



UE 3A

Organisation des appareils et des systèmes : Aspects fonctionnels et méthodes d'étude

Dr Tristan Richard



Rayons X et gamma – Rayonnements particuliers

Natures et propriétés des REM

Principales caractéristiques des rayonnements α et β

Interaction avec la matière: effet photo-électrique, diffusions, matérialisation

Détection

- **Physique Nucléaires : Généralités**
- **La Radioactivité**
- **Interactions Rayonnements – Matière**
- **Les Réactions Nucléaires**
- **Les Rayons X**
- **Les Détecteurs**



Les détecteurs





Les Détecteurs

- 1. Les différents types de détecteurs**
 - 1.1 Détecteurs basés sur l'ionisation gazeuse**
 - 1.2 Détecteurs à semi-conducteurs**
 - 1.3 Détecteurs à scintillation**
- 2. Mesures des rayonnements**
 - 2.1 Performances d'un détecteur**
 - 2.2 Mesures quantitatives**



1. Les différents types de détecteurs

● **principe détection** → interactions rayonnements ionisants – matière

● **différents types de détecteurs**

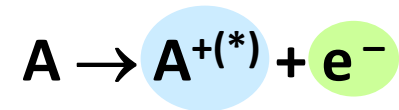
✿ performances et utilisations différentes

type de détecteur	application
plaque photographique	radiographie dosimétrie
calorimètre	phénomènes thermiques
compteur proportionnel compteur Geiger-Muller	ionisation d'un gaz
détecteur à semi-conducteur	ionisation d'un solide
phénomènes lumineux	détecteur à scintillation

1.1 Détecteurs basés sur l'ionisation gazeuse

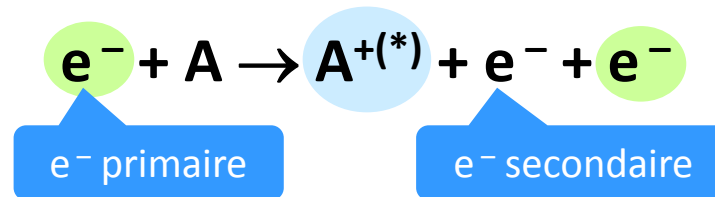
1.1.1 Mécanismes

• ionisations primaires

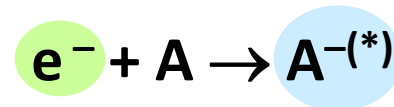


• ionisations secondaires

✿ Gaz rares ou de faible affinité pour les électrons



✿ Gaz de forte affinité pour les électrons



• recombinaisons $A^{+} + e^{-} \rightarrow A^{(*)}$

• désexcitations des espèces formées ($A^{(*)}$, $A^{+(*)}$, $A^{-(*)}$)

1.1.2 Action d'un champ électrique

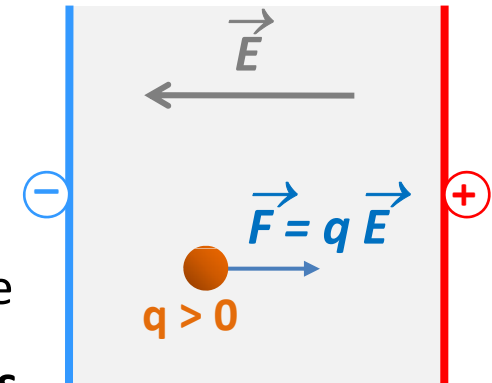
● application champ électrique → accélération particules chargées

✿ création courant électrique

✿ accélération particule $a = \frac{qE}{m}$

➤ particules lourdes → accélération plus faible

➤ difficile récupérer ions lourds sur électrodes



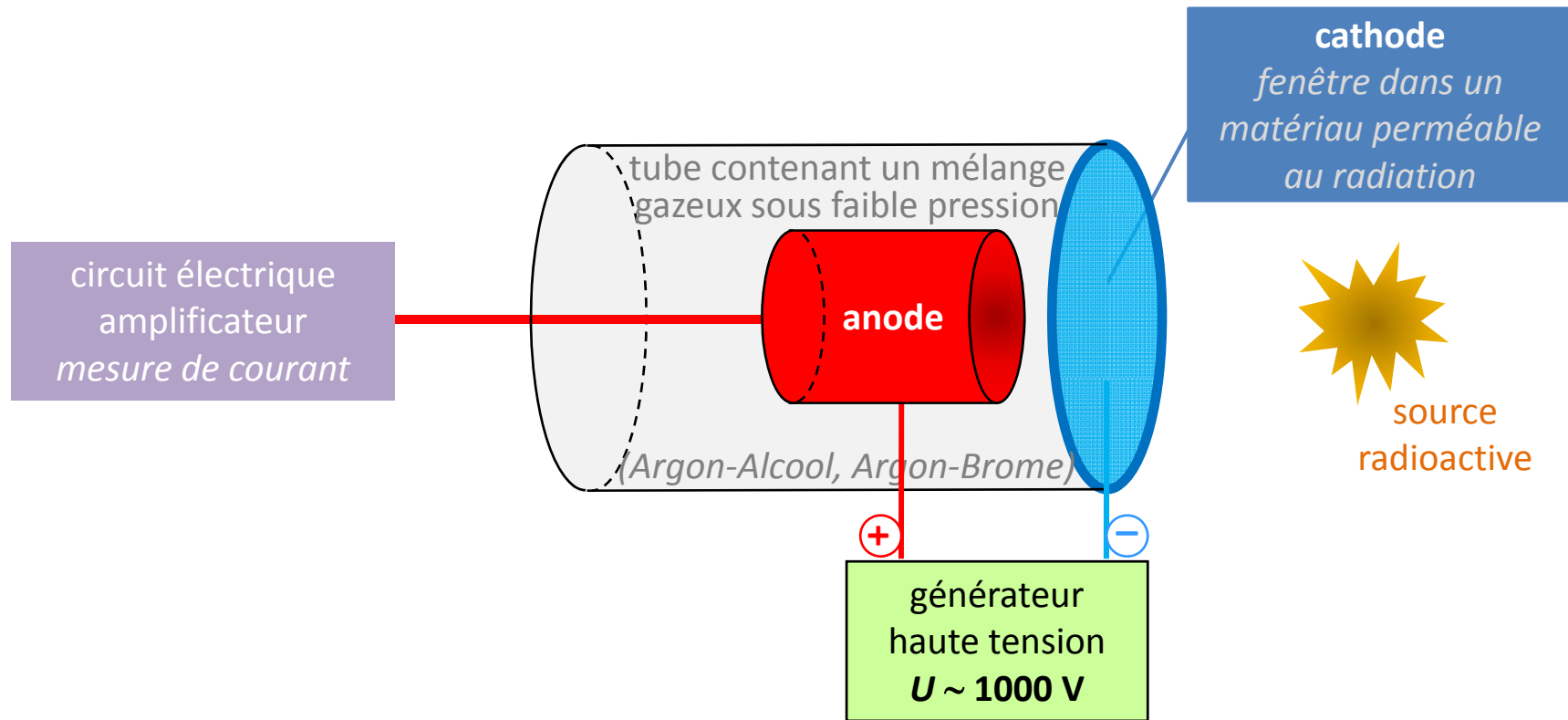
● récupération des e^- (légers) sur électrodes

✿ mesure du courant électrique correspondant

● utilisation de gaz rares (ou à faible affinité électronique)

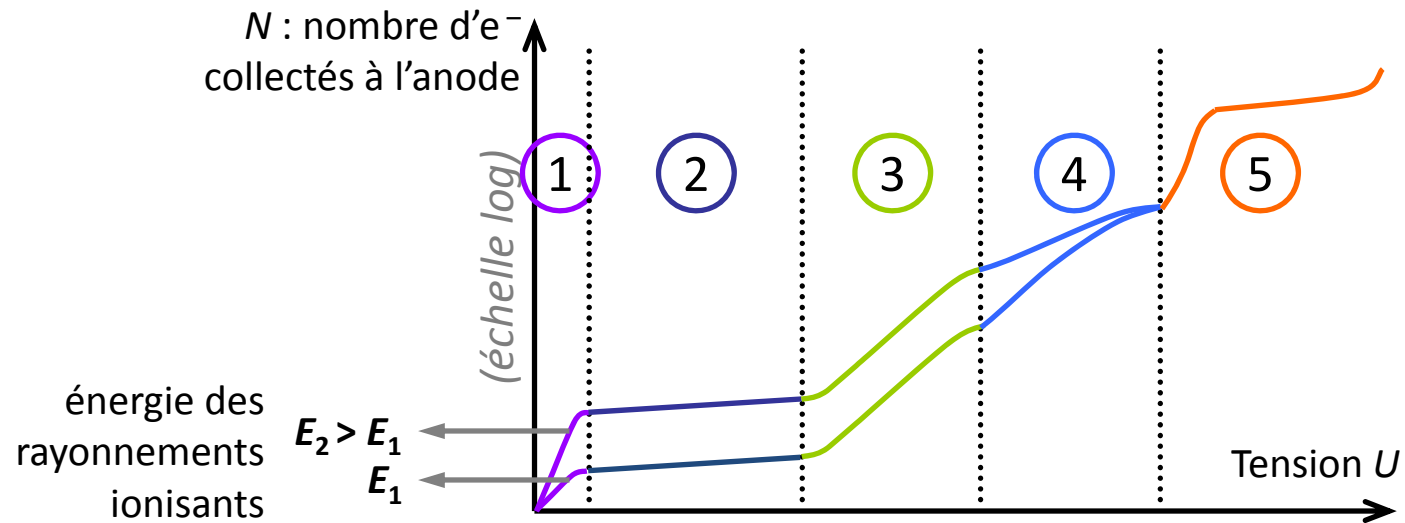
✿ limitation formation d'ions lourds négatifs

1.1.3 Chambre d'ionisation de courant



- intensité du champ électrique croissante lorsqu'on se rapproche de l'anode
- ✱ Probabilité d'ionisation secondaire ~identique dans tout le tube

1.1.4 Les différents régimes



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 : chambre d'ionisation
3	ionisations secondaires deviennent possibles : compteur proportionnel
4	ions formés \Rightarrow écran autour de l'anode : compteur semi- proportionnel
5	chaque ionisation initiale déclenche ionisations secondaires en avalanche : compteur Geiger-Müller

● Zone ②

☼ fonctionnement en mode **chambre d'ionisation**

☼ nombre d'e⁻ collectés

$$N = K$$

☼ **K** nombre d'ionisations primaires

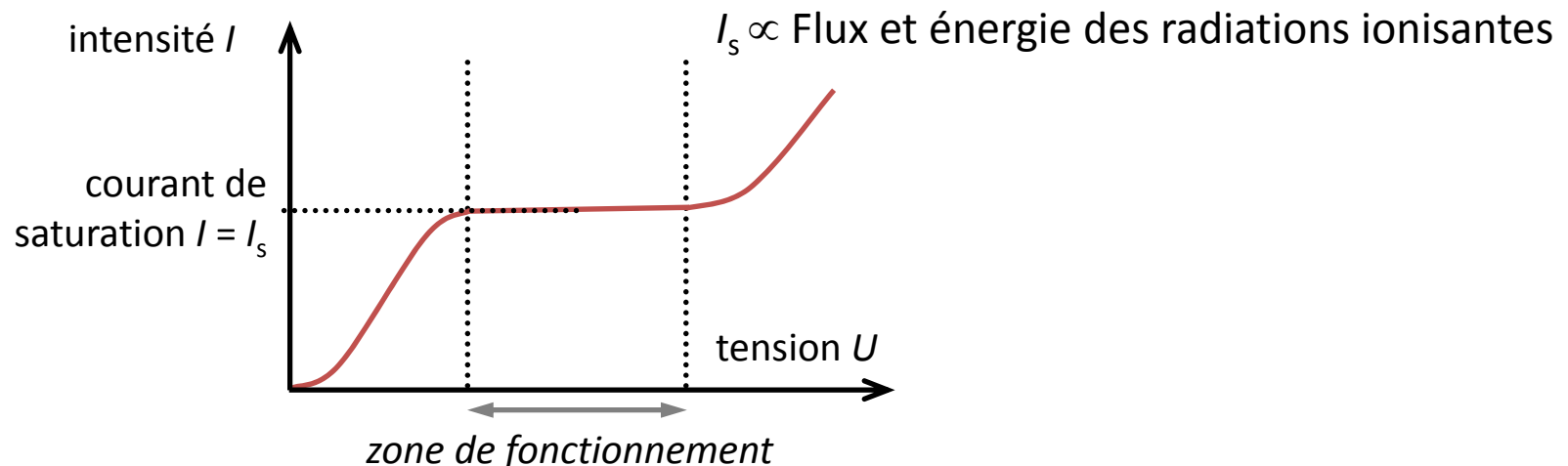
☼ **N** fonction

➤ énergie des particules ionisantes

☼ **sensibilité insuffisante** pour détecter un très petit nombre d'ionisations

➤ ne peut pas fonctionner en compteur de particules

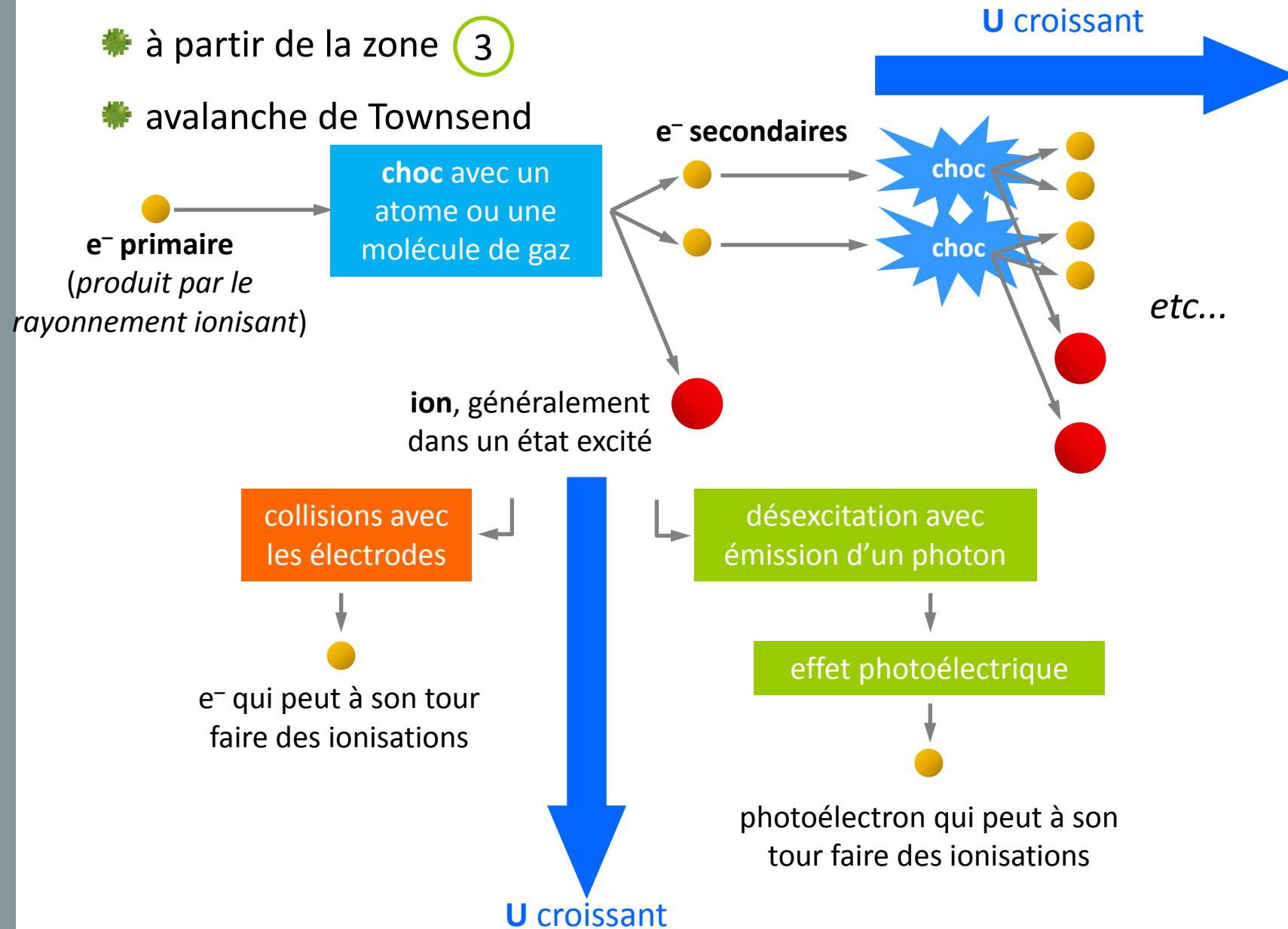
➤ spectrométrie



● ionisations secondaires

● à partir de la zone ③

● avalanche de Townsend



● Zone 3

✿ fonctionnement en mode **compteur proportionnel**

✿ ionisations secondaires à proximité de l'anode et peu nombreuses

✿ **1 ionisation primaire** → formation $n e^-$ et n ions → **amplification** ($\sim 10^5$)

✿ **nombre d' e^- collectés**

$$N = K n$$

✿ **K** nombre d'ionisations primaires

✿ **N fonction**

➤ énergie des particules ionisantes

➤ tension accélératrice U

✿ **1 particule ionisante** → **1 impulsion électrique d'amplitude détectable liée à l'énergie de la particule**

✿ **applications**

➤ compteur de particule

➤ spectrométrie

● Zone ④

✿ proportionalité diminuée

✿ zone non utilisée

● Zone ⑤

✿ fonctionnement en mode **compteur Geiger-Müller**

✿ ionisations secondaires dans tout l'espace entre les électrodes

✿ **ionisation primaire** → « **avalanche** » électronique → **amplification** ($\sim 10^{10}$)

✿ ions formés → **écran autour de l'anode** (*modification champ électrique*)

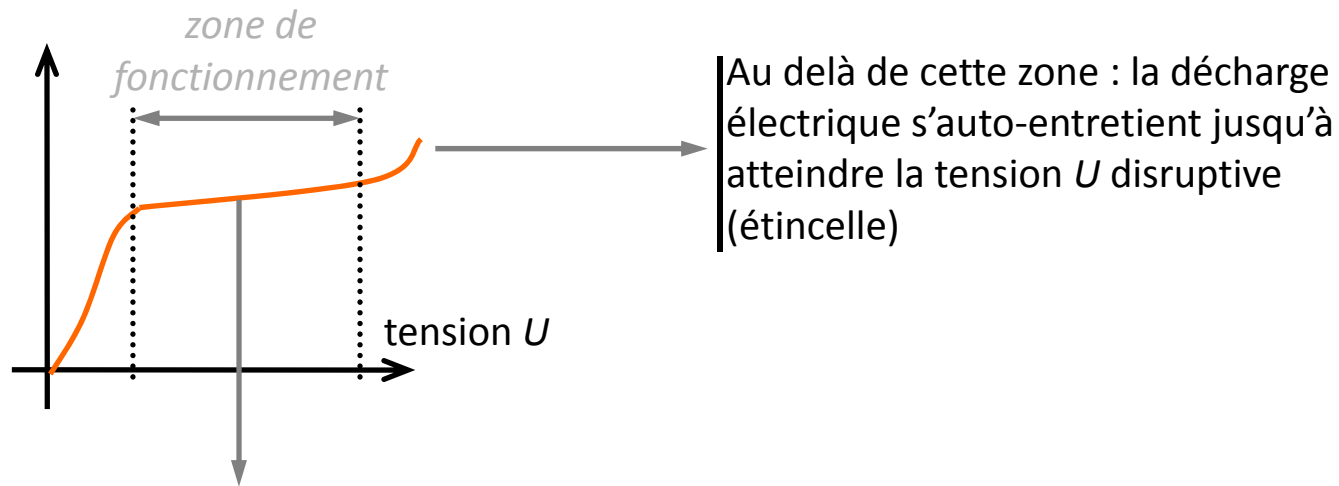
➤ **arrêt** « avalanche » électronique (*temps de décharge $\sim 10^{-7}$ s*)

✿ **application**

➤ compteur de particule

● Zone 5

- ✿ fonctionnement en mode **compteur Geiger-Müller**
- ✿ ionisations secondaires dans tout l'espace entre les électrodes



- ✿ **tension de travail au milieu du plateau**
 - compteur de particule
- ✿ **inertie du système électronique d'amplification et d'enregistrement**
 - temps mort ➔ caractéristique du compteur

1.2 Détecteurs à semi-conducteurs

● **semi-conducteurs:** matériau à conductivité électrique intermédiaire entre isolant et métal (conducteur)

- basse énergie: isolant
- haute énergie: conducteur

● **semi-conducteur intrinsèque (silicium)**

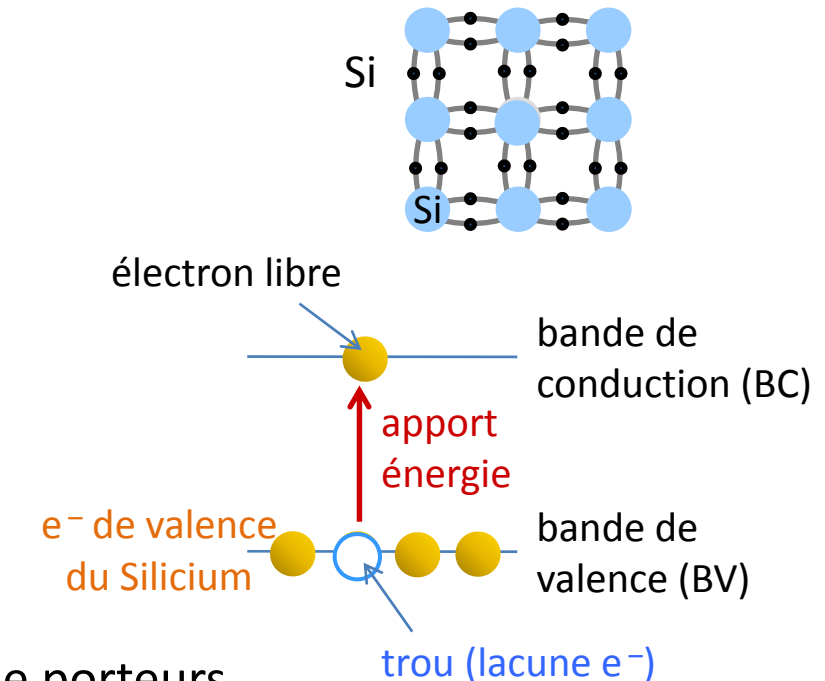
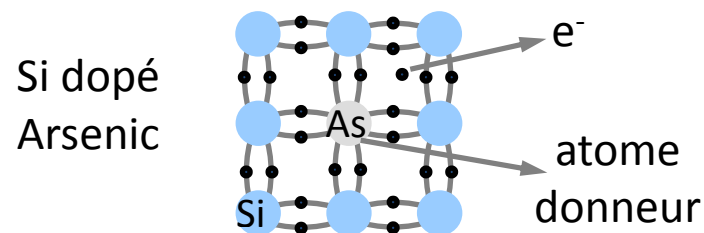
- 2 types de porteurs de courant:

électrons libres et **trous**

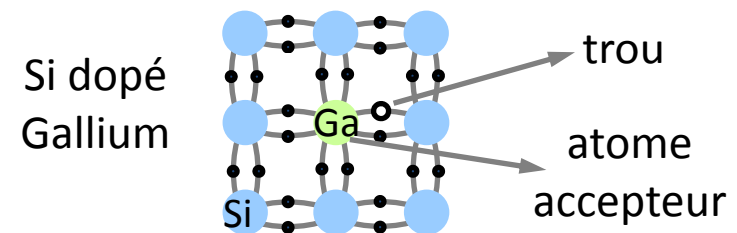
● **semi-conducteur dopés**

- impuretés qui modifient le nombre de porteurs

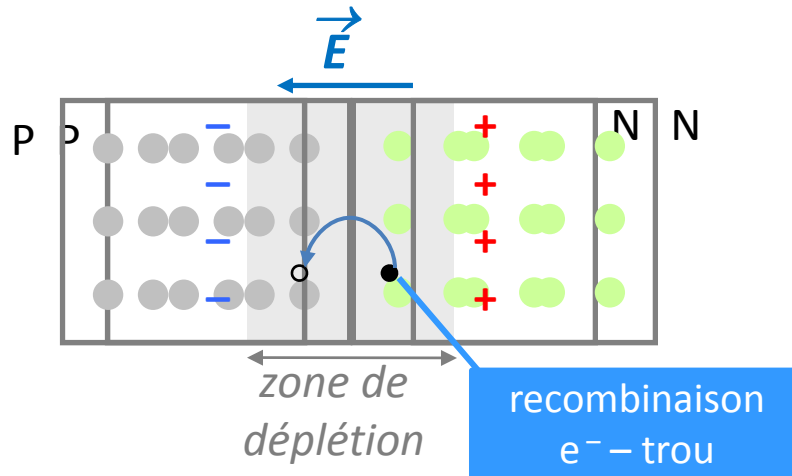
Dopage de type N (excès e^- - négatif)



Dopage de type P (excès trous - positif)

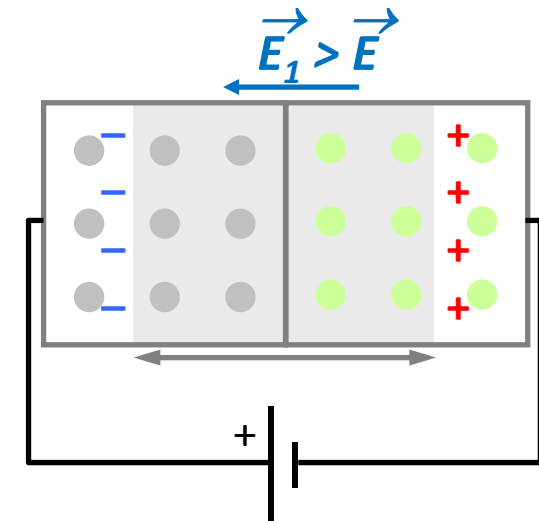


● **jonction PN:** mise en contact matériau dopé N et matériau dopé P



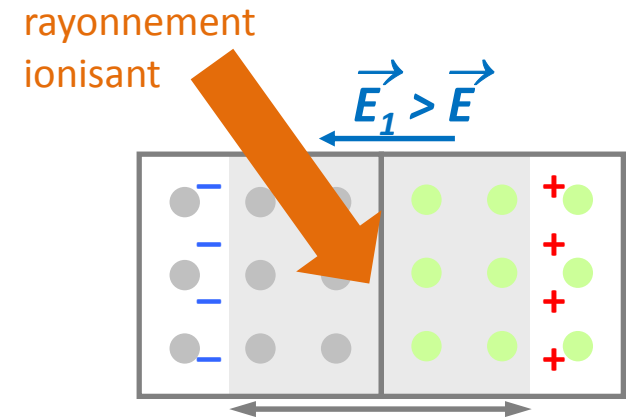
- recombinaisons paires e^- - trou
- création champ électrique (E)

- **polarisation** en sens inverse
- augmentation recombinaisons paires
- **agrandissement zone déplétion ($E_1 > E$)**



● **jonction PN:** mise en contact matériau dopé N et matériau dopé P

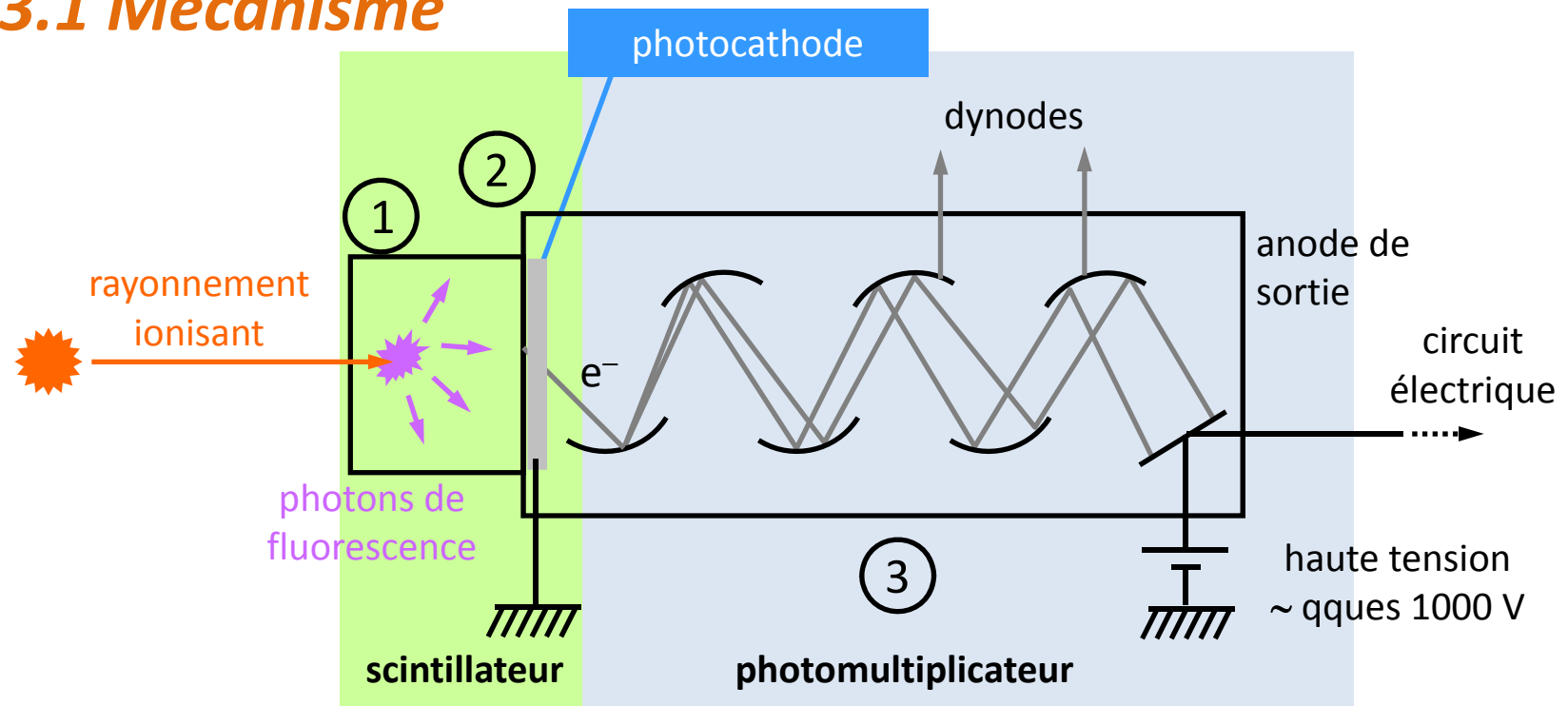
- ✿ action particules ionisantes idem **polarisation**
- ✿ **particules ionisantes** → recombinaisons paires
- ✿ **agrandissement zone déplétion ($E_1 > E$)**



- ✿ détection: **ddp induite par variation E**
 - faible tension (qqes V)
 - faible dimension
 - bonne résolution énergétique

1.3 Détecteurs à scintillation

1.3.1 Mécanisme



- ① scintillation : les rayonnements ionisants excitent les atomes du matériau qui se désexcitent en émettant des photons
- ② effet photoélectrique : un photon arrache un e⁻ de la photocathode
- ③ multiplication des électrons puis recueil du signal électrique

❶ caractéristiques d'un scintillateur

❁ **rendement lumineux** → nombre de photons de fluorescence émis par unité d'énergie des radiations incidentes

❁ **Durée de scintillation τ** → doit être la plus courte possible pour limiter les temps morts

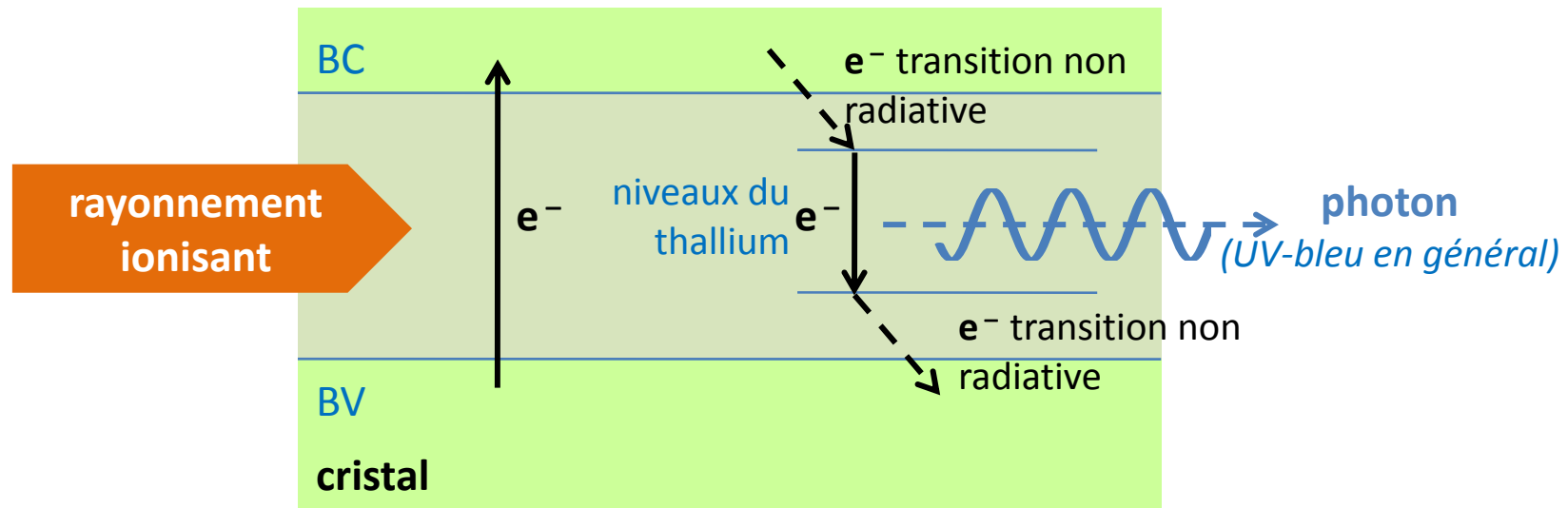
temps mort : *durée minimale pour qu'un autre rayonnement soit détecté.*

❁ **application spectrométrie** → le nombre de photons de fluorescence émis doit être proportionnel à l'énergie des radiations incidentes (***rendement lumineux stable***)

1.3.2 Les différents types de scintillateurs

● scintillateurs solides à cristaux minéraux

✿ cristal dopé par impuretés → émission rayonnement lumineux



✿ iodure de sodium (NaI) dopé au thallium (Tl) ($\lambda = 410 \text{ nm}$)

- particules α , β , protons ($\tau \sim 10 \cdot 10^{-6} \text{ s}$)

✿ sulfure de zinc (ZnS) ou sulfure de cadmium (CdS) dopé à l'argent (Ag)

- particules γ ($\tau \sim 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$) – rendement lumineux stable

● scintillateurs solides à cristaux organiques

✿ scintillateurs → molécule organique (*anthracène, naphthalène, stilbène*)

✿ molécules fixées sur un film plastique (scintillateur plastique)

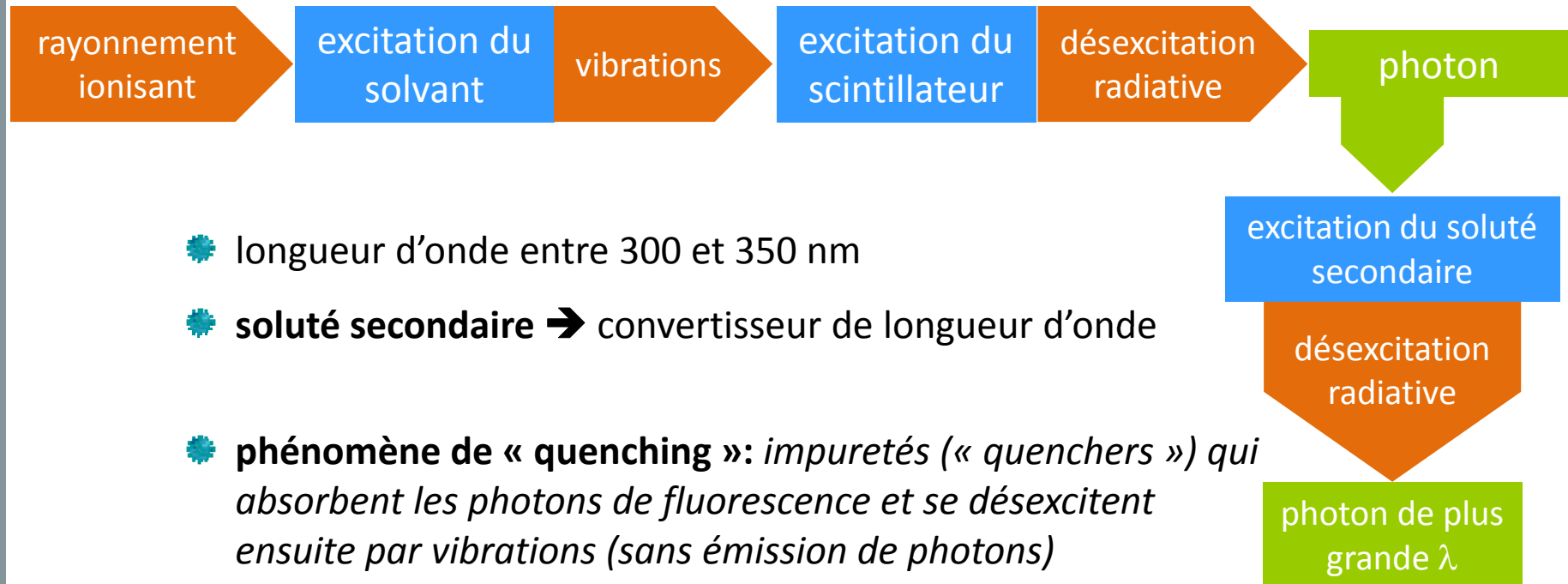
- particules β , neutrons ($\tau \sim 10 \cdot 10^{-9} \text{ s}$)
- rendement lumineux faible et non stable à haute énergie
- peu utilisés en médecine

● scintillateurs liquides

● **scintillateurs** → molécules organiques en solution

● possibilité de dissoudre l'échantillon radioactif dans le solvant

→ **totalité de l'émission dans le scintillateur**



● longueur d'onde entre 300 et 350 nm

● **soluté secondaire** → convertisseur de longueur d'onde

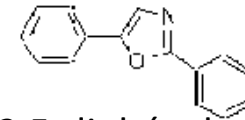
● **phénomène de « quenching »**: impuretés (« quenchers ») qui absorbent les photons de fluorescence et se désexcitent ensuite par vibrations (sans émission de photons)

- exemple : oxygène (barbotage azote)

● scintillateurs liquides

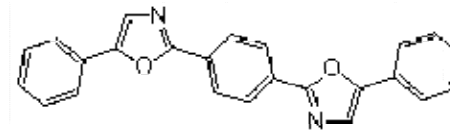
✿ **solvants** → carbures, éther, toluène, dioxane, xylène

✿ **solutés scintillateurs** → aromatiques



PPO : 2,5-diphényloxazole

✿ **soluté secondaire**



POPOP : 1,4-di(5-phenyl-2-oxazolyl)benzène

✿ **très utilisé en biologie** (bonne détection des β de ^{14}C et ^3H)

- particules β , neutrons ($\tau \sim 10 \cdot 10^{-9} \text{ s}$)

scintillateurs gazeux

 même principe que les scintillateurs solides

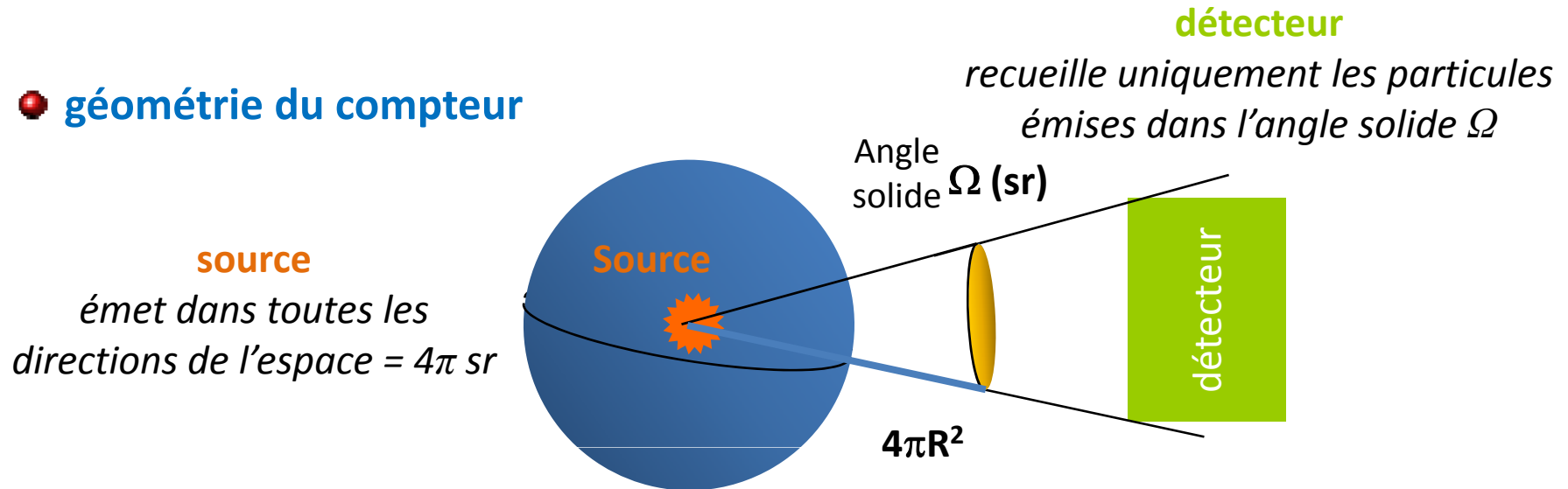
 rendement faible mais stable

- peu utilisés en médecine
- utilisés surtout en spectrométrie

2. Mesure des rayonnements

2.1 Performance d'un détecteur

● géométrie du compteur



● bruit de fond et mouvement propre

✿ **basses fréquences (BF)** mesurées en l'absence de source radioactive

- ✿ rayonnement cosmique
- ✿ radioactivité ambiante
- ✿ contamination éventuelle du détecteur
- ✿ agitation thermique (pour les scintillateurs)

● sensibilité de la détection

- ✿ plus faible activité détectable

 - ✿ lié à bruit de fond

 - ✿ seuil de détection **$S/B < 1$**

● efficacité de la détection

- ✿ rapport entre le flux incident et le nombre d'évènements détectés

 - ✿ lié **principalement** à l'énergie du rayonnement, type de particule, compteur

● temps mort τ

- ✿ durée minimale pour qu'un autre rayonnement soit détecté

 - ✿ compteurs actuels → **taux de comptages élevé (jusqu'à 10^8 événements/seconde)**

● linéarité

- ✿ détecteur linéaire si comptage proportionnel au flux incident

2.2 Mesures quantitatives

● taux de comptage

✿ nombre d'impulsions par unité de temps par le compteur (imp.s^{-1})

$$n_{net} = n_{brut} - BF$$

● rendement du comptage

$$R = \frac{n_{net}}{A} \quad \text{✿ } A \text{ activité de l'échantillon}$$

✿ R fonction plusieurs paramètres

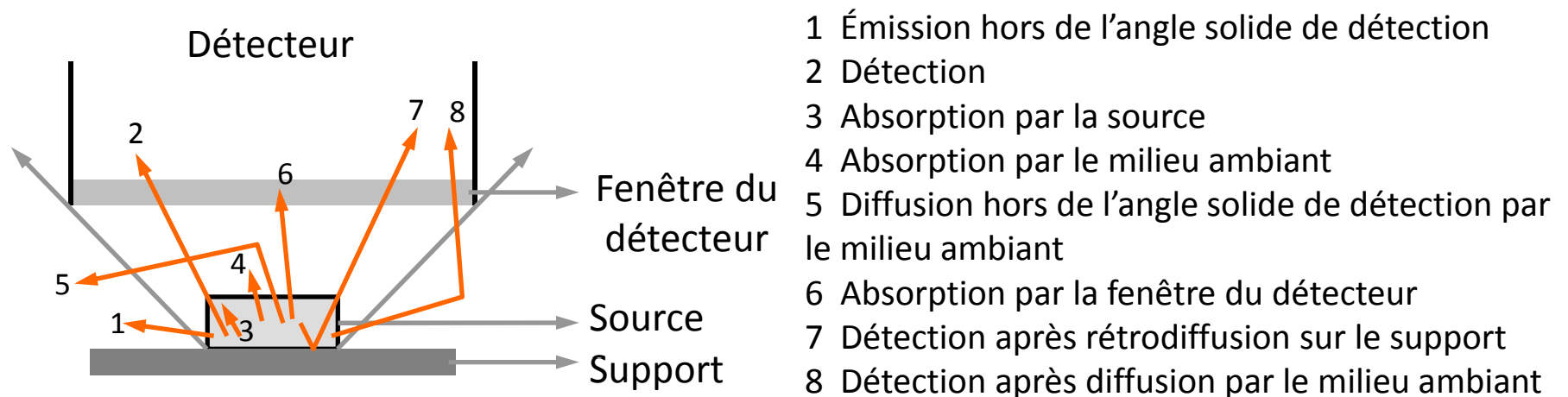
- ✿ du type de désintégration
- ✿ de la géométrie du compteur
- ✿ de l'efficacité du compteur

☀ type de désintégration

☀ relation entre activité A et nombre de particules émises par unité de temps n

➔ Prise en compte des différents rapports d'embranchements et probabilités de désexcitation des noyaux fils

☀ géométrie du compteur



☀ facteur géométrique G

➔ prise en compte de Ω (angle solide), de la géométrie de la source et de toutes ces possibilités

nombre de particules qui pénètrent dans le détecteur par unité de temps $n' = G n$ nombre de particules émises par la source par unité de temps

● mesures absolues

☀ R connu : la mesure de n_{net} donne l'activité A

☀ plus facilement : source étalon d'activité A_e connue

→ pour une autre source du même radioélément

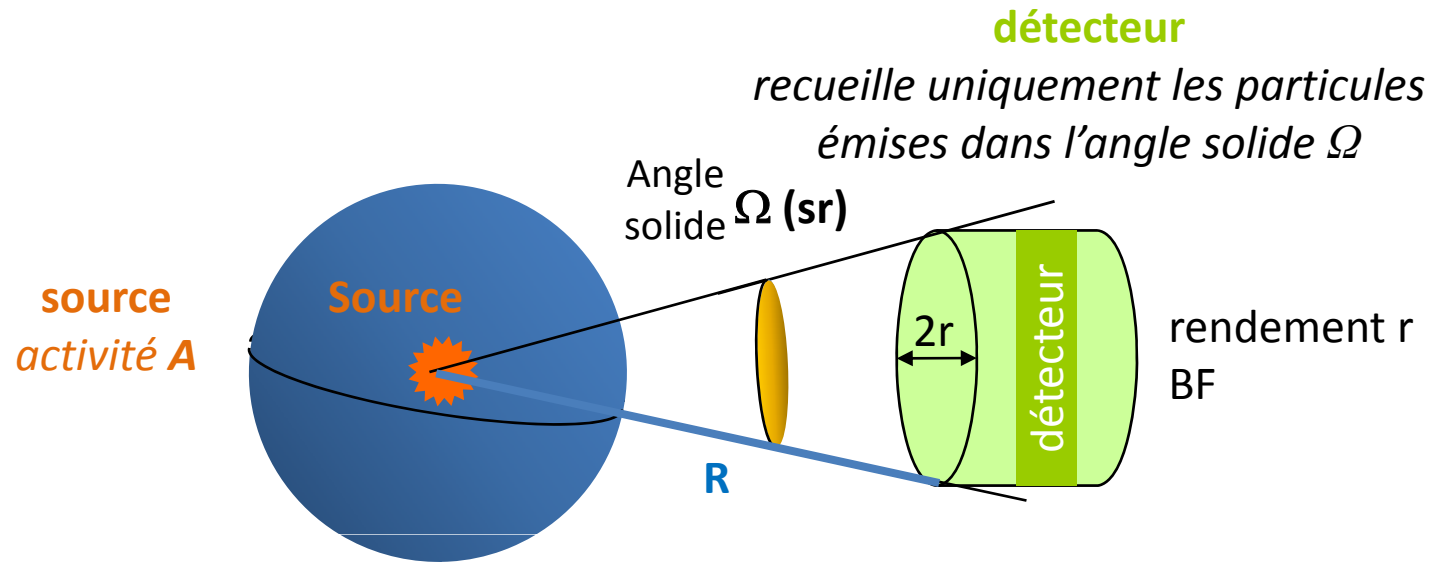
$$A = A_e \frac{n_{net}}{n_{net_e}}$$

● mesures relatives

☀ comparaison des taux de comptage (au cours du temps, avec différentes épaisseurs d'écran,...)

→ détermination de la période, de CDA, ...

● exemple



☼ taux de comptage brut

$$n_{\text{brut}} = n_{\text{net}} + \text{BF}$$

$$R = \frac{n_{\text{net}}}{A}$$

$$n_{\text{brut}} = AR + \text{BF} = AGr + \text{BF}$$

☼ G fraction de rayonnement reçu $G = \frac{\pi r^2}{4\pi R^2}$

Caractéristiques des principales sondes utilisées pour la mesure des contaminations de surface

Détecteur	Rayonnements détectés	Rendement de détection sur 4π (*)	Bruit de fond	Observations
Compteur Geiger -Müller à fenêtre mince (1,5 mg/cm ²)	α toutes énergies β d'énergie > 30 keV	15% 5 à 20%	1 c/s	Sensible également aux X et γ avec un faible rendement
Compteur Geiger -Müller à fenêtre épaisse (56 mg/cm ²)	β d'énergie > 250 keV γ d'énergie > 10 keV	3 à 5% < 1%	1 c/s	A réserver aux β d'énergie élevée (³² P par exemple)
Photomultiplicateur avec scintillateur ZnS	α toutes énergies	15 à 20%	< 0,1 c/s	
Photomultiplicateur avec scintillateur plastique	β d'énergie > 300 keV	20 à 40%	3 c/s	A réserver aux β d'énergie élevée (³² P par exemple)
Photomultiplicateur avec scintillateur NaI mince (3 mm)	Photons X et γ De 5 à 250 keV	15 à 20%	10 c/s	Détecte aussi les γ d'énergie > 250 keV avec un rendement faible
Photomultiplicateur avec scintillateur NaI épais (25 mm)	Photons X et γ d'énergie > 250 keV	10 à 20%	25 c/s	
Compteur proportionnel scellé	α ou (selon modèle) β, X, γ	10% 10 à 40%	Pour 200cm ² 0,1 c/s 20 c/s	Possibilité de disposer de compteurs de grande surface
Compteur proportionnel à circulation de gaz	α et β, X, γ	10% 10 à 40%	Pour 200cm ² 0,1 c/s 20 c/s	Possibilité de disposer de compteurs de grande surface

[*] Le rendement de détection sur 4π est le rapport entre le nombre d'impulsions délivrées par le détecteur et le nombre de rayonnements émis par la source en 4π . Les chiffres indiqués pour le rendement et pour le bruit de fond sont des ordres de grandeur : ils varient selon le modèle de l'appareil. Pour plus de précision, il convient, dans tous les cas, de se reporter à la fiche technique du fournisseur.

fiches sécurités © CNRS

Tableau récapitulatif des appareils utilisés habituellement pour détecter et mesurer la contamination de surface et de personnes.

	Chambre d'ionisation	Geiger-Muller	Semi-conducteur	Scintillations	
Type rayonnement détecté	I Na (Ti) X _≥ 5KEV ^(125I) γ _≥ 30KEV	β(¹⁴ C ³⁵ S ³² P) X et γ	X et γ	α SZn(Tl)	β X et γ I Na(Tl)
Gamme de débit	1μ à 0,1 Sv Sv/h	0,1 mSv à 10 mSv/h	1 mSv à 0,1 Sv/h		
Gamme d'énergie	30 Kev à 2 Mev ±15%	50 keV à 1,3 Mev ±30%	70 Kev à 1Mev ±20 à 30%		
Gamme de dose	50 mSv à 10 Sv	1 mSv à 10 Sv	1mSv à 1 Sv		
Rendement	X et γ ≅ 5 à 10% α, β peut atteindre 100%	α, β ≅ 100% X et γ ≅ 1%			
Applications	Appareil d'alerte contrôle des personnes Mesure de débit de dose	β : Appareil d'alerte à seuil Contrôle des personnes et des surfaces X, γ : Un par type de rayonnement donné		Appareil d'alerte Contrôle des personnes	Appareil d'alerte Contrôle des personnes
Avantages		Mesure de débit dose robuste alarme sonore	Mesure de débit dose robuste petite taille possible		Bon rendement lumineux
Inconvénients	Sensibilité aux chocs et aux variations de condition atmosphérique	Ne détecte pas les photons de basse énergie et les β < qlques 10 Kev β sensibilité variable, durée de vie limitée selon le type et l'énergie du rayonnement	Sensibilité variable surtout aux énergies du radiognostic médical		Fortement hygroscopique sensible à la lumière et variation température

La Radioprotection en laboratoire de recherche © INSERM