charges : Sous l'effet du champ électrique appliqué entre les deux électrodes, les charges se dérivent en directions opposées en produisant un courant de saturation (régime de la CI).

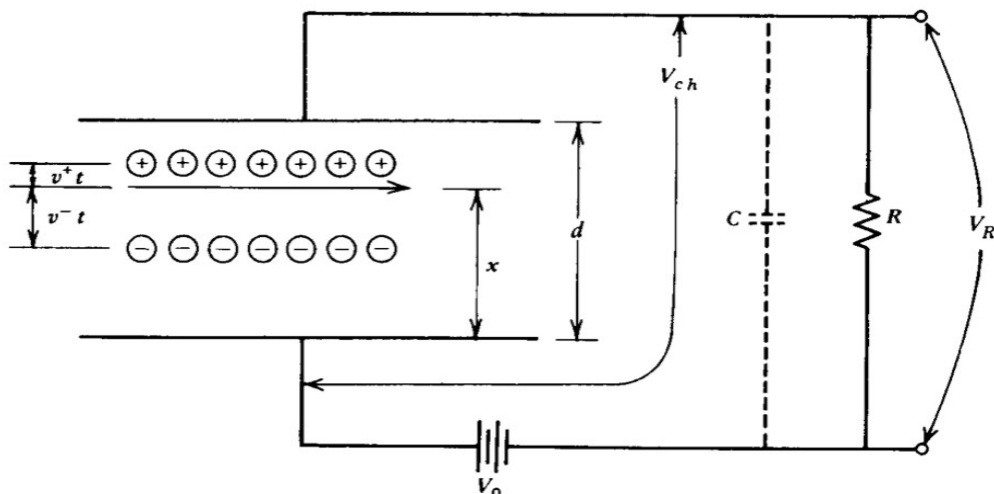
La vitesse de dérive (mouvement)  $v_d$  des ions dans un gaz est exprimée en fonction du champ électrique  $\xi$ , la pression du gaz  $P$  et la mobilité des ions  $\mu$ . Elle est donnée par :

$$v = \frac{\mu e^{\circ}}{p} \quad (1)$$

La mobilité des ions prend typiquement les valeurs de l'intervalle  $(1-1.5)10^{-4} \text{ m}^2 \text{ atm./V.s}$ . Et la mobilité des électrons est estimée à mille fois plus supérieure à ces valeurs. Par conséquent, le temps de collection des électrons doit être mille fois plus court que le temps de collection des ions.

### 1-c. La chambre d'ionisation utilisée en mode impulsion

Pour simplifier l'étude, on utilise une CI avec des électrodes parallèles (voir figure ci-après).



**Figure 4 :** Les paires électrons-ions sont créés à une distance  $x$  de l'anode d'une CI.

- On assume que  $\xi$  est uniforme et constant :  $\xi = V/d$ ,  $V$  et  $d$  sont respectivement le potentiel et la distance entre les électrodes.
- On suppose que toutes les charges sont créés à une distance  $x$  de l'électrode positive où :  $V = \xi x$ .
- Le temps de réponse du circuit  $RC$  est supposé très supérieur au temps de collection des électrons  $\tau$  ( $RC \gg \tau$ ).
- A l'instant initial et avant la création des charges (absence des charges), la tension aux bornes de la résistances  $R$  est nulle. La valeur de la tension appliquée  $V_0$  apparaît entièrement entre les armatures. Et l'énergie stockée dans ce cas est :  $E_0 = \frac{1}{2} C V_0$ .
- Après un temps  $t$ , les ions dérivent vers la cathode située à une distance égale à  $v^+t$ , et similairement les électrons se dirigent vers l'anode en traversant la distance  $v^-t$ .
- L'énergie nécessaire pour mettre en mouvement ces charges vaut  $Q \Delta V$ . Où  $Q$  représente la charge totale et  $Q = n_0 e$ ,  $n_0$  est le nombre des charges initiales dans la chambre.  $\Delta V$  représente la différence de potentiel, et est calculé par le produit du champ électrique et la distance traversée par les ions (ou les électrons).
- En appliquant la loi de la conservation de l'énergie avant et après la création des charges :

Energie stockée = Energie absorbée + Energie absorbée + Energie stockée  
 initialement par les ions par les électrons restante

$$\frac{1}{2}CV_0^2 = n_0e\varepsilon v^+t + n_0e\varepsilon v^-t + \frac{1}{2}CV_{ch}^2$$

$$\frac{1}{2}C(V_0^2 - V_{ch}^2) = n_0e\varepsilon(v^+ + v^-)t$$

$$\frac{1}{2}C(V_0 + V_{ch})(V_0 - V_{ch}) = n_0e\left(\frac{V_{ch}}{d}\right)(v^+ + v^-)t \quad (2)$$

$V_R$  est presque toujours plus petit que  $V_0$  ( $V_R = V_0 - V_{ch} \ll V_0$ ). On peut écrire les approximations :

$$V_0 + V_{ch} \cong 2V_0 \quad \text{et} \quad \frac{V_{ch}}{d} \cong \frac{V_0}{d}$$

Substituons dans la relation (2) on trouve :

$$\frac{1}{2}C(2V_0)V_R = n_0e\left(\frac{V_0}{d}\right)(v^+ + v^-)t$$

$$V_R = \frac{n_0e}{dC}(v^+ + v^-)t \quad (3)$$

Après un temps  $t$  nécessaire pour que les électrons atteignent l'anode, on a :

$$V_R = \frac{n_0e}{dC}(v^+t + x) \quad (4)$$

Les ions arrivent sur la cathode après un temps  $t^+ = (d-x)/v^+$ , on a donc :

$$V_R = \frac{n_0e}{C} \quad (5)$$

• Selon la valeur de la constante de temps  $RC$ , on distingue deux cas différents :

-  $RC \gg t^+$  : l'amplitude maximale  $V_{max}$  du signal est donnée par :  $V_{max} = \frac{n_0e}{C}$

L'amplitude maximale est directement liée au nombre initial  $n_0$  des paires, et indépendante de la position où elles sont créées.

-  $t \ll RC \ll t^+$  : dans ce cas, le signal de sortie ne reflète pas la partie correspondante à la réponse des ions, elle est perdue car le temps de collection des ions est trop court devant le temps de réponse du circuit RC. L'impulsion de sortie ne traduit que le mouvement des électrons. La

chambre d'ionisation dans ce cas est appelée chambre d'électrons et on a :  $V|_{elec} = \frac{n_0e}{C} \cdot \frac{x}{d}$

L'amplitude du signal dépend de la position  $x$  de la création des paires.

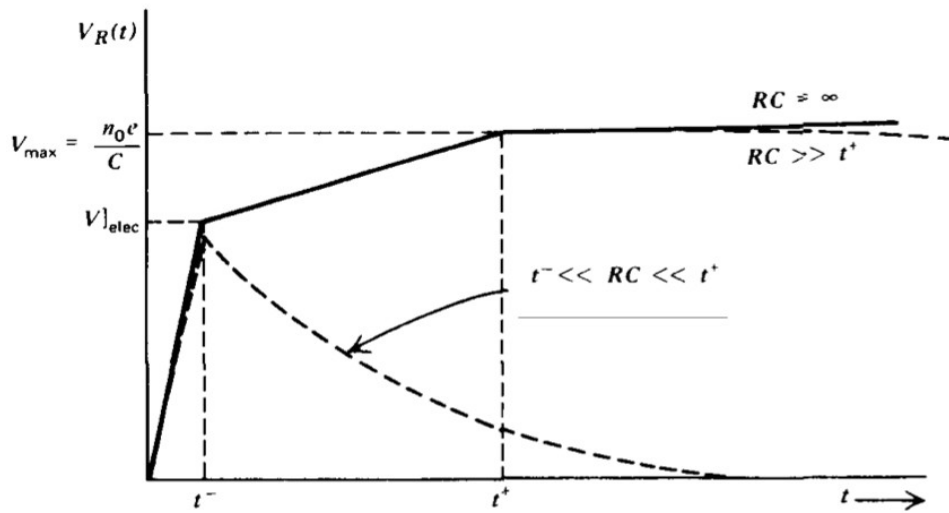


Figure 5 : Les formes de signal obtenues pour les deux cas distinctes de la constante de temps RC.

1-d. Chambre à Grille

Dans le cas de la chambre à grille, l'espace entre les deux électrodes est partagé par une grille (figure 6 à droite). Grâce aux collimateurs installés à l'entrée de la chambre, les particules incidentes n'interagissent que dans la partie de l'espace comprise entre la cathode et la grille.

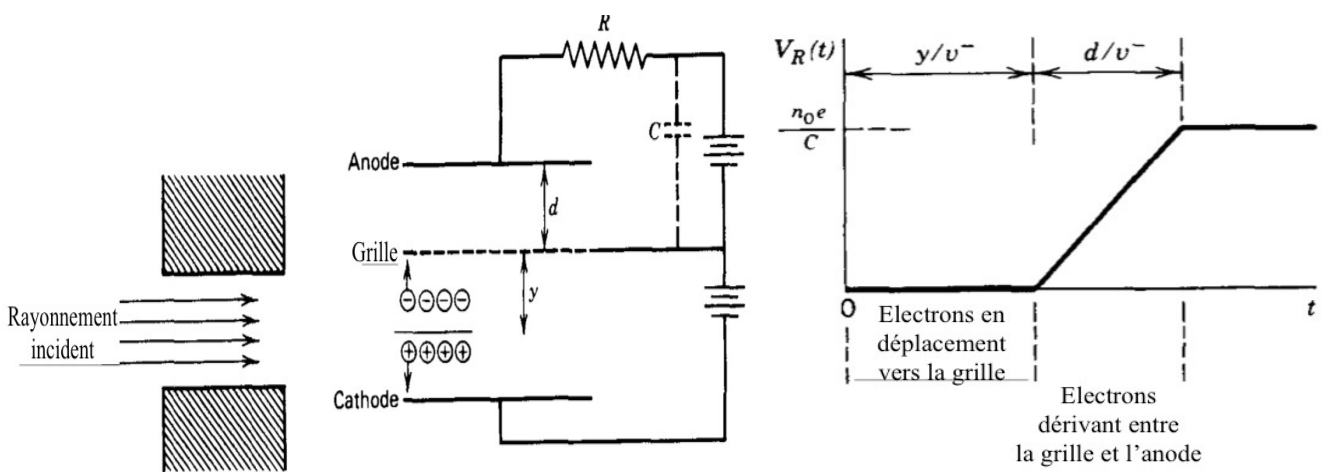


Figure 6 : A droite, principe d'opération de la chambre à grille. A gauche forme du signal résultant de la formation de  $n_0$  paires à une distance  $y$  de la grille.

Les électrons produits sont attirés vers la grille, la traverseront pour se diriger vers finalement vers l'anode. Le signal induit dans ce cas, a alors la forme présentée sur la figure 6 (à gauche).

## 2. Compteur Proportionnel CP

Un compteur proportionnel est un détecteur à gaz qui fonctionne selon le principe d'ionisation et l'amplification gazeuse. Il est utilisé en mode impulsion pour la détection des particules de faibles énergies.

### 2-a. Amplification et Facteur de Multiplication de Charge

Le champ électrique appliqué au CP est très important. Les électrons créés initialement (appelés électrons primaires) acquièrent alors suffisamment d'énergie pour générer des ionisations secondaires et entraînant ainsi un phénomène de multiplication rapide appelé l'avalanche de Townsend (voir figure 7 à droite).

La croissance de nombre d'électrons par unité de longueur est donnée par l'équation de Townsend :

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (6)$$

Avec  $\alpha$  est le premier coefficient de Townsend. Il est constant si  $\xi$  le champ électrique est constant.

On a :

$$n(x) = n(0)e^{\alpha x} \quad (7)$$

et  $n(0) = n_0$

- Chaque électron primaire produit le même nombre d'ionisation et par conséquent le facteur de multiplication est uniforme. La charge totale créée par les  $n_0$  électrons primaires est :

$$Q = n_0 e M \quad (8)$$

$M$  représente le facteur de multiplication de charge. Il est relié au coefficient de Townsend par :

$$\ln M = \int_a^{r_c} \alpha(r) dr \quad (9)$$

$r_c$  est le rayon critique au delà duquel le champ électrique ne pourra plus supporter une multiplication.

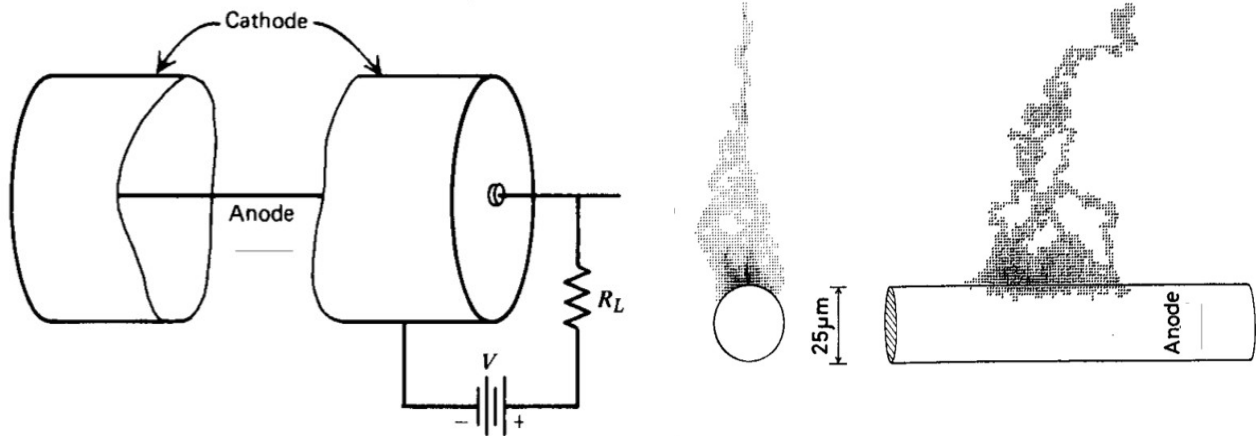
### 2-b. Choix de la Géométrie

Les CP sont typiquement construits en géométrie cylindrique (Figure 7), où la coque cylindrique joue le rôle de la cathode et le fil central de faible diamètre représente l'anode.

Le champ électrique interne pour cette géométrie s'exprime :

$$\mathcal{E}(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)} \quad (10)$$

Où  $V$  : est le potentiel appliqué au CP,  $a$  : est le rayon du fil anode et  $b$  : est le rayon intérieur de la cathode.



**Figure 7 :** A gauche, éléments de base d'un compteur proportionnel cylindrique. A droite, illustration du phénomène d'avalanche induit par un seul électron. Une concentration importante des électrons secondaires est observée au voisinage du fil anode.

la région de multiplication de charge est très petit devant le volume total du détecteur. Le phénomène d'ionisation secondaire est maximal au voisinage de l'anode.

## 2-c. Gaz de remplissage

- Le milieu détecteur englobé par la couverture cylindrique est généralement un gaz rare pur ou mixte, comme par exemple ; Ar, Kr, Xe, ... pour la détection des photons.
- Pour la détection des neutrons thermiques, on utilise les CP avec le  $\text{BF}_3$  ou avec le  $^3\text{He}$ .

Les neutrons rapides, quant à eux, sont détectés par des CP remplis par des gaz d'atomes de  $z$  petit, par exemple l'hydrogène, l'hélium, ...

Le gaz de remplissage est soit enfermé dans une enceinte scellée, soit peut être recyclé en permanence dans le compteur.

- **Le Quench gaz**

Un phénomène parasite peut éventuellement se produire dans le CP. En effet : au cours de leurs déplacement vers l'anode, les électrons peuvent aussi générer des excitations des atomes (ou des molécules du gaz) dont la désexcitation donne en général lieu des photons ultraviolets ou visibles. Ces photons ont la possibilité de transférer leur énergie par effet photoélectrique et produire ainsi des ionisations indésirables .

Il est possible d'éliminer ce phénomène parasite en ajoutant au gaz de remplissage un pourcentage d'un autre gaz poly-atomiques (hydrocarbonique comme le méthane  $\text{CH}_4$ , Ethylène, ...) qui a grand coefficient d'absorption de photons. Exemple : gaz de remplissage noté P-10 = 90% Ar et 10%  $\text{CH}_4$ .

- **Chambre proportionnelle Multi-Fils**

Pour mesurer les positions dans le détecteur, on utilise une chambre proportionnelle multi-fils, où on installe plusieurs fils anodes entre deux plaques servant la cathode.



### 3. Compteur Geiger-Müller

#### 3-a. Mode de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du GM est similaire au C.P. Il est basé sur l'amplification gazeuse, mais avec un facteur de multiplication d'avalanche très élevé ( $10^{12} e^-$ ).

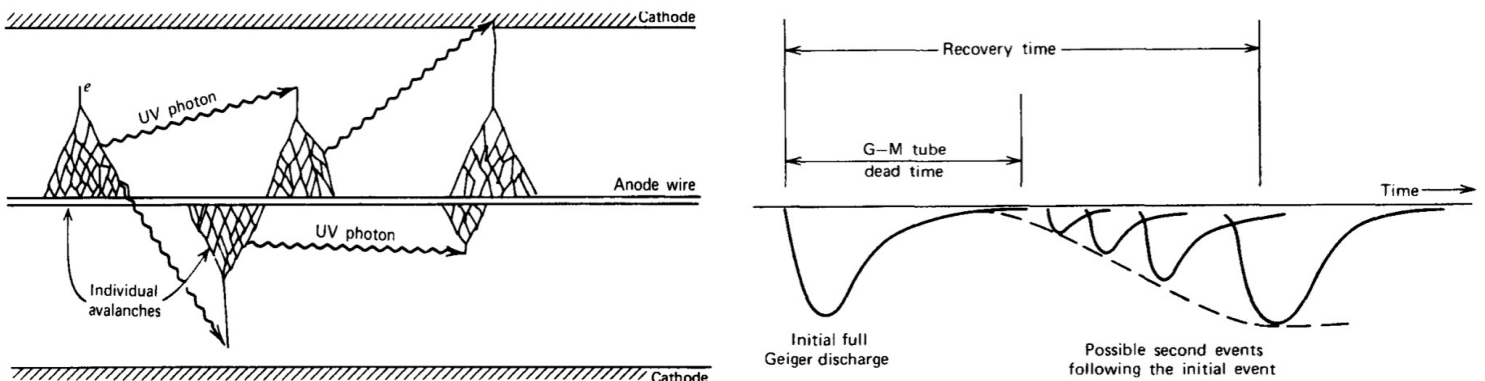


Figure 7 : A gauche, des avalanches additionnelles provoquées en Compteur G-M par les photons UV.

A droite, Illustration du temps mort d'un G-M

- En plus de l'ionisation du gaz, les avalanches dans le GM sont aussi des sources de la lumière (visible ou UV) produite par des états excités. Ces photons induisent des avalanches secondaires très rapides ( $< \mu s$ ) qui superposent l'avalanche primaire. Ainsi quelque soit le nombre d'électrons primaires créés (c-à-d quelque soit l'énergie de la particule détectée), la charge recueillie sur le fil anode est pratiquement toujours la même. L'information sur l'énergie est alors perdue dans ce cas.
- Les avalanches toutes autour du fil anode ne s'arrêtent que lorsque la charge produite par les ions diminuera suffisamment le champ électrique.
- La géométrie du G-M est semblable à celle du C.P., elle est cylindrique. Le gaz de remplissage est un gaz noble (notamment l'argon) ou l'air. La pression du gaz est généralement atmosphérique ou un peu inférieure. La haute tension de fonctionnement est comprise dans l'intervalle  $\sim 500 - 2000V$ .

#### 3-b. Le *quench* gaz

Lors de la neutralisation des ions en arrachant des électrons de la cathode, d'autres avalanches sont induites et conduisent à des décharges continues d'hauteurs d'impulsions multiples qui ne s'arrêtent jamais. La solution est alors en ajoutant au gaz de remplissage environ 5 à 10% du *quench* gaz qui a une structure complexe et un petit potentiel d'ionisation. On utilise le plus souvent l'alcool éthylique et éthyle formate. En effet : lors de la dérive des ions vers la cathode, ils vont transférer leurs charges plutôt aux molécules du *quench* gaz en donnant lieu par exemple  $C_2H_5OH^+$ . Une propriété importante de ce gaz est de se neutraliser par pré-dissociation (c-à-d brisure de la molécule) et ses différents fragments n'ont pas assez d'énergie pour arracher un électron de la cathode. On dit que ce *quench* gaz est "auto-coupeur". Mais malgré son efficacité, il a une durée de vie limitée. On utilise aussi les halogènes (chlore ou flore) car leurs molécules se recombinent spontanément.

#### 3-c. Le temps mort du compteur GM

Juste après une décharge, les ions positifs diminueront le champs électrique suffisamment que le détecteur devient insensible. Et au cours de leur dérive vers la cathode, le champ électrique reprend sa valeur initial progressivement et peut même induire de petites amplitudes avant qu'il atteigne sa valeur initiale pour donner une autre amplitude complète.

- Le temps mort du G-M est défini par la période entre l'amplitude initiale et l'amplitude suivante, quelque soit sa valeur. Généralement, il est de l'ordre de  $50 - 100 \mu s$ .
- Le temps de recouvrement représente l'intervalle du temps nécessaire pour que le G-M puisse générer une autre amplitude complète.