

L'image scintigraphique

Pr J-N Talbot et Pr J-Y Devaux
Médecine Nucléaire
Université Pierre et Marie Curie

Mars 2006

Les domaines de la Médecine Nucléaire

Utilisation de radioéléments en sources non scellées dans un but médical

- Les rayons gamma pour le diagnostic
 - **la scintigraphie et la TEP**
 - la détection per-opératoire
 - la radio-immunologie
- Les rayons bêta pour le traitement
 - la radiothérapie interne vectorisée

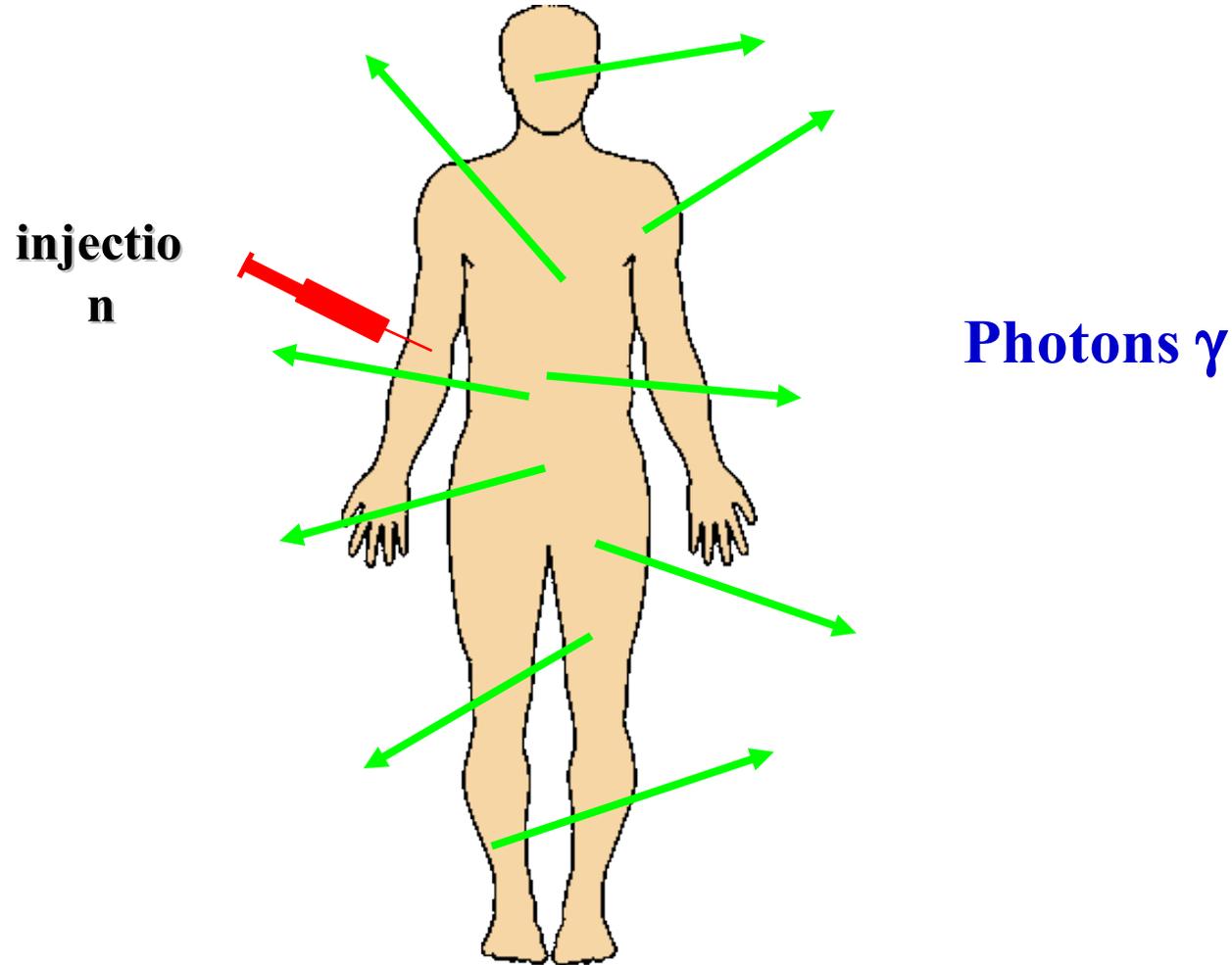
Quelques données sur la MN en France

- **Les hommes**
 - **600** spécialistes – médecins nucléaires
 - **900** techniciens (manipulateurs - infirmiers– techniciens)
- **Les équipements**
 - **240** services de Médecine Nucléaire
 - **460** gamma-caméras
 - **75** TEP autorisées (*40 opérationnelles*)
 - **60** chambres radioprotégées
 - **100** laboratoires de radio-immunologie

Pourquoi « nucléaire »

- L'origine des rayonnements est dans le « noyau » des atomes
- Un radionucléide est une des formes radioactives ([isotopes](#)) d'un élément naturel
- L'activité est faible et parfaitement connue
- Sa mesure est facile et sensible

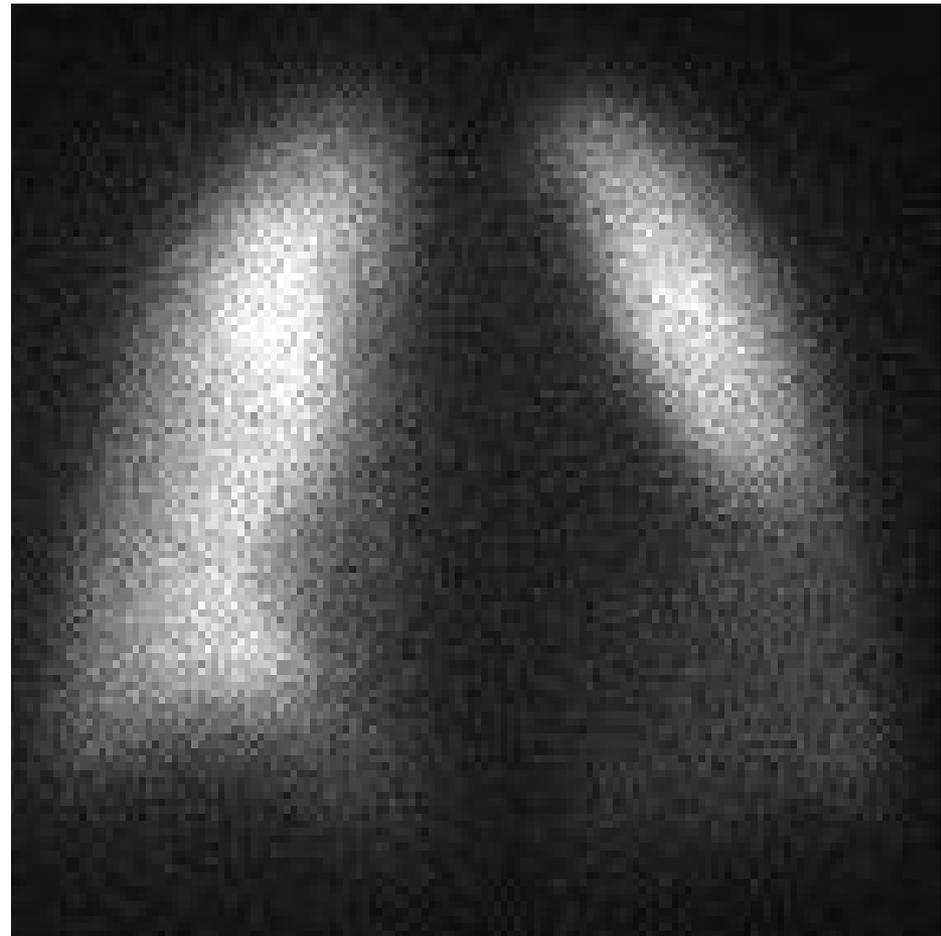
Administration in-vivo d'un produit radioactif => image fonctionnelle



Imagerie anatomique ou fonctionnelle ?



Radiographie pulmonaire
de face



Scintigraphie pulmonaire de
perfusion - face antérieure

Embolie pulmonaire gauche

face
antérieure

face
postérieure

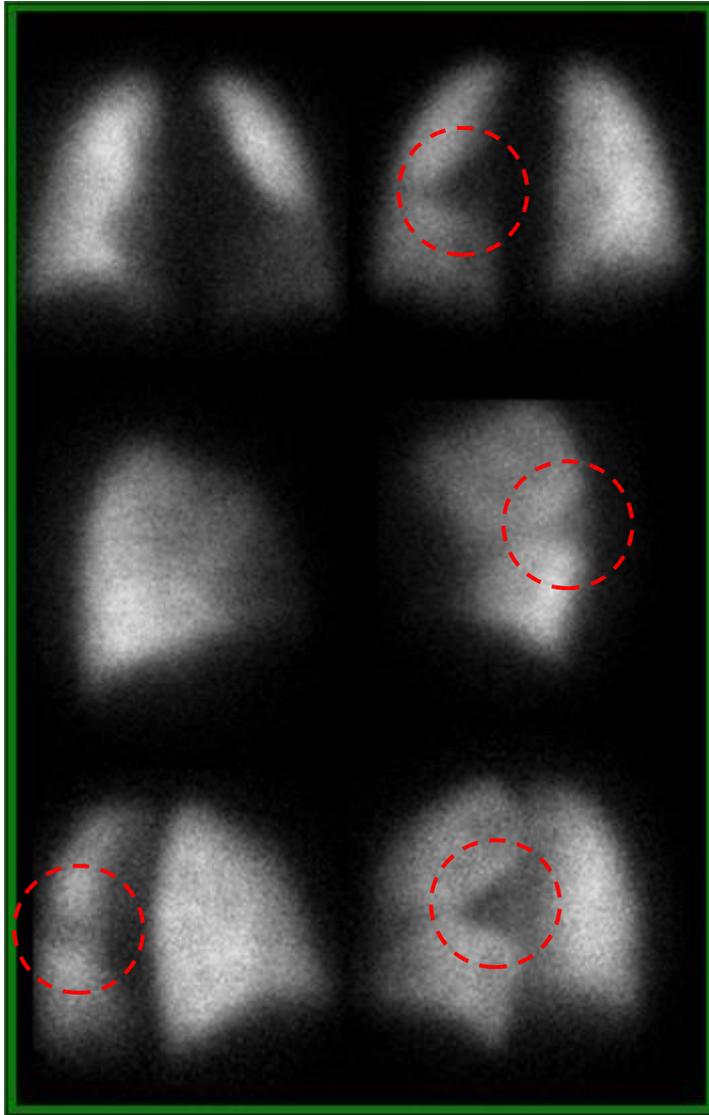
profil
droit

profil
gauche

oblique
postérieur
droit

oblique
postérieur
gauche

Perfusion
Pulmonaire



Comparaison radiographie / scintigraphie

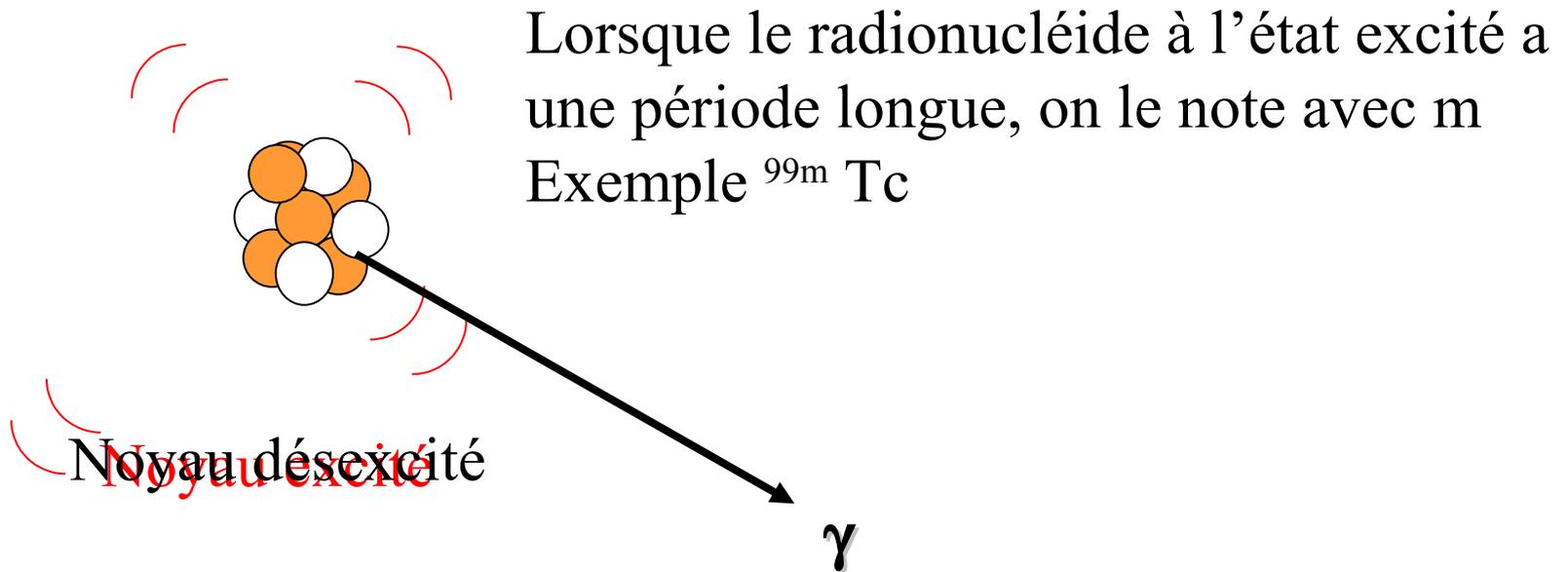
	Radiographie	Scintigraphie
Débit de photons	élevé ($> 10^{12}$ /s)	faible ($< 10^5$ /s)
Durée d'examen	$\cong 1$ s	10 à 20 min
Durée d'exposition	$\cong 1$ s	10 à 72 h
Irradiation	comparable	
Dose / cliché	proportionnelle	indépendante
Renseignements	anatomiques	fonctionnels
Infos quantitatives	non	oui

Types de radionucléides utilisables en médecine

- Désintégration α (thérapie)
- Transition isobarique
 - β^-
 - β^+ (positons)
 - Capture électronique
- Transition isomérique (émission γ)

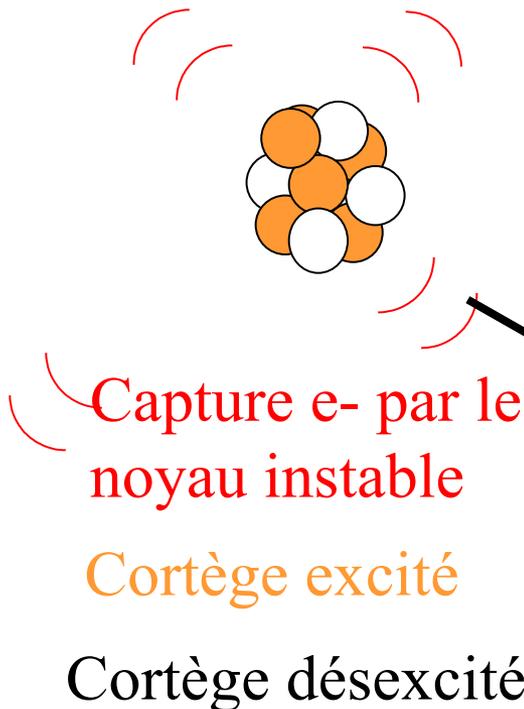
L'émission γ

Excès d'énergie interne du noyau :



La capture électronique

Excès de protons dans le noyau : $p^+ + e^- \Rightarrow n + \nu$



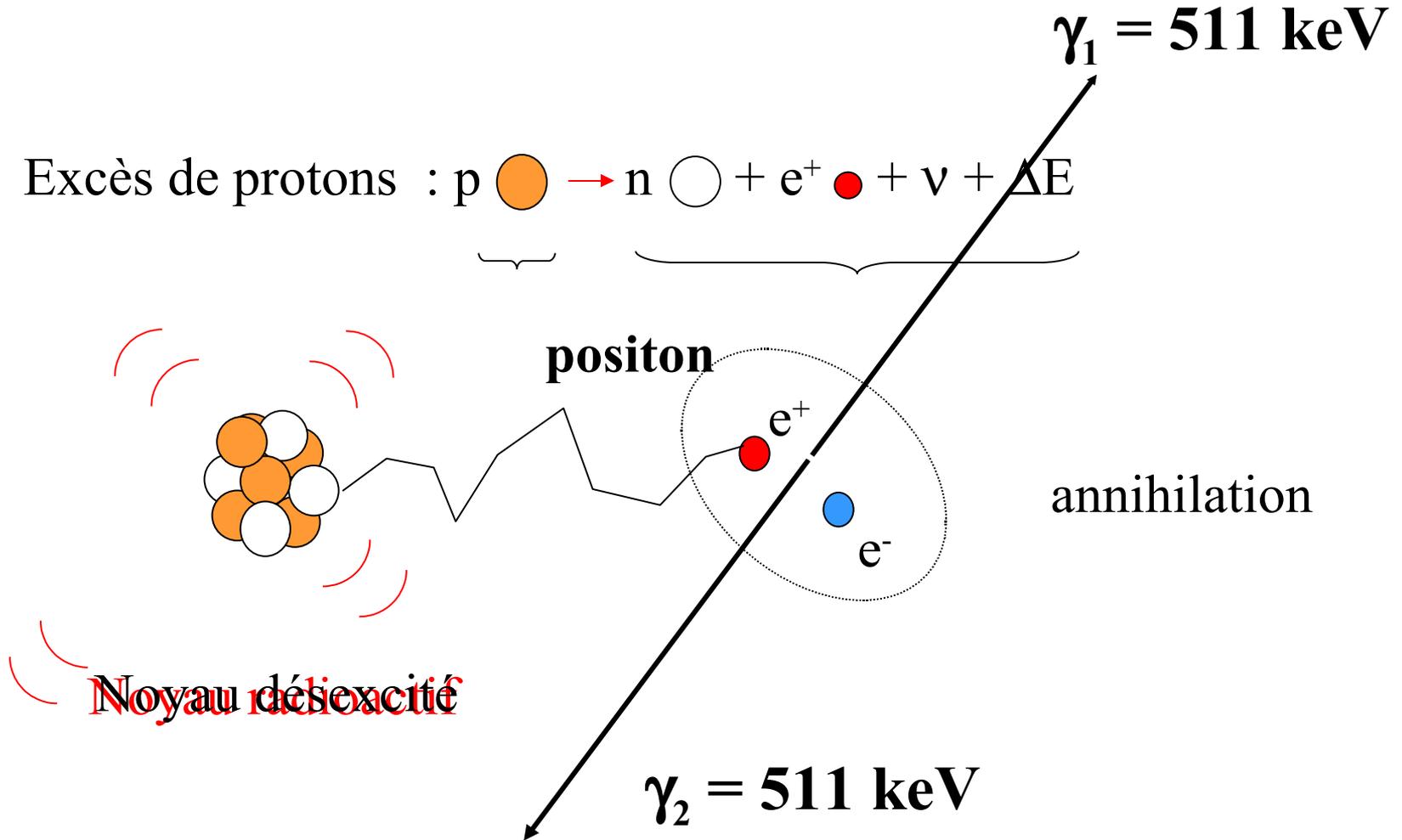
Dans certains cas les photons X émis ont une énergie suffisante pour permettre la scintigraphie (ex: ^{201}Tl).

Dans d'autres cas, des photons γ sont également émis (ex: ^{123}I).

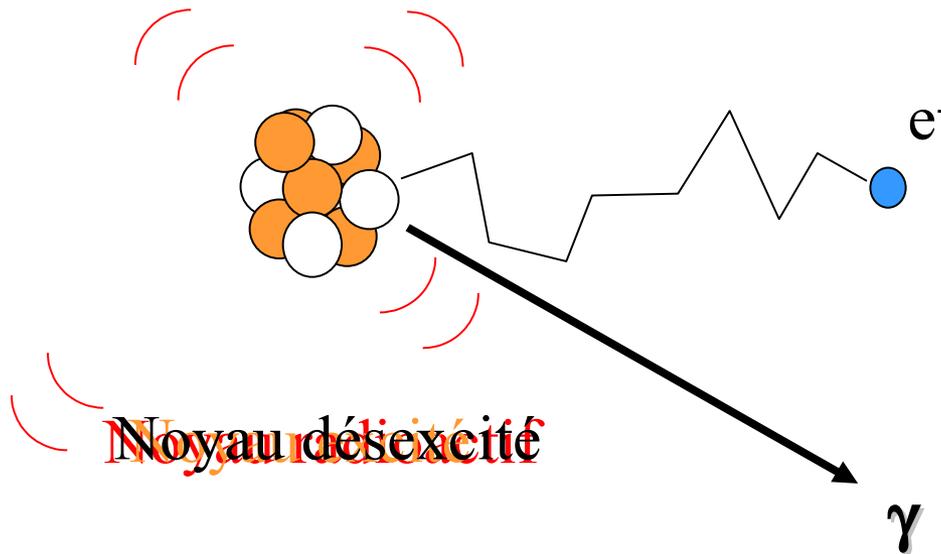
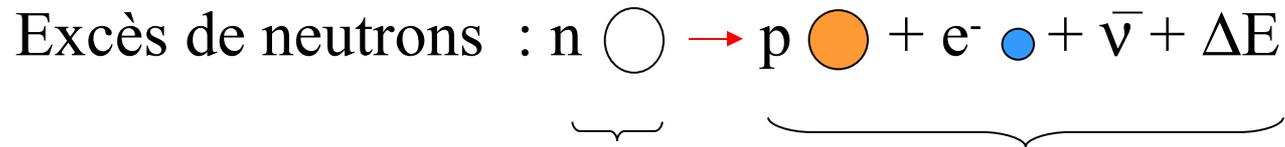
X

La désintégration β^+

Excès de protons : $p \rightarrow n + e^+ + \nu + \Delta E$



La désintégration β^-



Surtout utilisée pour
thérapie avec (ex ^{131}I)
ou sans (ex ^{90}Y) γ

Photons γ et rayons X

- Un seul type de photons
- Dualité onde et corpuscule, pas de masse
- Entièrement caractérisés par leur énergie
- Unité : l'électron-volt **eV** (keV, MeV)
- Ne se distinguent que par leur origine :
 - Rayons X, réarrangement du **cortège électronique**
 - Rayons γ , désexcitation du **noyau atomique**

L' »équation » scintigraphique

un radiopharmaceutique émetteur γ

+

un détecteur spécifique : la gamma-caméra

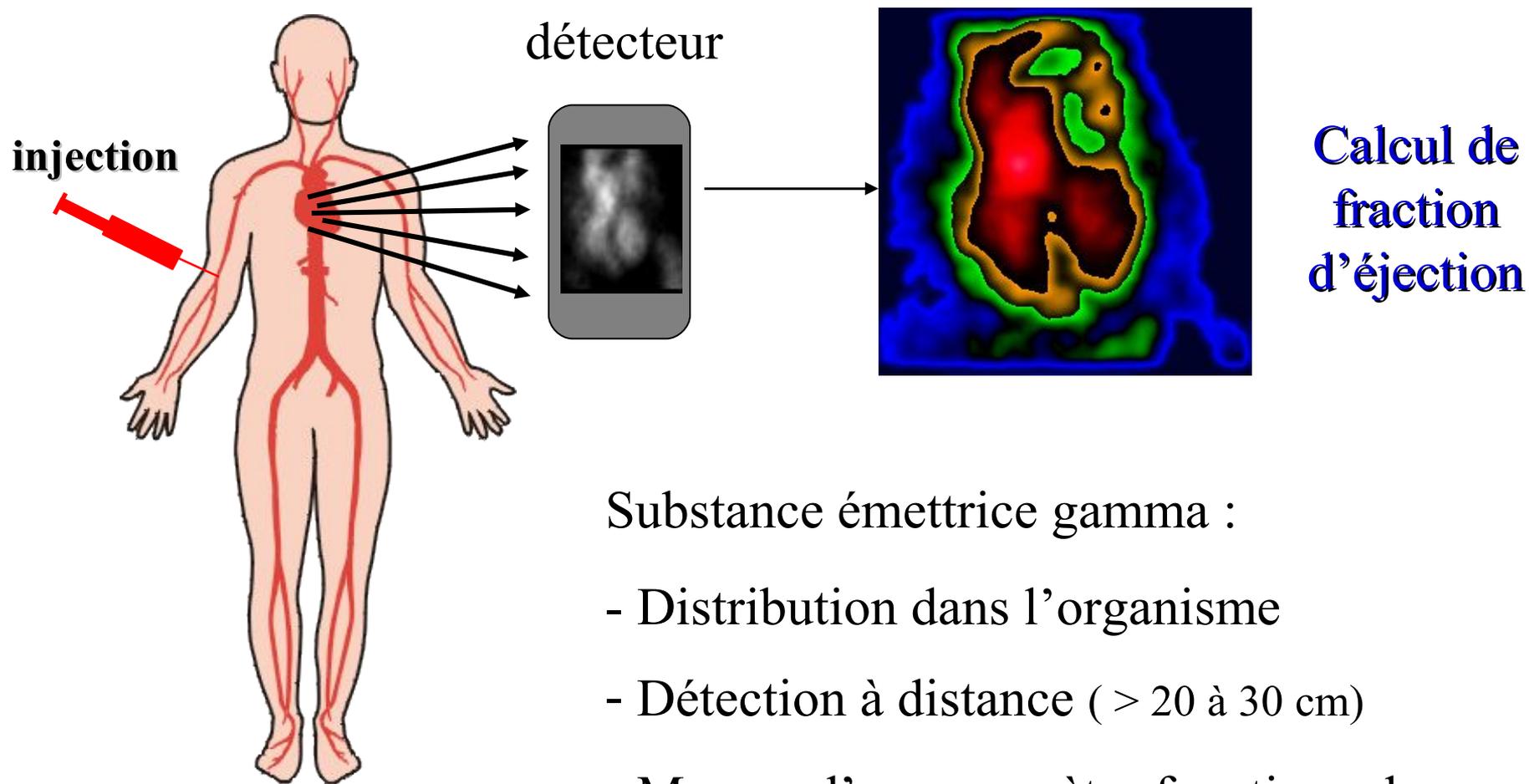
=

image fonctionnelle (*métabolique*)

+

Complément de l'imagerie anatomique pure
information quantifiable

Principe de la scintigraphie



Substance émettrice gamma :

- Distribution dans l'organisme
- Détection à distance (> 20 à 30 cm)
- Mesure d'un paramètre fonctionnel

Un examen simple

- Injection intraveineuse (90 % des cas)
- Attente **variable** dépendant du phénomène biologique
 - de quelques s à quelques jours
- Enregistrement des images
 - Un ou plusieurs clichés
 - Parfois plusieurs dates (4h, J+1, J+2...)
- Traitement de l'image

L'injection du radiopharmaceutique



Le radiopharmaceutique émetteur de photons (γ)

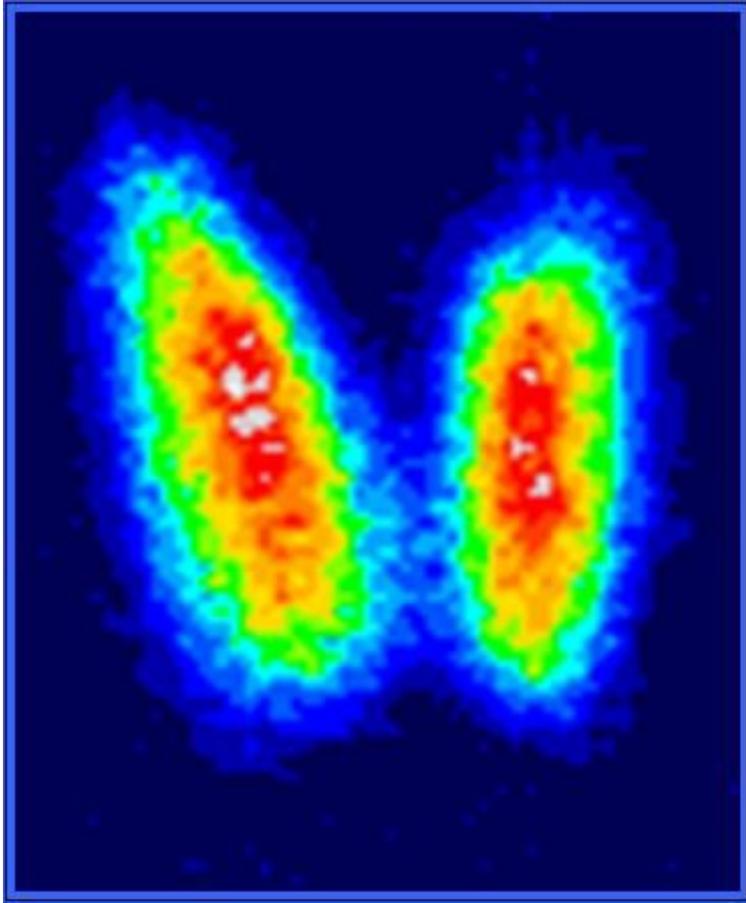
Les médicaments radiopharmaceutiques
ne peuvent être détenus et utilisés que
dans un service de Médecine Nucléaire

Types de radiopharmaceutiques

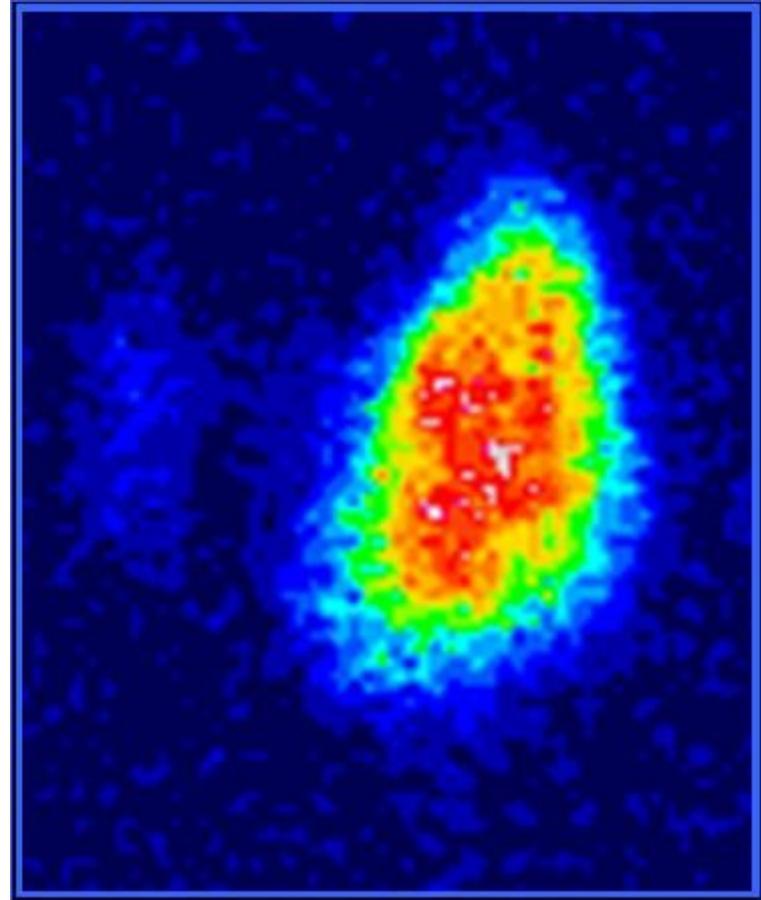
- des radionucléides simples (exemple ^{123}I)
- des molécules radiomarquées « simples » :
molécules phosphorées, analogues du
glucose, des acides aminés, des acides gras...
- des molécules radiomarquées plus
complexes: ligands des récepteurs
hormonaux, anticorps
- des cellules (GR, GB et plaquettes)
- ...

Scintigraphie de la thyroïde à l'iode 123.

Radiopharmaceutique = radionucléide



Normal



Pathologique : un nodule assume presque toute la fonction

Le radionucléide le plus utilisé

- Le technétium ^{99m}Tc :
 - élément « artificiel »
 - facilement disponible (générateur de ^{99}Mo)
 - énergie des γ : 140 keV, bien adaptée aux gamma-caméras
 - émission γ pure
 - période radioactive courte : 6h
 - Peut marquer de nombreuses molécules
- molécule + radionucléide = radiopharmaceutique
considéré comme médicament

Infection sur prothèse de hanche



Polynucléaires marqués au ^{99m}Tc

Autres radionucléides

Radionucléides	Energie γ ou X	Période	Utilisation
Thallium ^{201}Tl	70 keV	73 h	Myocarde
Iode ^{123}I	159 keV	13 h	Thyroïde
Indium ^{111}In	171 keV 245 keV	67 h	Récepteurs cellules
Krypton $^{81\text{m}}\text{Kr}$ (générateur)	190 keV	13 s	Ventilation pulmonaire
Iode ^{131}I	364 keV 630 keV	8 j	Thyroïde (cancer)

L'irradiation médicale en diagnostic

- ✓ La mesure des risques : le sievert (Sv)
 - Radiographie pulmonaire : 0,3 mSv
 - Scintigraphie thyroïdienne : 1 mSv
 - Scintigraphie pulmonaire : 2,5 mSv, possible même en cas de grossesse
 - Scintigraphie osseuse : 4 mSv
 - Scanner abdominal : 15 mSv
- ✓ Aucun effet observable en dessous de **200 mSv** pour une irradiation unique
- ✓ Irradiation naturelle en France : 2,5 mSv / an

En scintigraphie, l'irradiation n'augmente pas avec le nombre de clichés et la durée de l'examen.

Acquisition de l'image



Philips



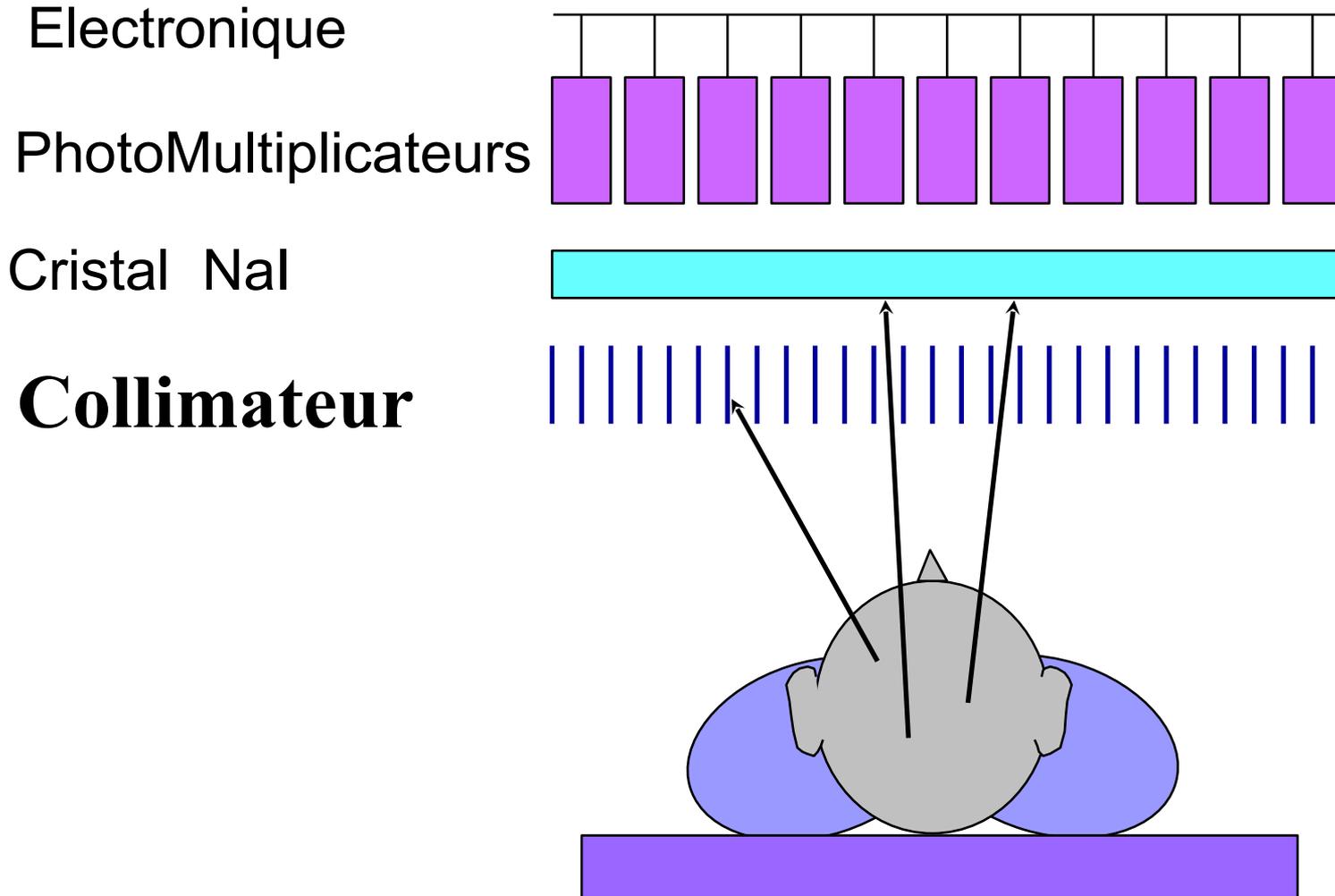
GEMS

La gamma-caméra

Principe de la gamma-caméra

- Les gamma-caméras fonctionnent sur le principe de base de H. Anger (1960).
- La détection :
 - cristal de NaI
 - photomultiplicateurs (PM)
- La localisation :
 - de la scintillation dans le cristal

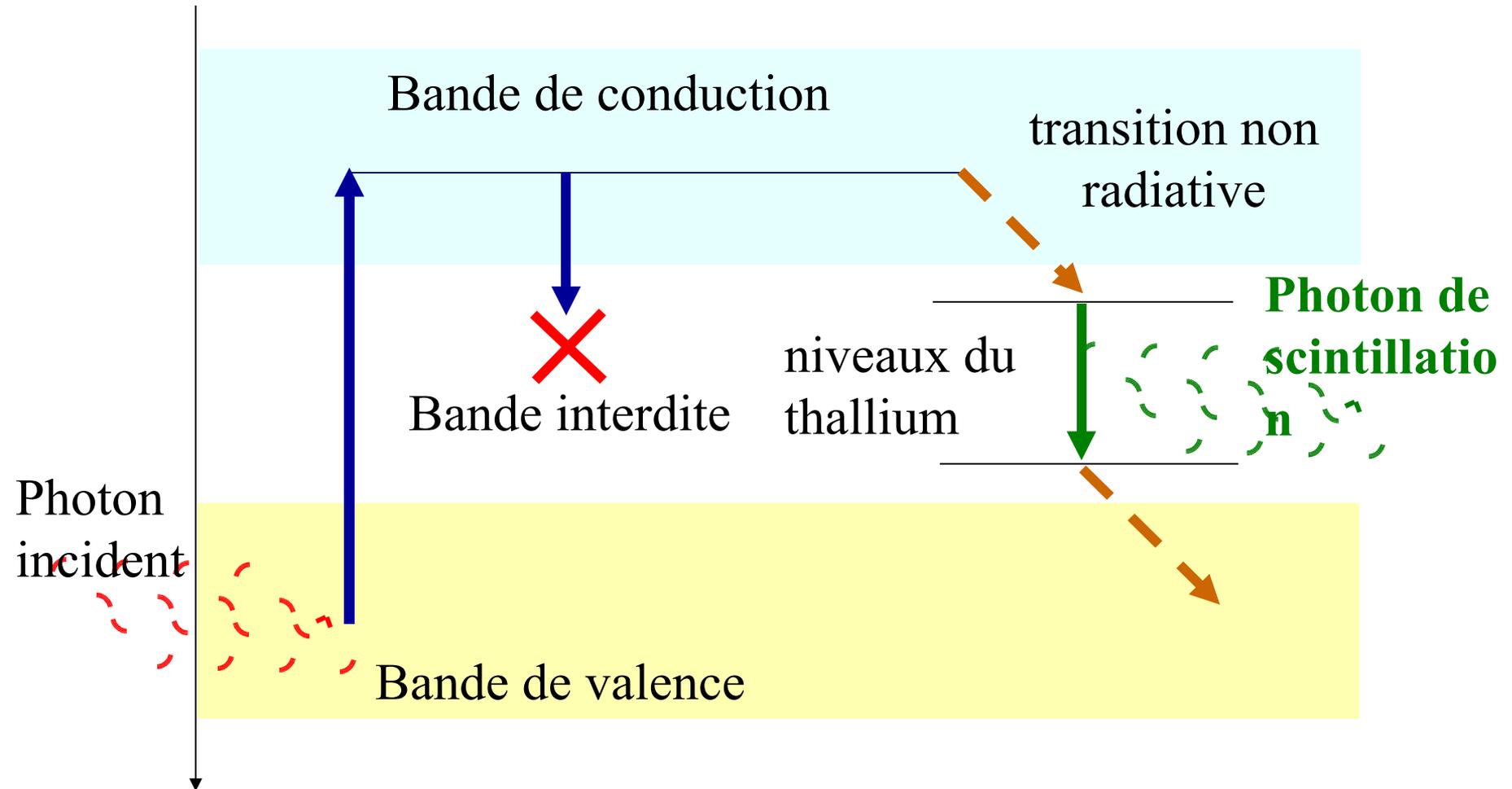
La caméra à scintillation



Le scintillateur-type : NaI

- Monocristal d'iodure de sodium
- Permet de fabriquer des détecteurs de forme diverses (cylindre, galette, barreau...)
- Détecte les ionisations mais aussi les excitations produites par les rayonnements dans le matériau détecteur
- Assure la transformation de toute l'énergie recueillie du photon incident en un flash (la **scintillation**) lumineux, proportionnel.
- Doit être activé au thallium (Tl) pour assurer un bon rendement de luminosité.
- Il faut le protéger de toute trace d'humidité
- Très sensible aux chocs mécaniques et thermiques.

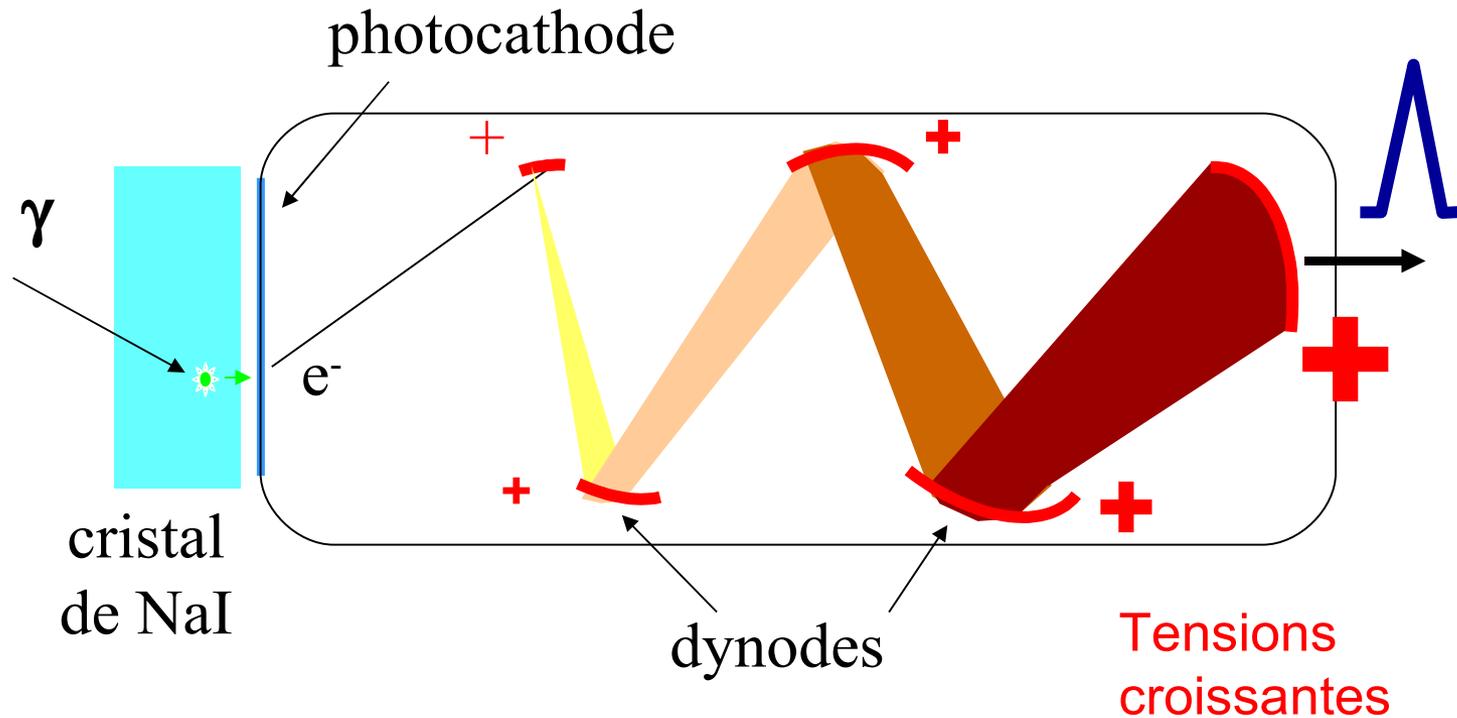
Le cristal de NaI (Tl)



Recueil de la scintillation

- Le cristal NaI (Tl) est un transformateur d'énergie.
- Le nombre de photons ré-émis par les impuretés de thallium est **proportionnel** à l'énergie perdue par le photon incident dans le NaI.
- Comme la scintillation est de faible intensité ($2,24 \cdot 10^{-14}$ Joules), il faut amplifier le signal. C'est le rôle des **photomultiplicateurs**.

Le photomultiplicateur (PM)

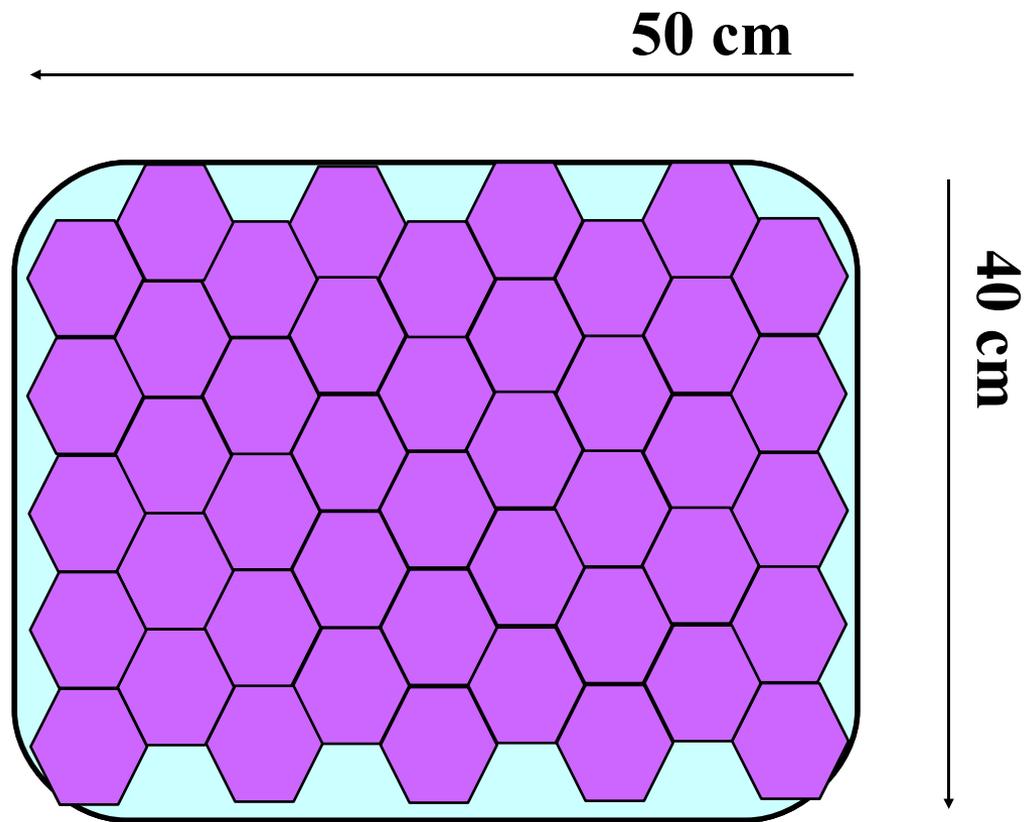


La scintillation provoque un effet photoélectrique sur la fenêtre du PM. Chaque électron est accéléré par les dynodes successives où il arrache plusieurs électrons, entraînant une cascade multiplicatrice. Le **signal** est recueilli à la sortie du PM et entre dans un circuit de mesure.

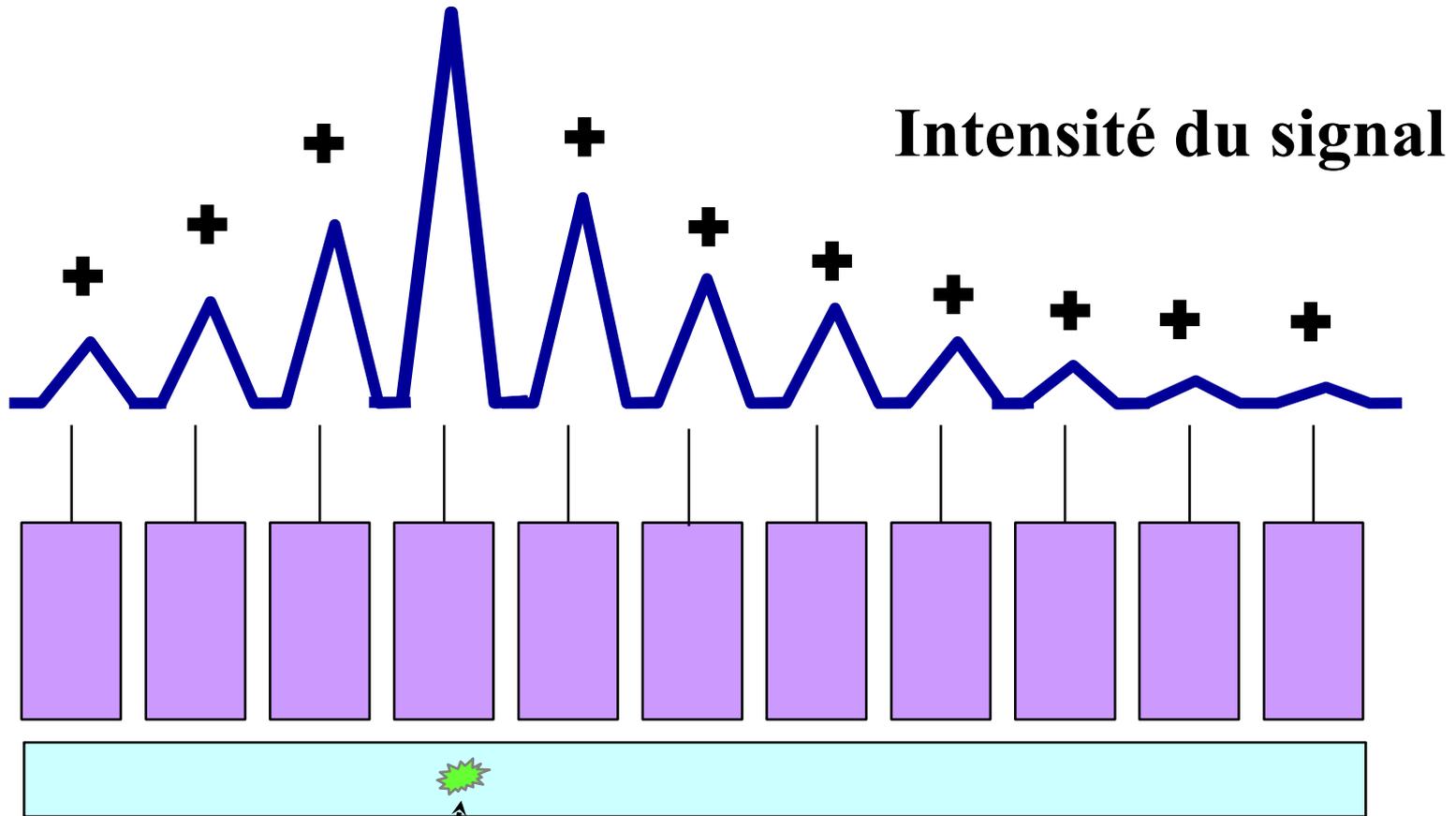
Le recouvrement du cristal



Photomultiplicateurs



La localisation globale



**La somme des intensités
donne l'énergie du photon**

Précision de la localisation

Tous les photomultiplicateurs participent à la détermination de localisation de **chaque** photon

Diamètre d'un PM ≈ 5 cm

Nombre de PM par détecteur ≈ 50

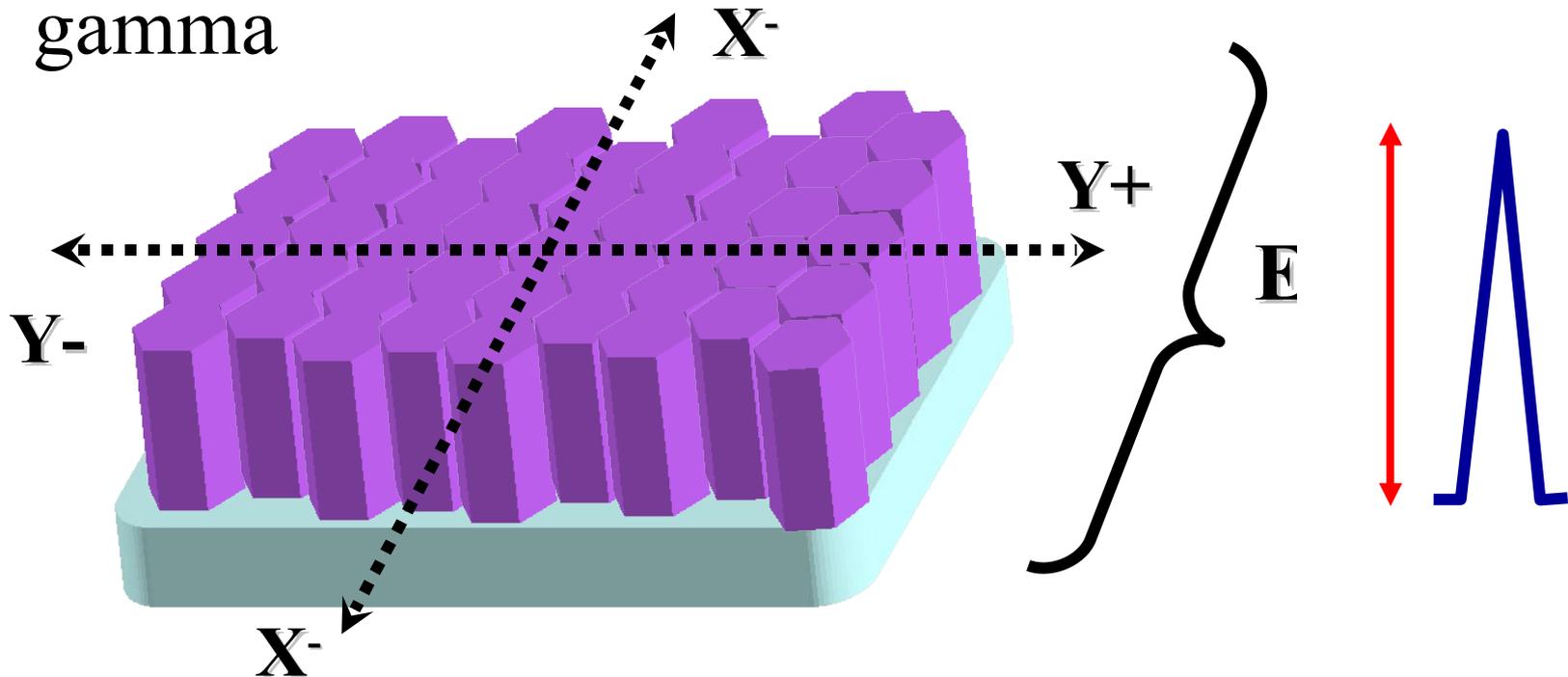
Précision de localisation : 2-3 mm

Les informations disponibles

Chaque photon est analysé individuellement

Signaux X et Y de localisation dans le plan

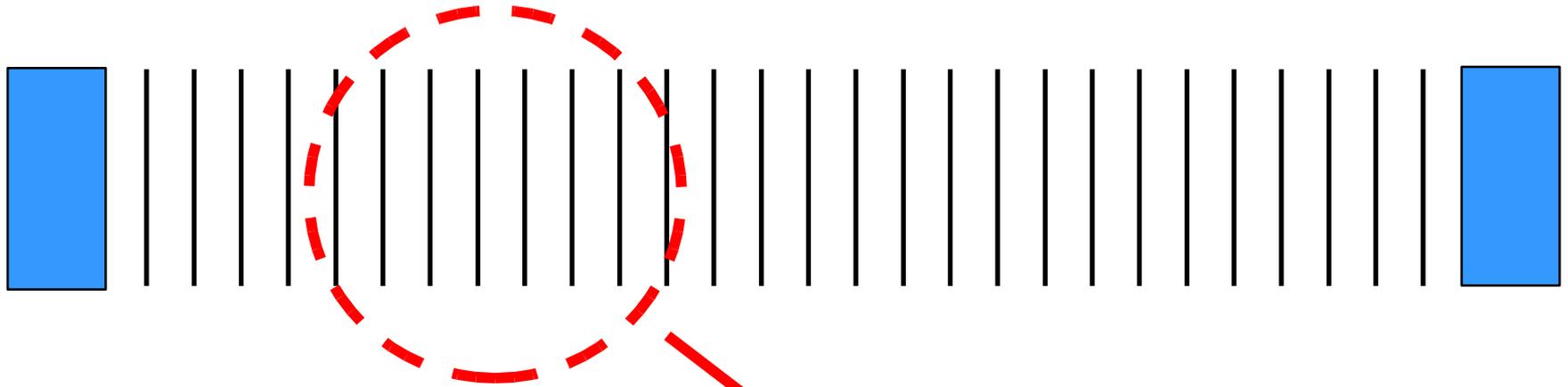
Signal E, proportionnel à l'énergie du photon gamma



Collimateur à trous parallèles

l = largeur des trous

d = épaisseur des septas en plomb



Basse énergie : d petit

Haute résolution : l petit

Haute sensibilité : l & h plus grands

h



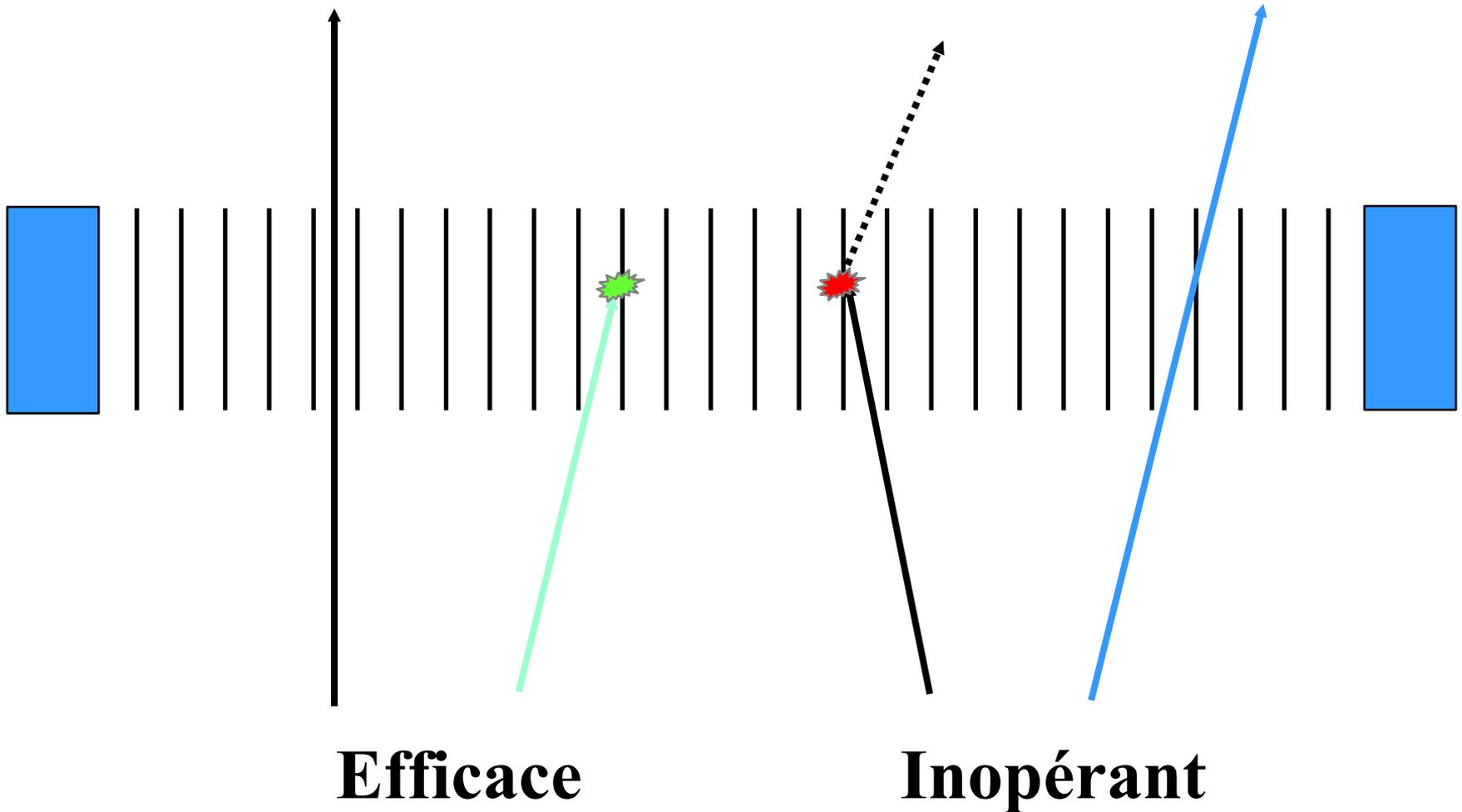
d



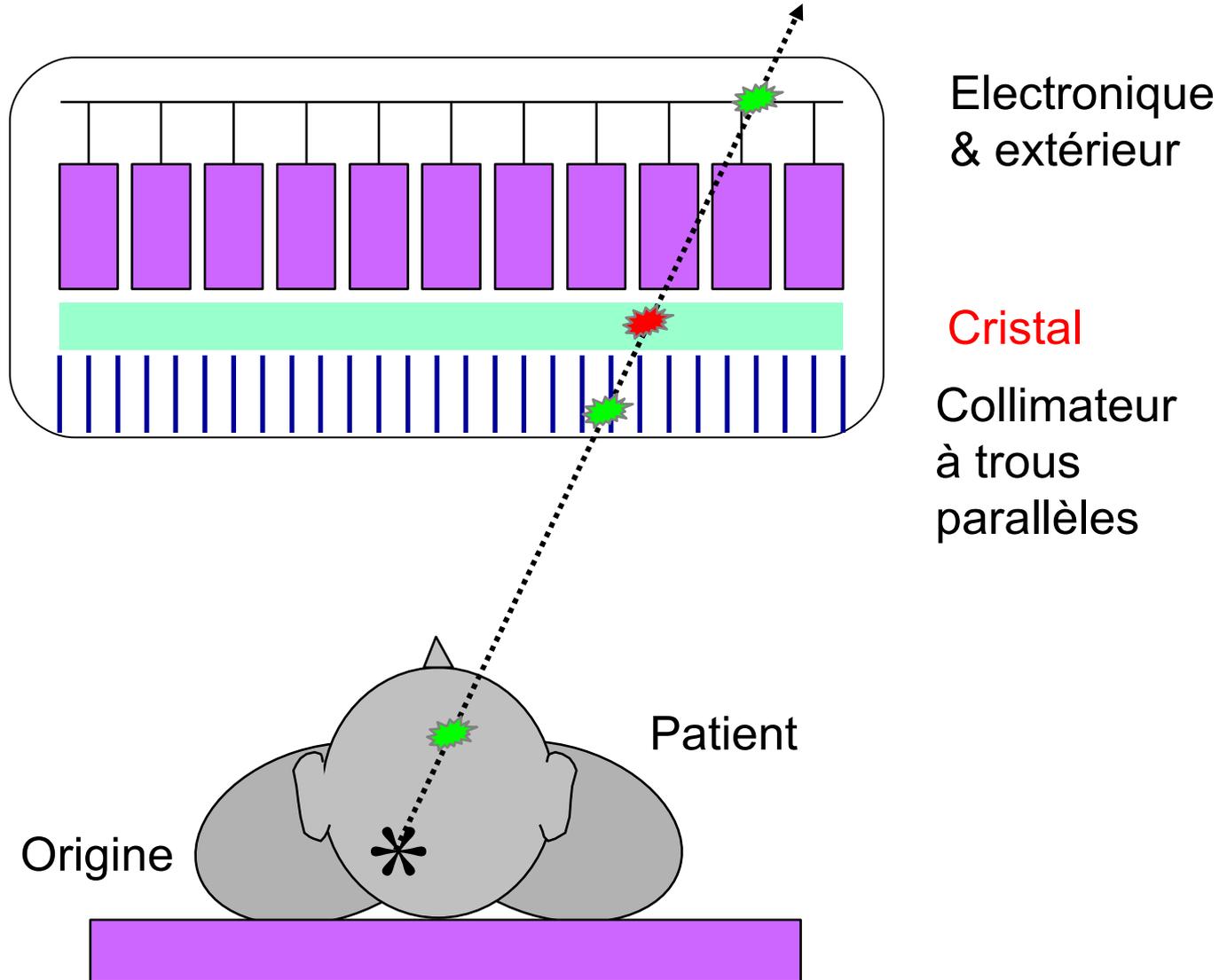
Haute énergie

d & l plus grands

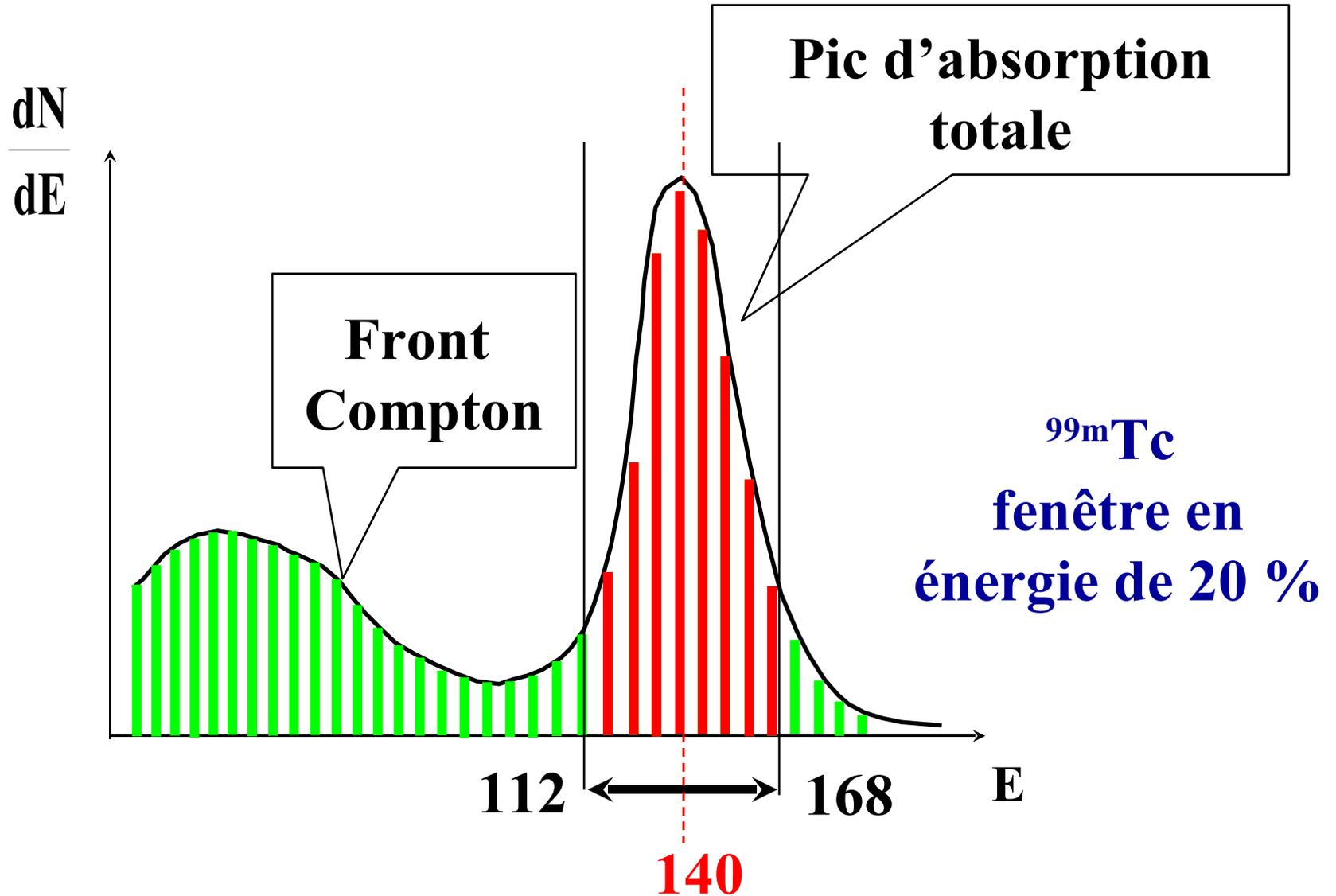
Le rôle du collimateur



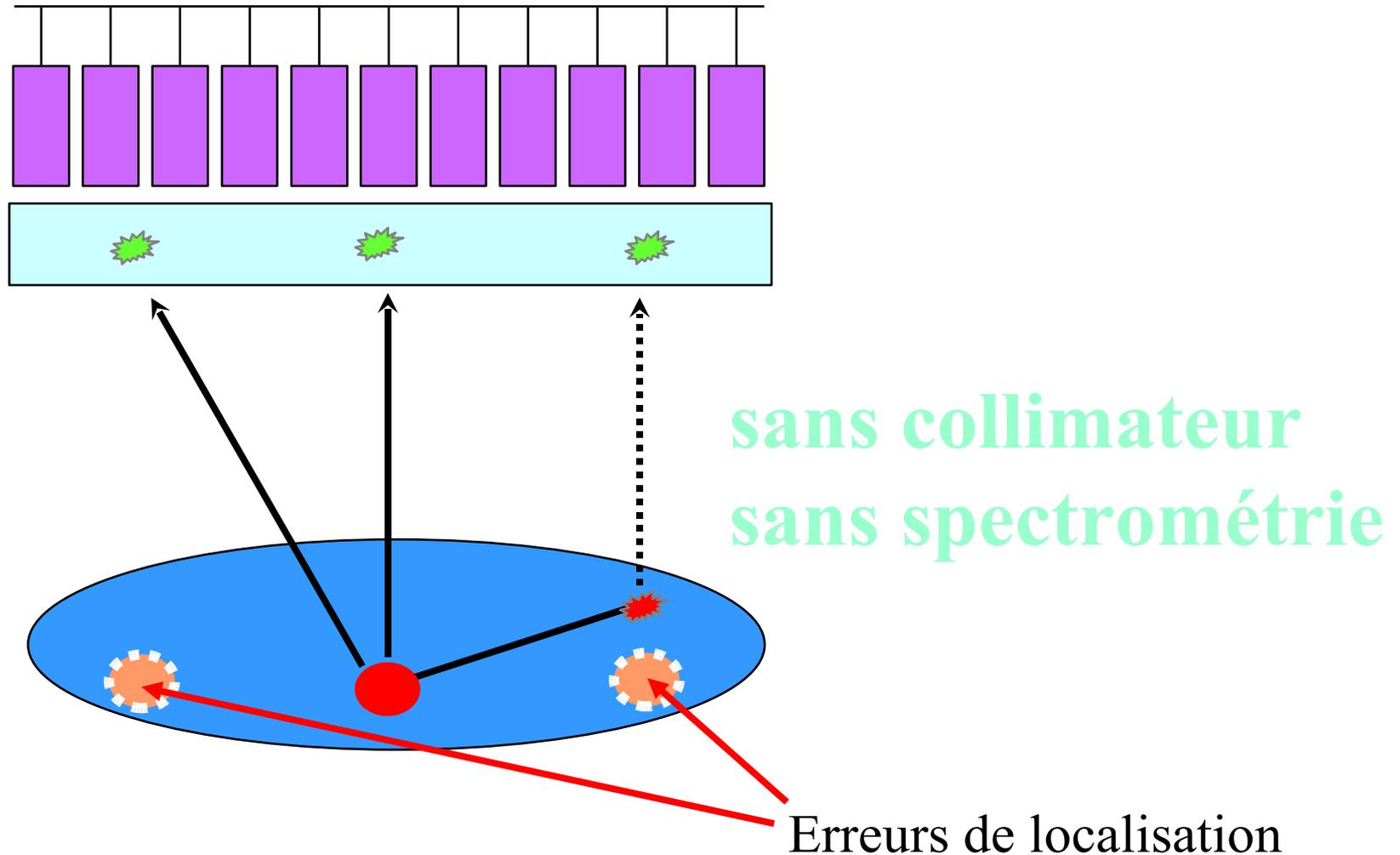
Lieux possibles d'interaction



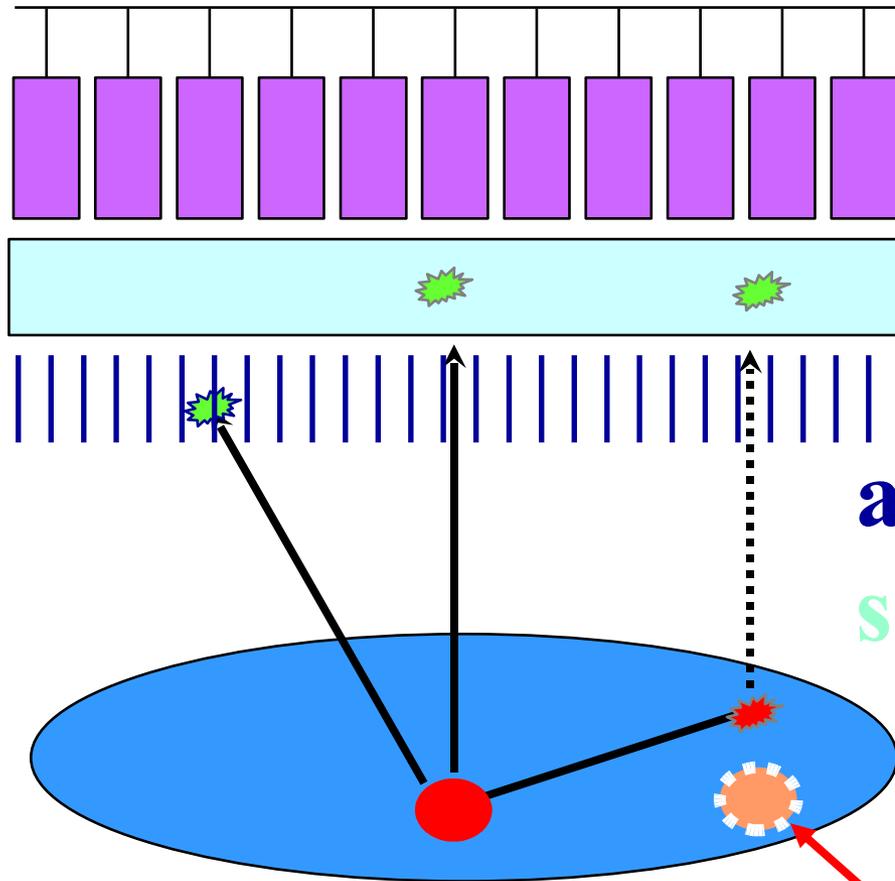
La spectrométrie



Formation de l'image scintigraphique



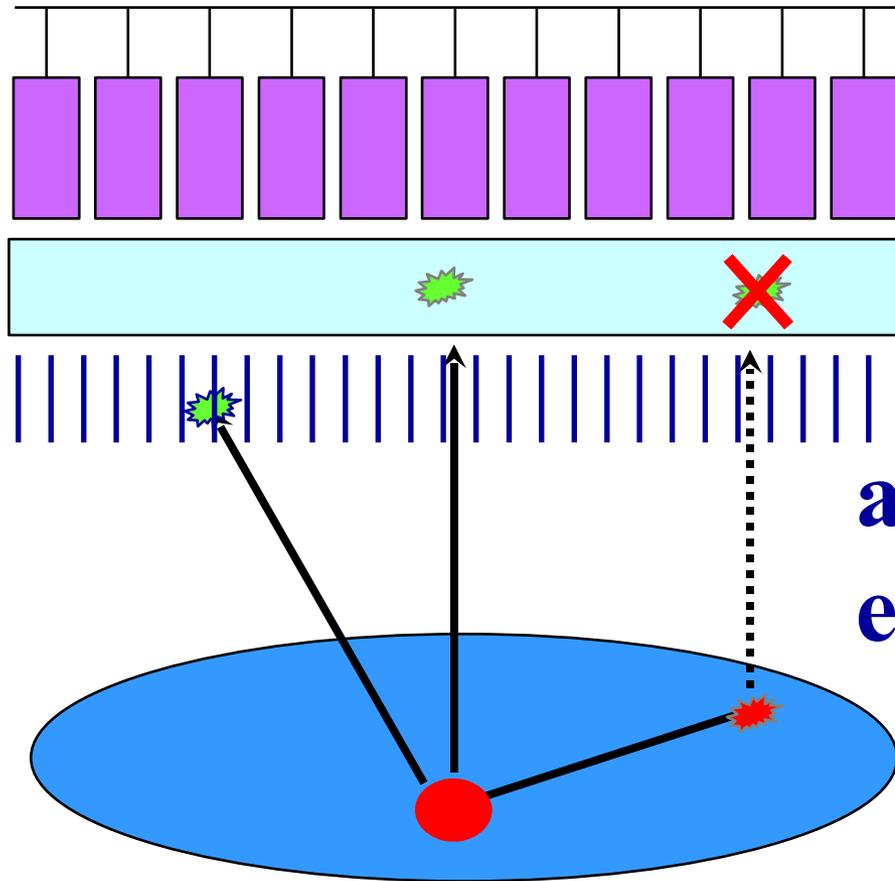
Formation de l'image scintigraphique



avec collimateur
sans spectrométrie

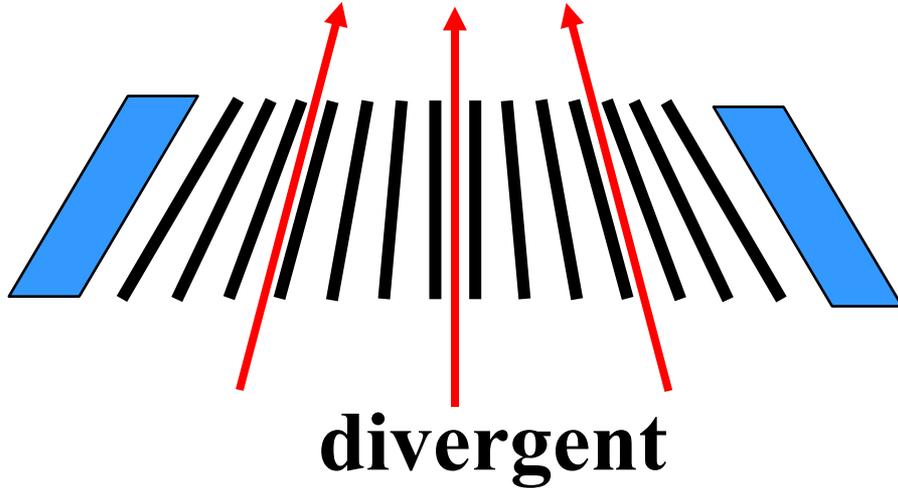
Erreur de localisation
due à la diffusion
Compton du photon
initial qui n'était pas
dirigé vers le détecteur

Formation de l'image scintigraphique

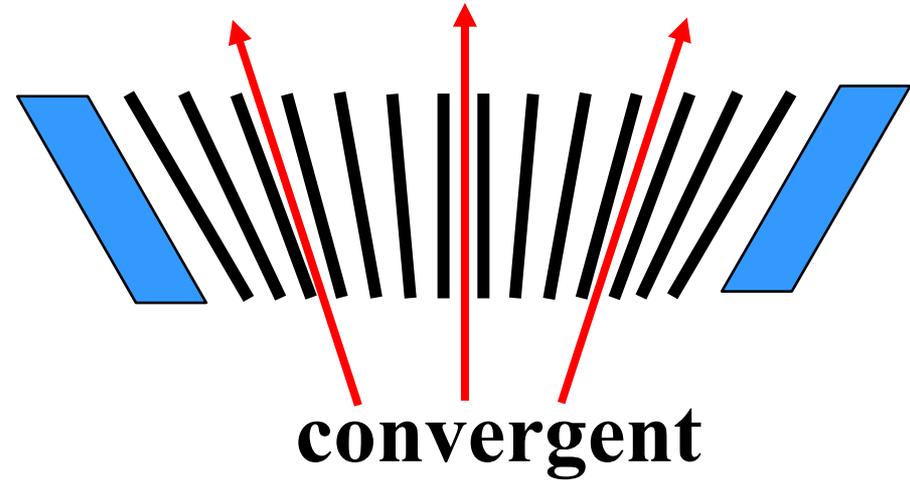


**avec collimateur
et spectrométrie**

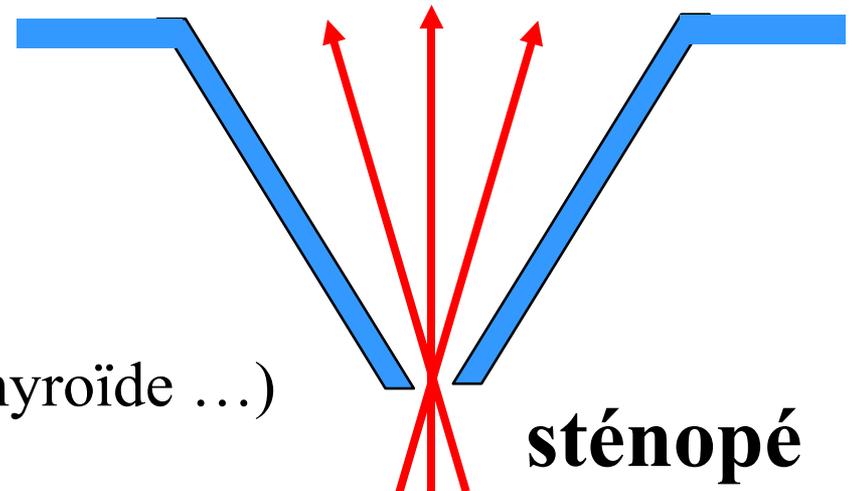
Autres types de collimateurs



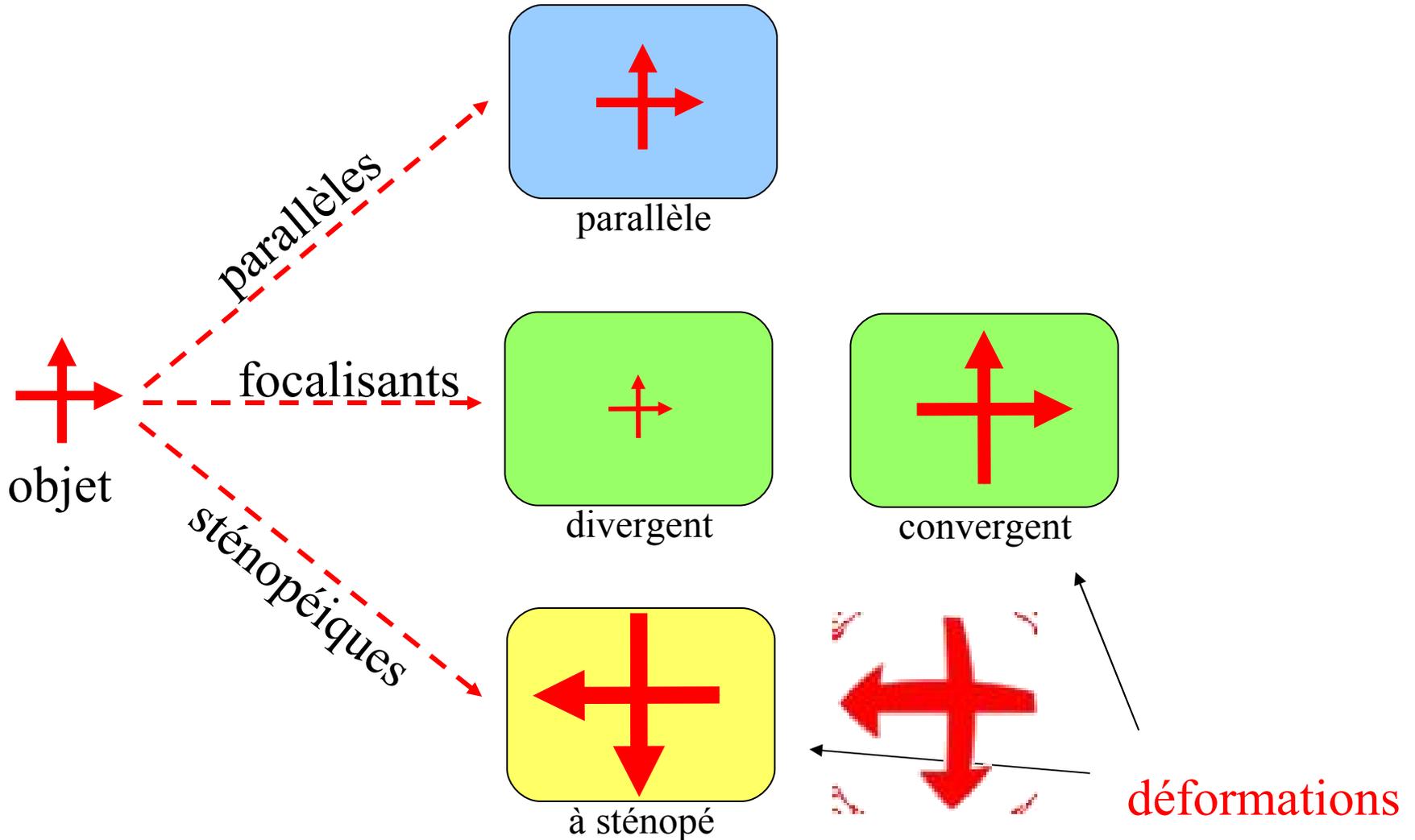
Pour grands objets (thorax...)



Pour petits objets (thyroïde ...)



Grandissement – déformation

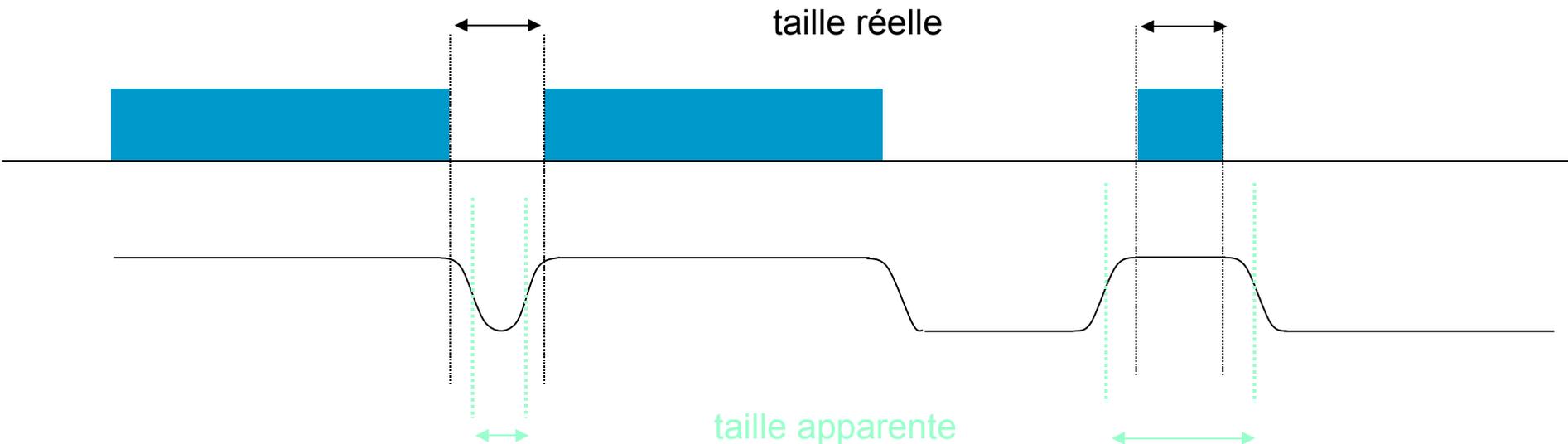


La résolution des scintigraphies

- La scintigraphie est une modalité de faible résolution (*par rapport aux autres*).
- Les caméras modernes ont une résolution de leur champ de détection de 256^2 pixels.
- Cela permet d'étudier des détails de l'ordre du cm in vivo (incluant les mouvements).
- L'analyse fonctionnelle est pertinente sur des éléments de volume de l'ordre du cm^3

La résolution en MN

- Résolution intrinsèque ≈ 3 mm
- Résolution avec collimateur ≈ 8 mm
- Différence entre point chaud et « trou »



Les paramètres de l'image MN

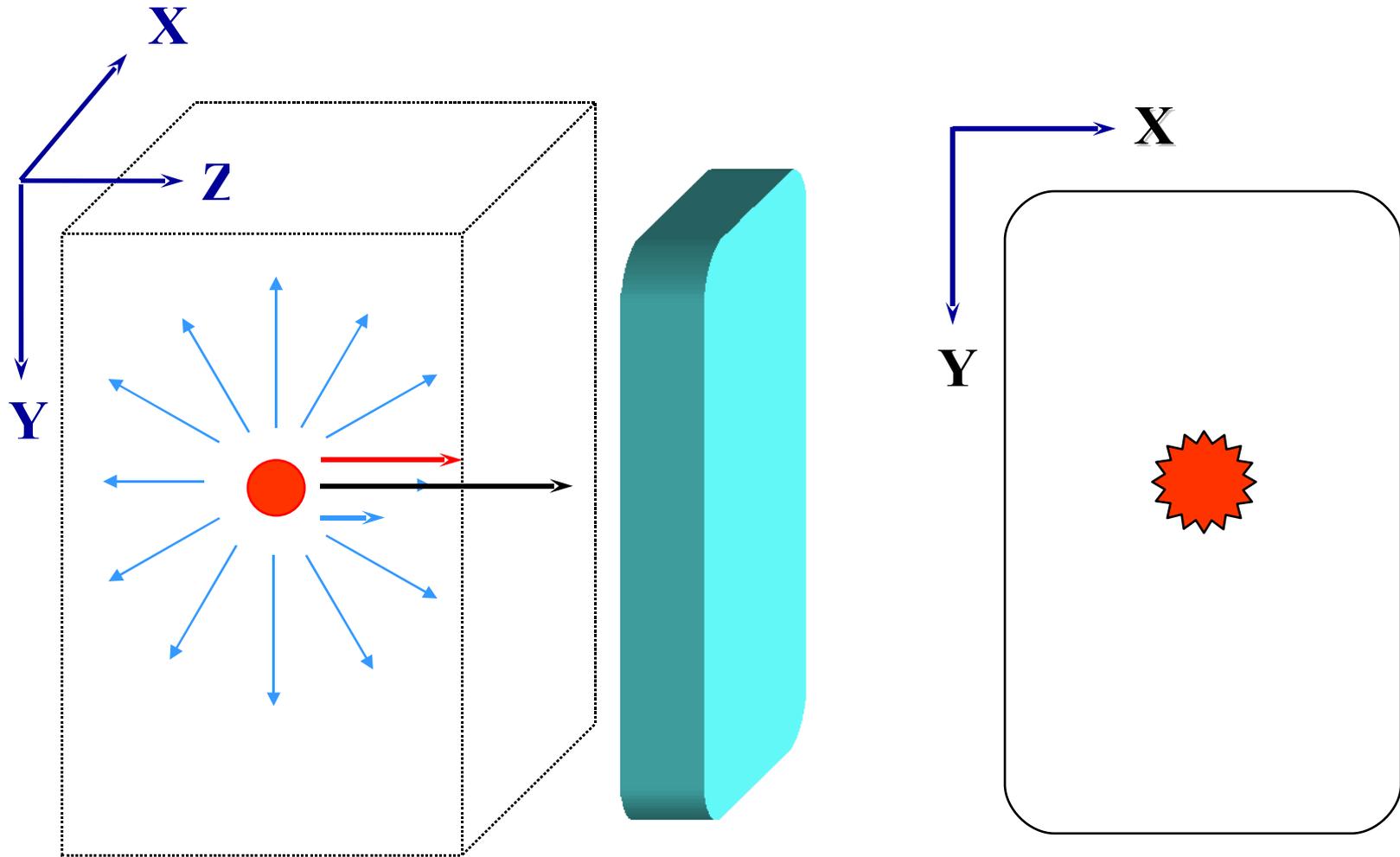
La concentration radioactive locale dépend de:

- Activité administrée
- Captation / élimination par l'organe
- Instant de la prise d'image / administration

L'atténuation ($N = N_0 e^{-\mu x}$):

- Situation de la « source » dans le corps
- Nature des tissus environnants

La formation de l'image

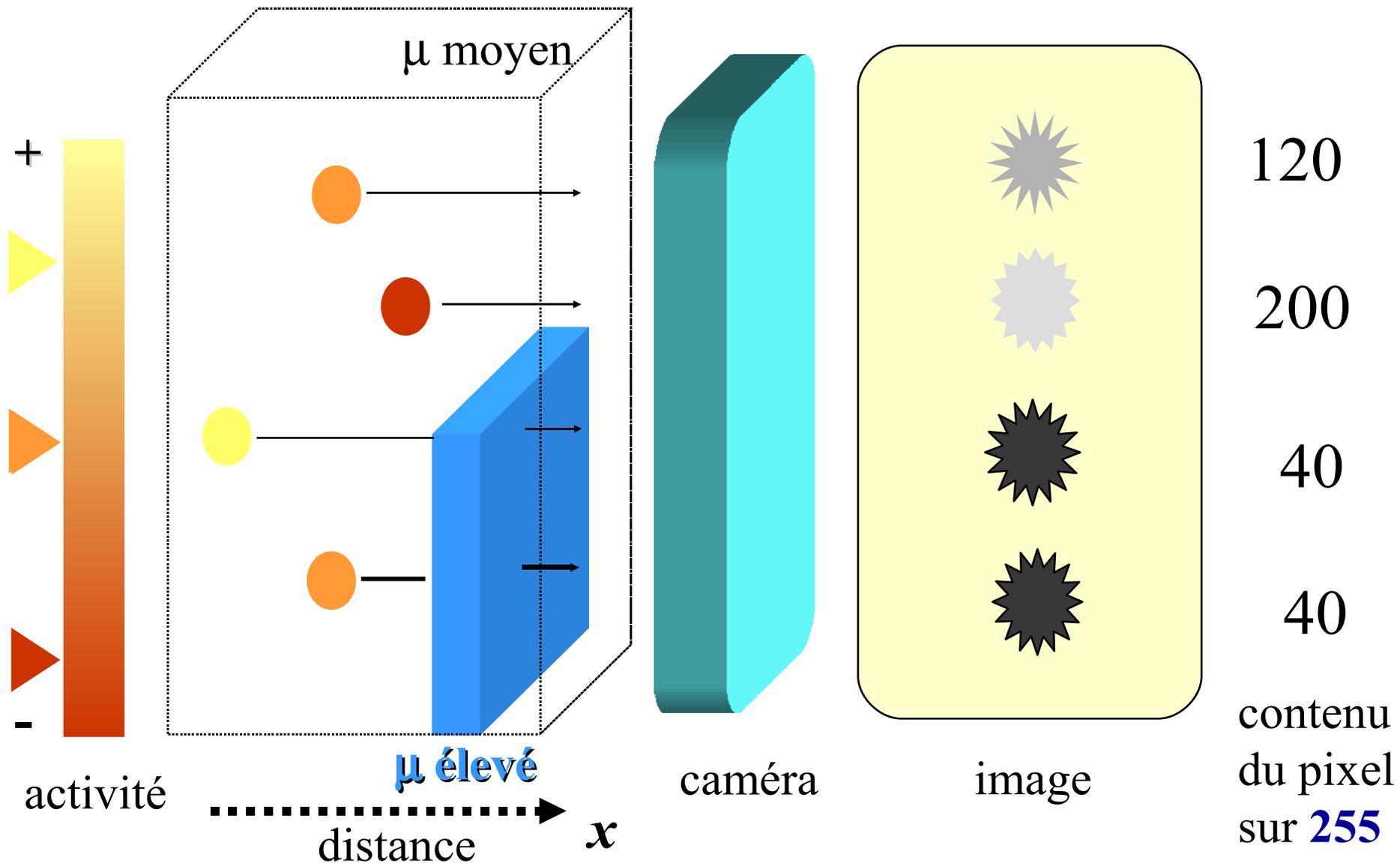


Objet 3D

Caméra

Image 2D

Concentration / Atténuation



Gamma-caméra simple tête



Siemens

Gamma-caméra double tête



Siemens

Gamma caméra triple tête



Energie basse : 140 keV



Antérieur

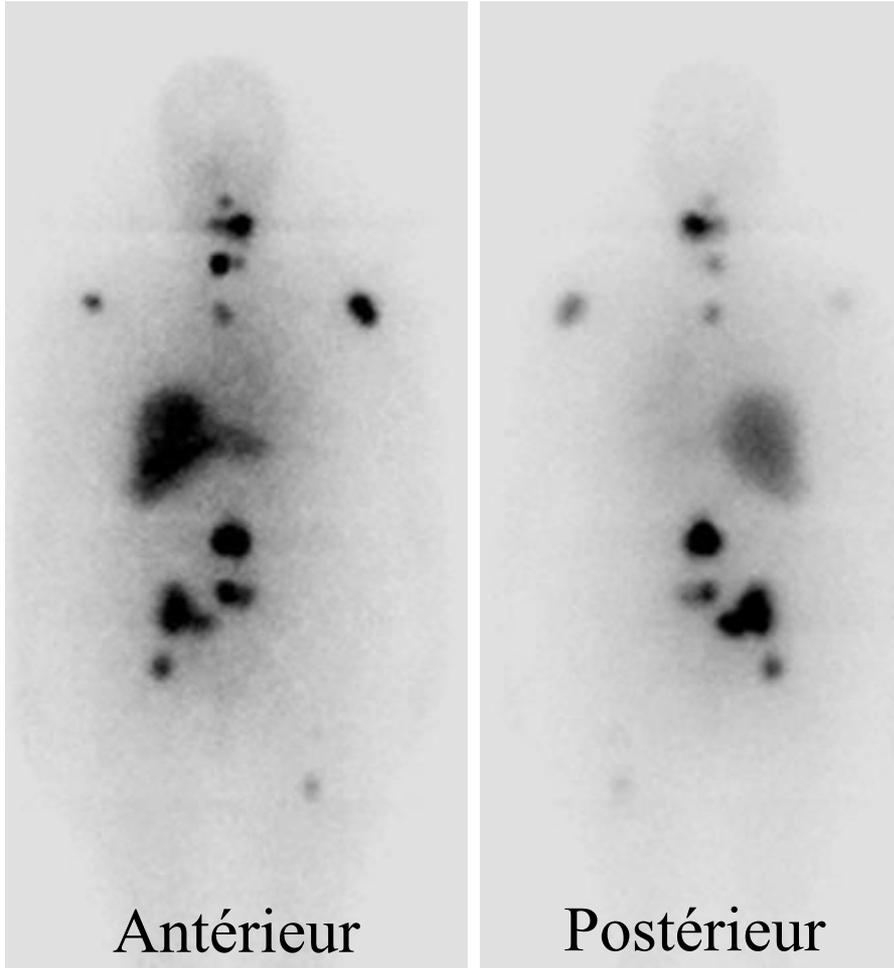


Postérieur

effet important
de l'atténuation
entre les deux
incidences

Scintigraphie osseuse
MDP ^{99m}Tc

Energie plus élevée : 245 keV



- Moindres effets d'atténuation par les tissus

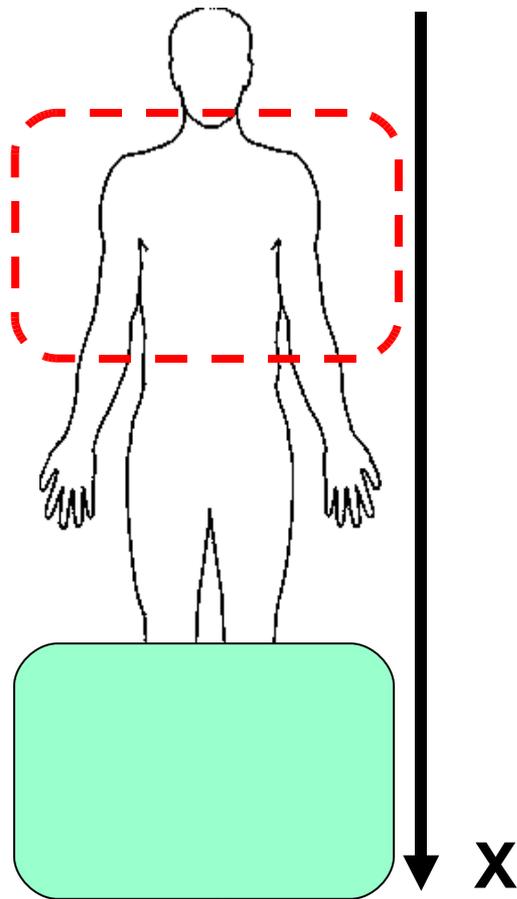
- Utilisation d'un collimateur « moyenne énergie » : résolution moins bonne

Imagerie des récepteurs de la somatostatine dans les tumeurs endocrines : pentétréotide-(¹¹¹In)

Comment faire la scintigraphie de tout le corps ?

Le balayage du corps entier

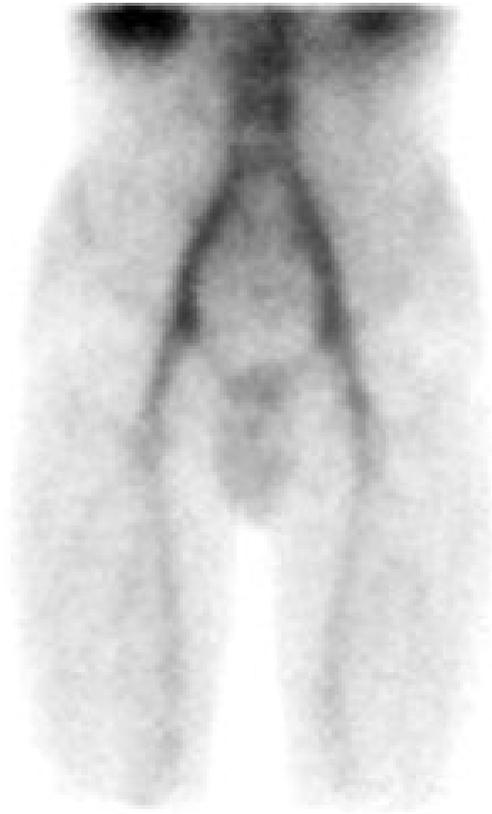
Balayage du corps entier



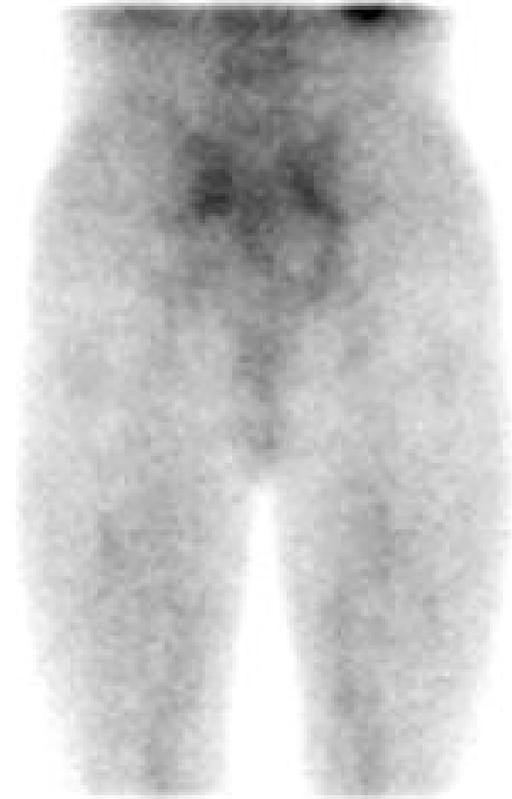
+ Abscisse X



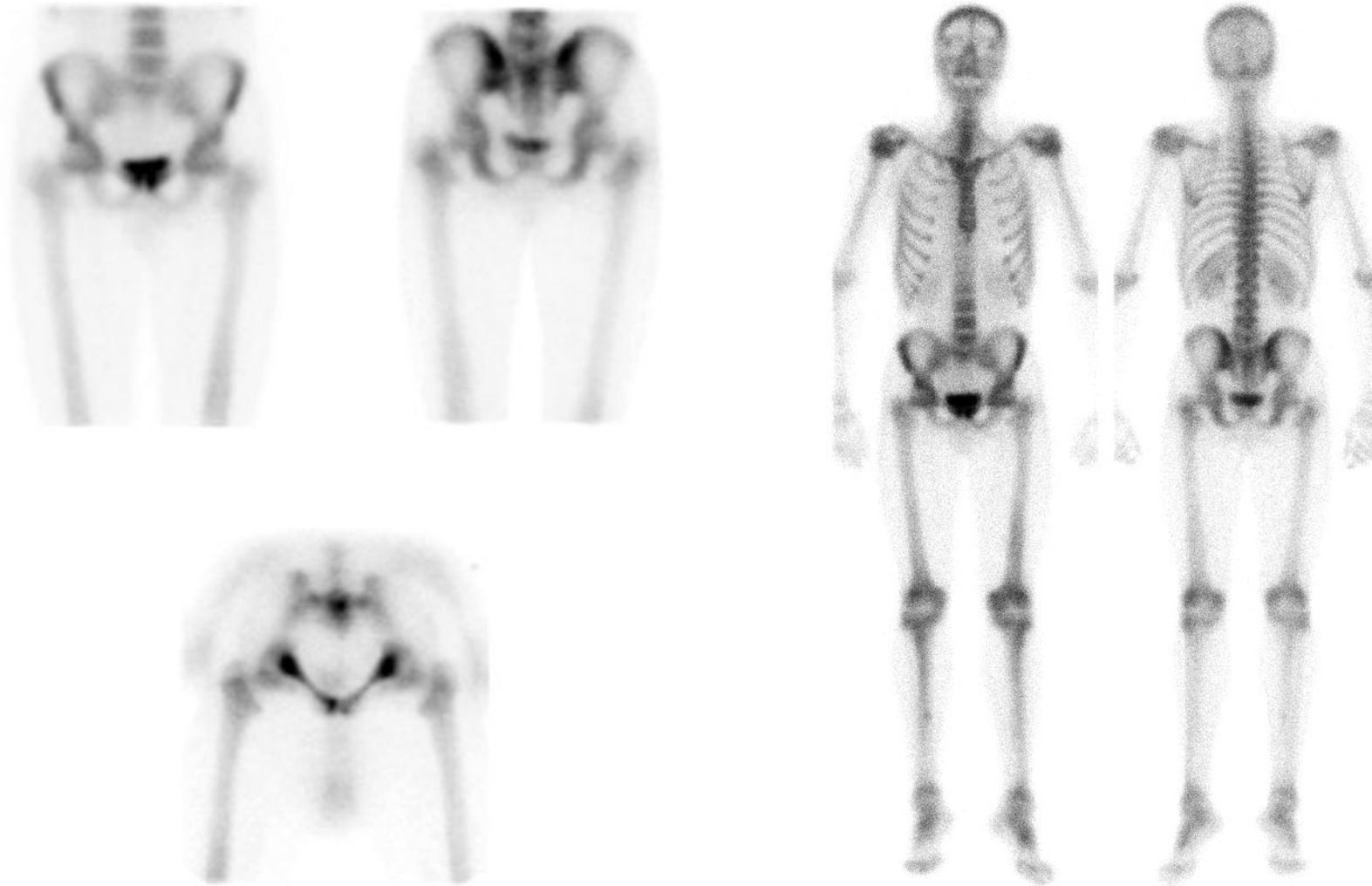
Scintigraphie du squelette en 3 phases.
Radiopharmaceutique phosphoré marqué au ^{99m}Tc



1er temps : vasculaire



2e temps : tissulaire

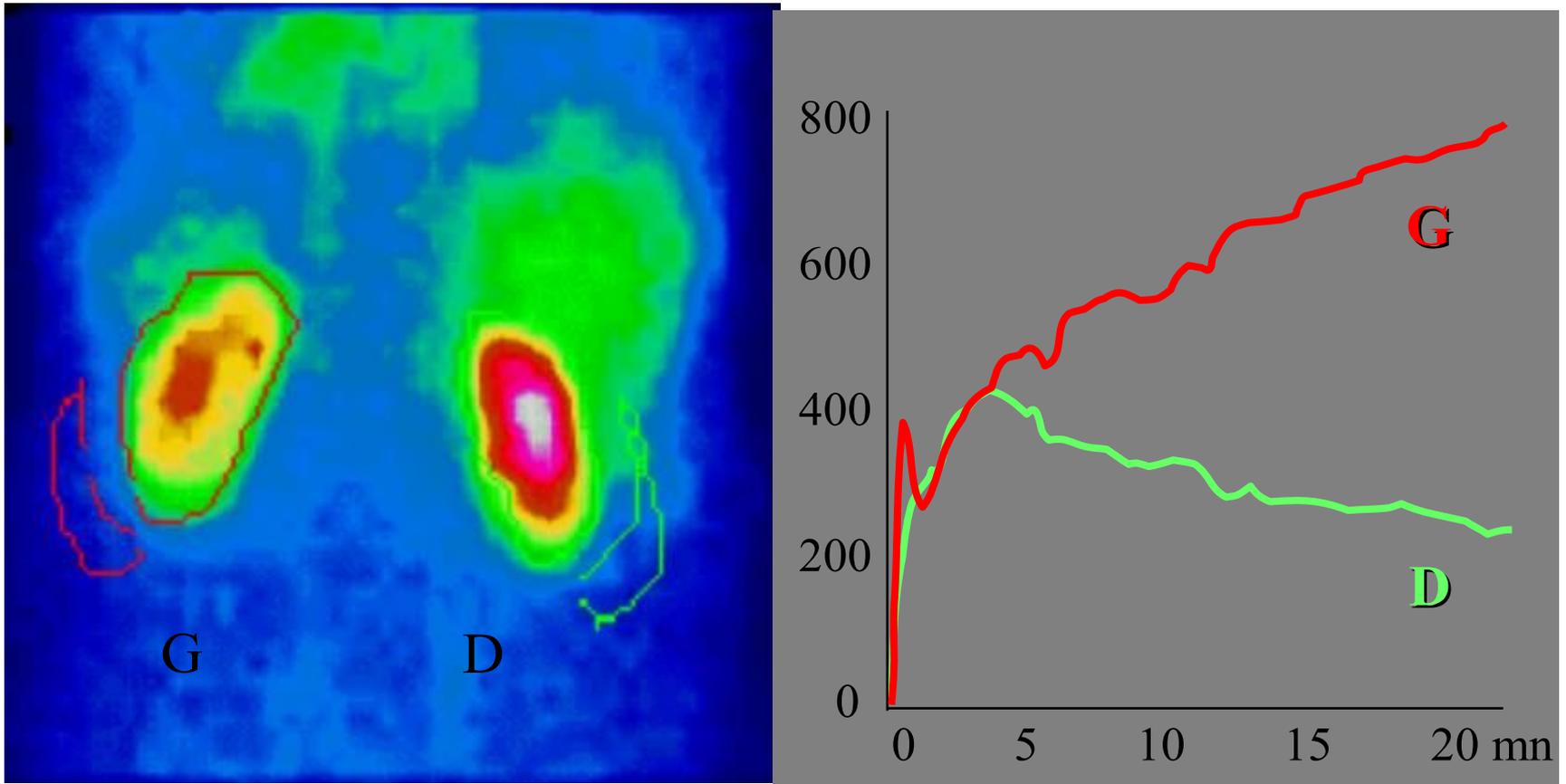


3ème temps (2 à 3 h) : images du squelette

**Comment faire la scintigraphie
d'un phénomène biologique qui
varie rapidement durant le
temps ?**

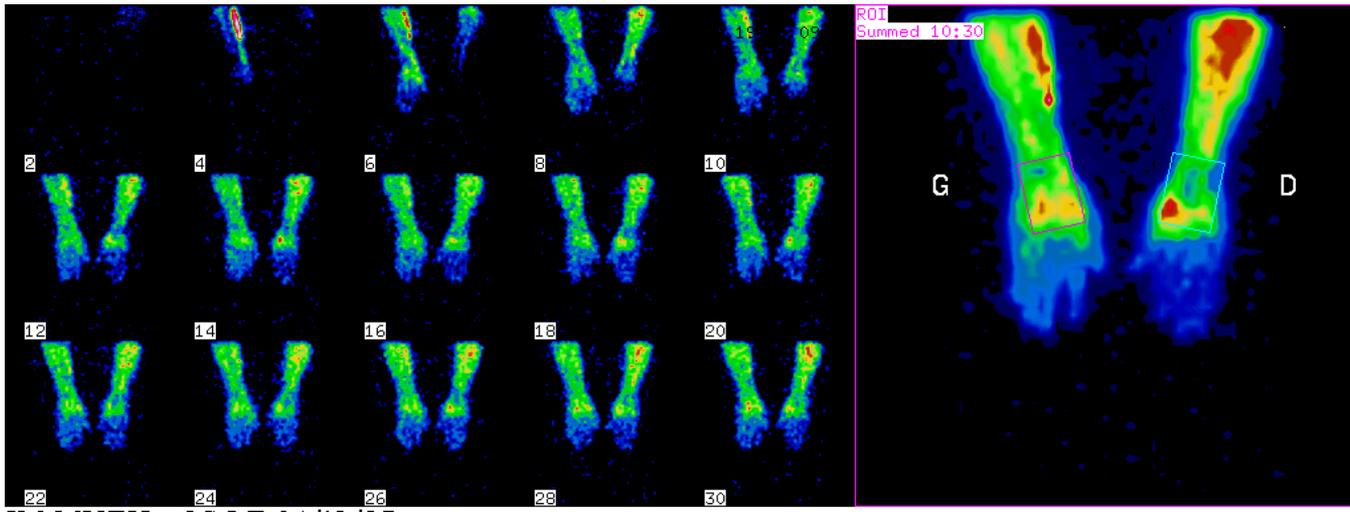
La scintigraphie “dynamique”

Scintigraphie rénale dynamique

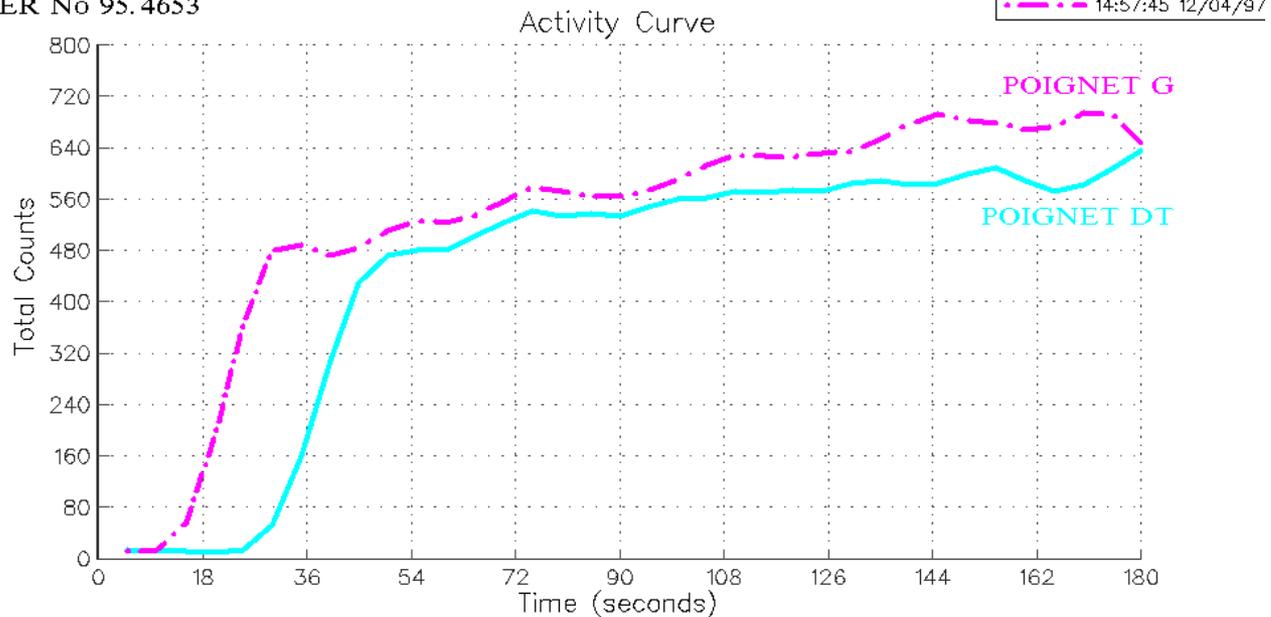


Anomalie rénale gauche

Acquisition dynamique



OS LE 04/12/97
DOSSIER No 95.4653

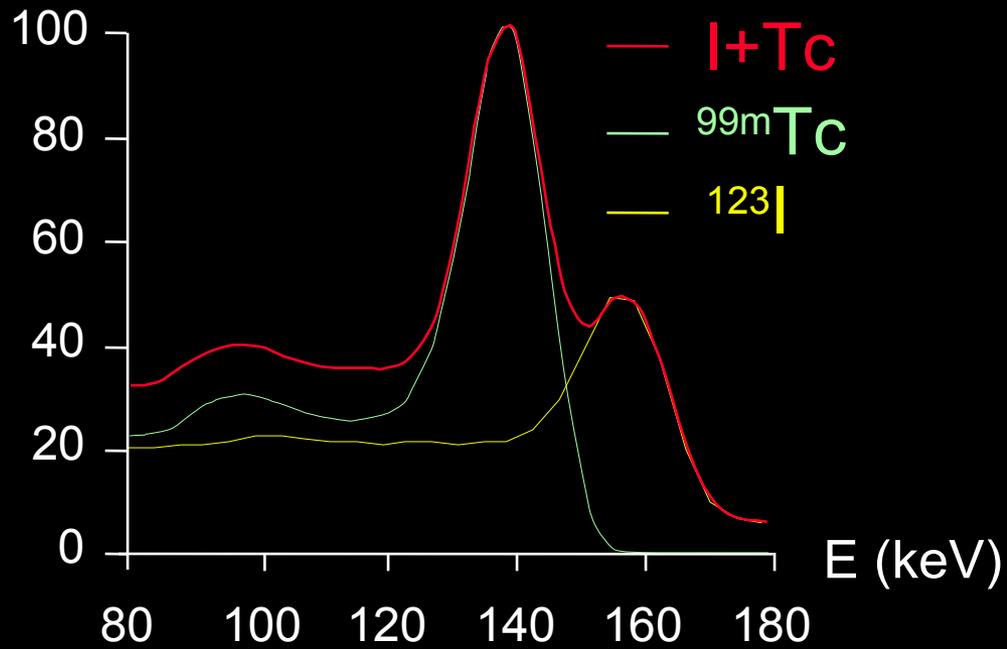


Comment faire simultanément la scintigraphie de deux processus biologiques différents ?

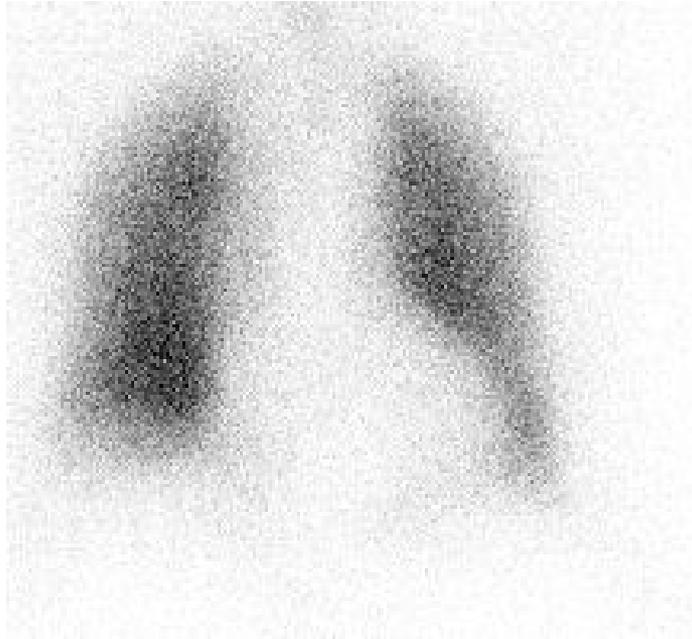
La scintigraphie en double énergie

Possible à condition que l'activité administrée du radionucléide au γ le plus énergétique soit bien inférieure à celle du second radionucléide

Exemple de l'iode 123 et du technétium 99m



Scintigraphie de ventilation / perfusion
évoctrice d'embolie pulmonaire
Incidence antérieure

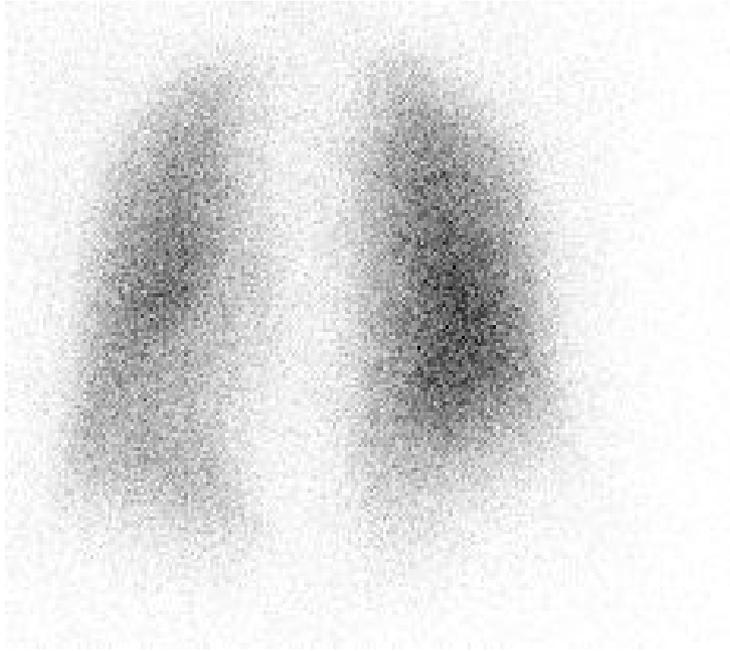


Ventilation au krypton ^{81m}Kr
Energie $\gamma = 190 \text{ keV}$



Perfusion aux
microsphères
d'albumine
technétées (^{99m}Tc).
Energie $\gamma = 140 \text{ keV}$

Incidence postérieure

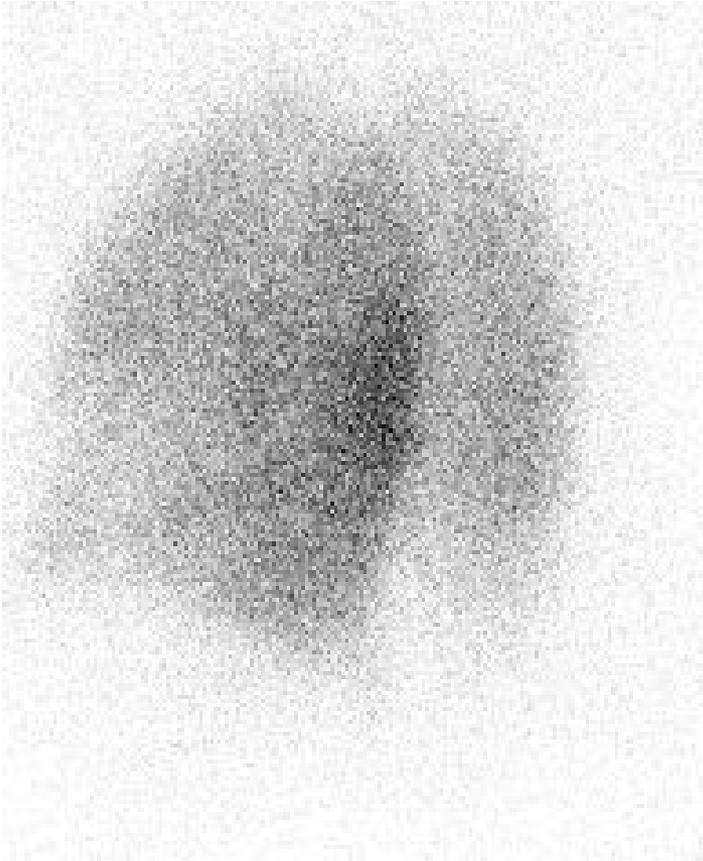


Ventilation au krypton



Perfusion aux
microsphères
d'albumine
technétiées

OPG

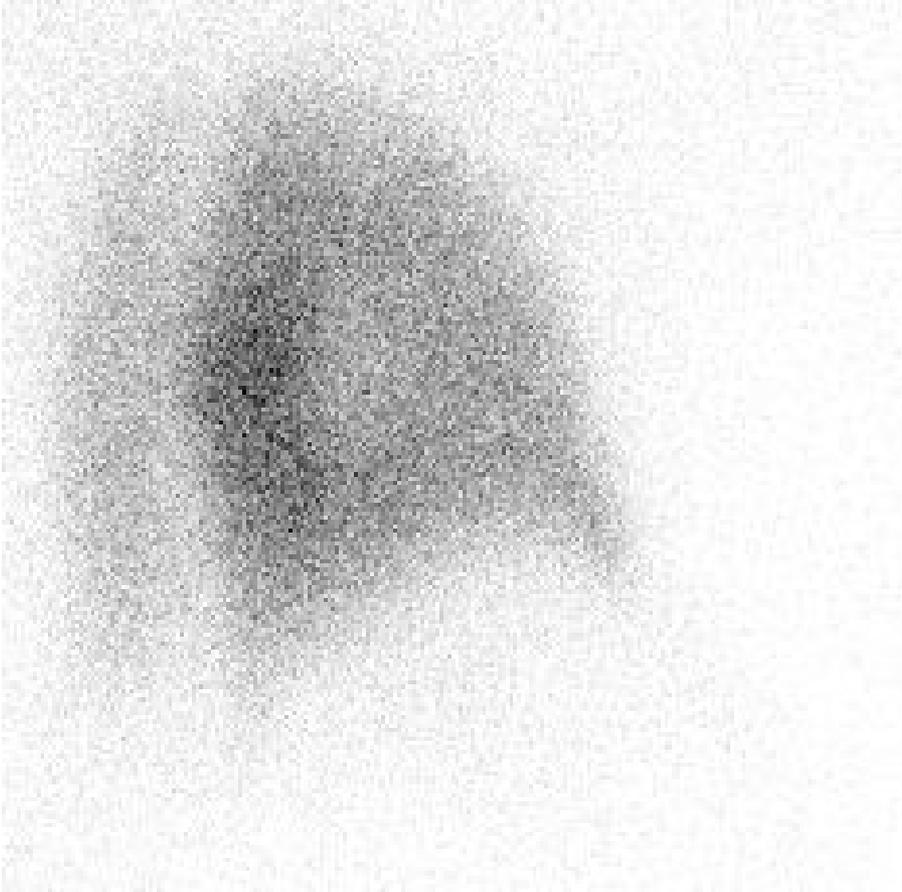


Ventilation au krypton



Perfusion aux
microsphères
d'albumine
technétiées

OPD



Ventilation krypton



Perfusion aux
microsphères
d'albumine
technétiées

Scintigraphie à la recherche d'une tumeur d'une glande parathyroïde

Collimateur sténopé, images simultanées



^{123}I

Energie $\gamma = 159 \text{ keV}$

Activité = 10 MBq



MIBI- $(^{99\text{m}}\text{Tc})$

Energie $\gamma = 140 \text{ keV}$

Activité = 500 MBq

Tumeur de la glande parathyroïde inférieure gauche