

Rayons X et rayonnements émis par les principaux radio-isotopes utilisés *in vivo* et *in vitro*

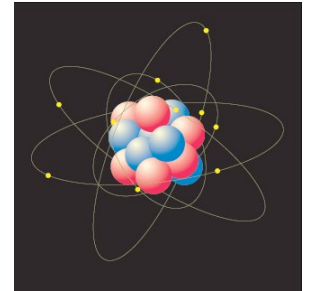
Introduction

La radioactivité est la transformation spontanée d'un noyau atomique au cours de laquelle ce dernier émet un rayonnement.

L'émergence d'une discipline médicale, la médecine nucléaire, consacre le développement des applications médicales et biologiques des radioéléments artificiels.

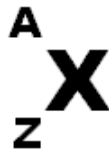
1. Rappel de la structure du noyau atomique

Un atome est un ensemble électriquement neutre caractérisé par un nb d'électrons qui gravitent autour du noyau et par un nb de nucléons A qui constituent son noyau.



- Nomenclature :

- X = symbole chimique de l'élément
- A = nombre de masse = nombre de nucléons = protons + neutrons
- Z = numéro atomique = nombre de protons = nombre d'électrons si élément non chargé
→ neutrons = A - Z



- Les nucléons sont soumis à 2 forces :

- Les forces électrostatiques répulsives qui agissent entre les protons
- Les forces non électrostatiques, attractives, d'origine nucléaire qui agissent entre les nucléons et qui leur confèrent une énergie de liaison W.

- Qlq définitions :

- Isotopes = noyaux avec Z identique mais A différent
 - $^{12}_6\text{C}$ et $^{14}_6\text{C}$
 - $^{125}_{53}\text{I}$, $^{127}_{53}\text{I}$, $^{131}_{53}\text{I}$, $^{132}_{53}\text{I}$
- Isobares = noyaux avec A identiques mais Z différent
 - $^{14}_6\text{C}$ et $^{14}_7\text{N}$
- Isotones = noyaux avec le même nb de neutrons, mais A et Z différents
 - $^{14}_6\text{C}$, $^{15}_7\text{N}$, $^{16}_8\text{O}$

- Défaut de masse – Énergie de liaison :

- La masse n'est en fait pas égale à la somme des masses des protons et des neutrons qui le constituent.

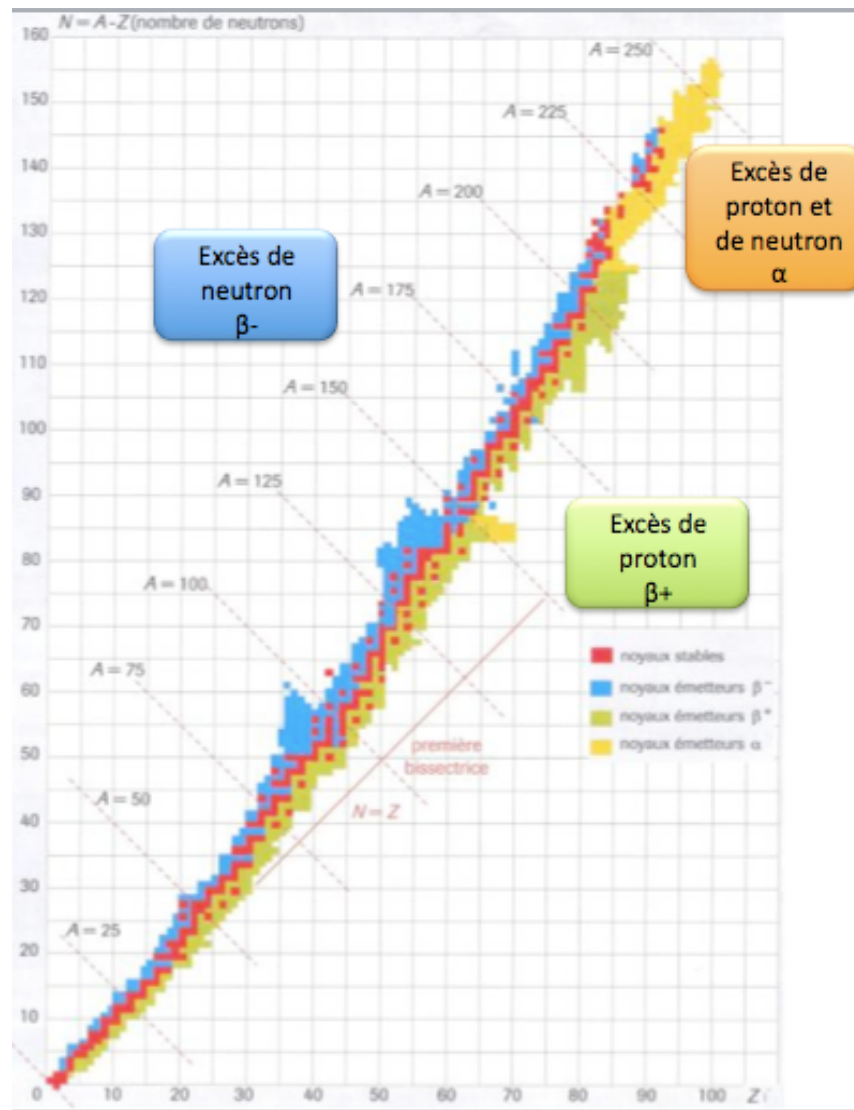
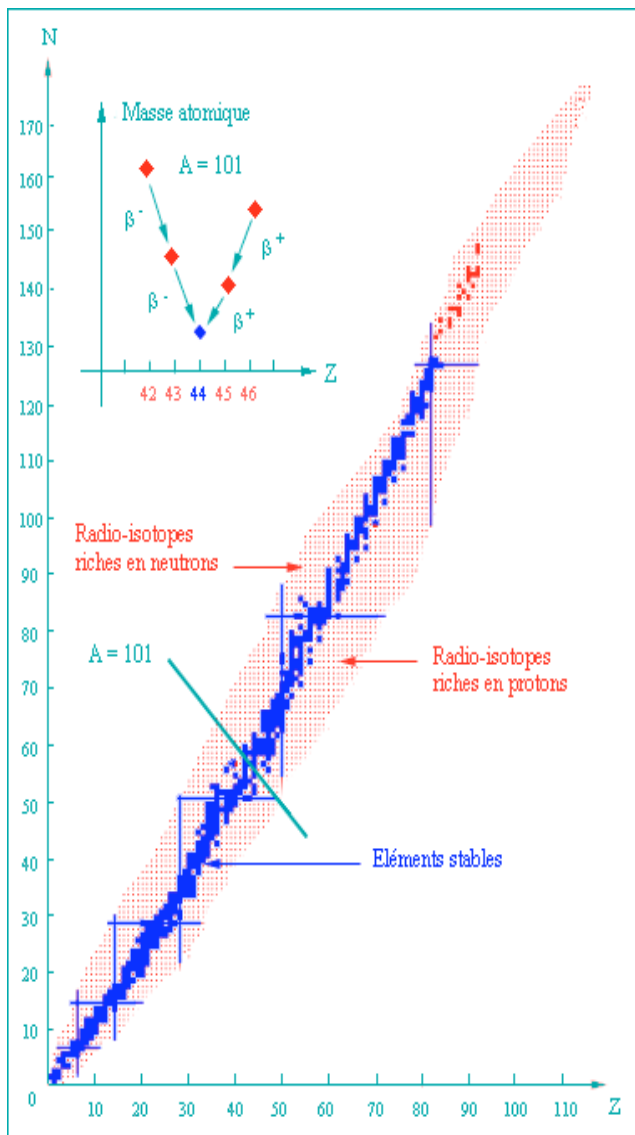
- Pour un atome de nb de masse A et de numéro atomique Z, la masse est :

$$M(A, Z) = Z.M_p + (A - Z).M_n - \Delta m \quad (\Delta m = \text{défaut de masse})$$

$$E = \Delta m \cdot c^2 \quad (\text{Énergie de liaison})$$

- **Stabilité nucléaire :**

- Les noyaux stables sont limités à une zone étroite et limitée vers le haut de la figure ci dessous = vallée de stabilité
- Celle-ci est appelée ligne de stabilité β
- Les noyaux des éléments situés à gauche de cette ligne de stabilité ont un excès de neutrons
- Les noyaux des éléments situés à droite de cette ligne de stabilité ont un excès de protons
- Les noyaux des éléments situés au dessus de cette ligne de stabilité ont un excès de neutrons et de protons



Nyx stables legers $N=Z$

Nyx avec $A > 30 \rightarrow$ moins stables car $N > 2$

2. Les transformations radioactives

Les noyaux situés dans l'une de ces 3 régions d'instabilité ont tendance à se transformer de manière à revenir vers la zone de stabilité.

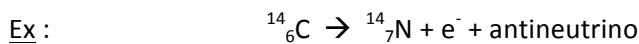
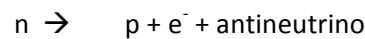
Pls types de transformations existent en fonction de la region.

2.1 Les transformations isobariques

Un noyau trop riche en neutrons ou protons se transforme en noyau stable sans changer de masse (A identique)

2.2 Emission β^-

L'excès de neutrons par rapport au nb de protons entraine une transformation spontanée d'un neutron en proton selon le mécanisme :



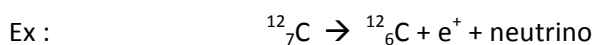
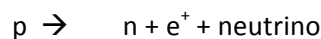
- **Emission de 2 particules :**

- Un electron e^- d'où le nom β^-
- Un antineutrino
- Ces 2 particules possèdent à eux 2 une énergie égale à la différence des niveaux d'énergie des noyaux père et fils.
→ spectre d'énergie continu (entre 0 et $E_{\max}$)

$$E_{\max} = (m(A,Z) - m(A,Z+1) - m_{e^-}) \cdot c^2$$

2.3 Emission β^+

L'excès de protons par rapport au nb de neutrons entraine une transformation spontanée d'un proton en neutron selon le mécanisme :



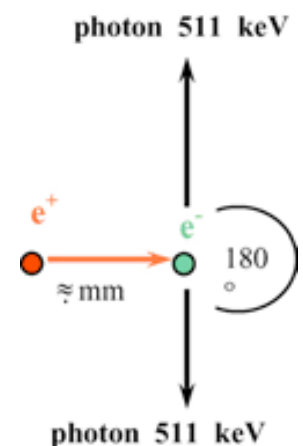
- **Emission de 2 particules :**

- Un positon e^+ d'où le nom de β^+
- Un neutrino
- L'énergie libérée est partagée aléatoirement entre ces 2 particules
→ spectre d'énergie continu (entre 0 et $E_{\max}$)

$$E_{\max} = (m(A,Z) - m(A,Z-1) + m_{e^-}) \cdot c^2$$

- **Un phénomène annexe s'ajoute à l'émission β^+ :**

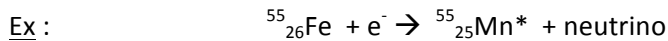
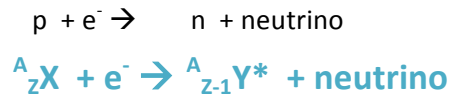
- annihilation du positon avec un électron = désintégration



- production de 2 photons lumineux d'énergie = 511keV (=énergie correspondante à la masse d'un électron), qui sont émis à 180° l'un de l'autre.
- Principe utilisé en imagerie → PET-Scan (tomographie d'émission de positon)

2.4 Capture électronique

Intégration par le noyau d'un electron périphérique (généralement de la couche K) et transformation d'un proton en neutron selon ce mécanisme :

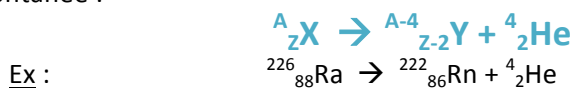


L'atome fils se trouve, après transformation dans un état excité, le réarrangement du cortège électronique va donner lieu à l'émission d'énergie :

- Soit sous la forme de photons X → spectre de raies d'émission X
- Soit sous la forme d'électron d'Auger → spectre de raie de faible énergie

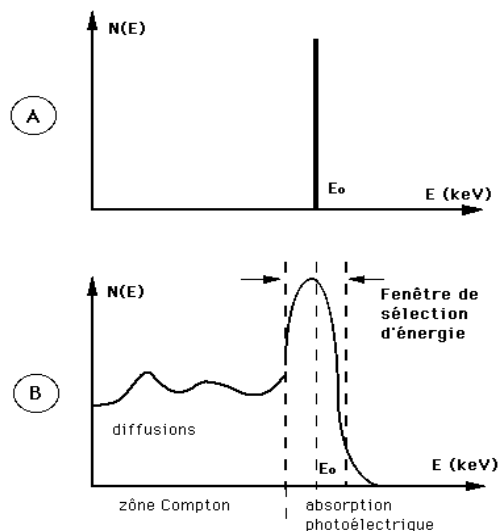
2.5 Emission α et fission spontanée :

Les noyaux qui possèdent un excès de neutrons et de protons sont dynamiquement instables et tendent à évoluer vers un état de plus grande stabilité par émission de particules ou par fission spontanée :



Cette émission s'observe pour les éléments lourds ($Z > 82$), mais aussi pour certains autres radioéléments de $Z < 82$ (exceptions). Spectre mono-énergétique = Spectre de raies

Fission spontanée : si $Z > 90$, les noyaux lourds se scindent en 2 fragments plus légers
→ émission de particules (neutrons +++)



$$E_{\text{libération}} = (N_b \text{ nucléon1} \times E_{\text{liaison1}}) + ((N_b \text{ nucléon2} \times E_{\text{liaison2}}) - n_b \text{ nucleon initial} \times E_{\text{liaison}})$$

$$t = T / \ln 2 * \ln (N_0 / N)$$

$$= T / \ln 2 * \ln (A_0 / A)$$

2.6 Emission γ

Fréquemment, avec les désintégration β^- ou β^+ ou capture électronique, le noyaux fils se trouve dans un état excité.

Le noyau retourne à l'état fondamental en émettant l'excès d'énergie sous la forme de **photons γ** . Cette désexcitation du noyau peut se faire par cascade par des niveaux d'énergie intermédiaires et émission de photons en cascade.



Ex : ${}^{60}\text{Co}$

3. Cinétiques des transformations radioactives

La désintégration radioactive d'un noyau atomique est un phénomène aléatoire dont on peut définir la probabilité de survenue dans le temps. C'est la cte de radioactivité λ (en s^{-1})

Ex : Pour le ${}^{14}\text{C}$, $\lambda = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ an}^{-1} \rightarrow$ chaque noyau de ${}^{14}\text{C}$ a donc une chance sur 12 400 de se désintégrer dans l'année

NB : $\tau = \text{constante de temps} = 1/\lambda$ $\tau = 1/\gamma$

3.1 Activité

$A = \lambda \cdot N$ (unité = Becquerel = 1 désintégration par seconde)

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$A = -\Delta N / \Delta t$$

- L'activité est la grandeur utilisée pour exprimer une quantité de radioélément
- L'ancienne unité était le curie Ci (1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq)
- Nombre de mole $\times$ constante d'avogadro = Nombre de noyau

3.2 Loi de décroissance radioactive et période (demi-vie)

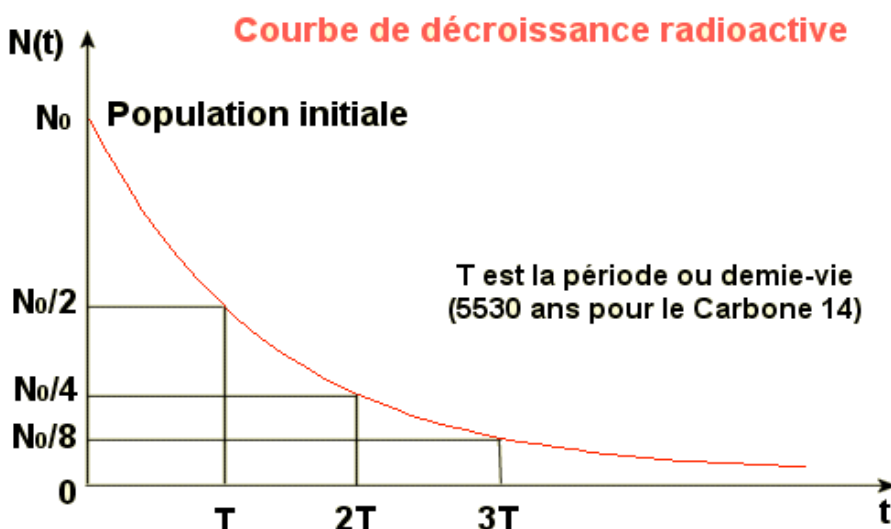
= Variation du nombre d'atomes radioactifs en fonction du temps

$$\Delta N(t) = -\lambda N(t) \Delta t$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

La période radioactive est le tps T au bout duquel le nb d'atomes radioactifs a décru d'un facteur 2.

$$T = \ln 2 / \lambda$$



3.3 Filiation radioactive

Le pdt de désintégration d'un atome radioactif peut être lui aussi radioactif.

Réaction en chaîne jusqu'à arriver sur un atome stable.

En médecine, on utilise des radioéléments de période T courte, fils d'un radioélément de T plus longue qui peut être conservé.

L'élément voulu est donc obtenu par séparation simple au moment de l'utilisation.

$$N_2 = N_{0(1)} / (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

4. Interactions des particules et rayonnement avec la matière (Cf S3)

NB : les radio-isotopes qui se désintègrent par émission α ou par fission ne sont pas utilisés en médecine (trop dangereux !)

4.1 Les particules β^- (électrons)

- Particules non mono-énergétiques.
- Schéma

a) Parcours dans la matière

- Gd nb de collision, mais faible perte d'énergie
- Parcours allant de qlq millimètres à qlq dizaines de mètres
- Facilement arrêtable par une fine feuille d'aluminium

b) Ionisation, excitation (interactions avec les électrons)

- Pouvoir ionisant faible
- Ionisation des atomes ou excitation si énergie trop faible.
- Si atome excité $\rightarrow$ retour à l'état fondamental avec émission de lumière

c) Rayonnement de freinage (interactions avec les noyaux)

- Changement de direction et freinage par effet coulombien avec le noyau.
- Perte d'énergie transformée sous forme de photons X.
- Phénomène d'autant plus élevé que la particule est énergétique et que la matière possède un Z important.

d) Effet Cerenkoff (interactions avec les atomes)

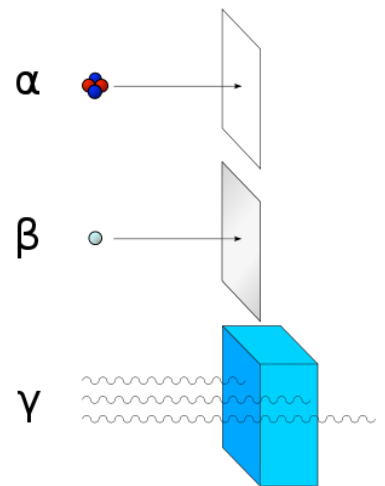
- Emission de lumière si une particule b traverse un milieu transparent avec une vitesse supérieure à celle de la lumière.
- = rayonnement Cerenkoff

4.2 Les particules β^+ (positons)

- Particules non mono-énergétiques.
- Schéma
- Phénomènes identiques aux β^- , à la différence que si son énergie devient faible, elle se désintègre avec un électron.

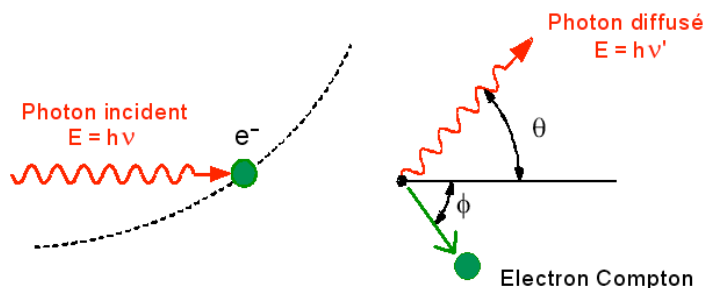
4.3 Les photons γ et X

- Spectres de raies



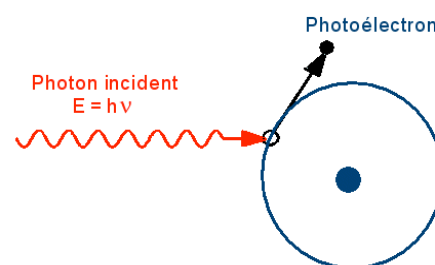
a) Parcours dans la matière

- **Effet COMPTON** : interaction avec diffusion : 1 photon heurte un électron qui est éjecté de son orbite et projeté dans une direction déterminée :
 - Electron éjecté $\rightarrow$ excitation et ionisation
 - Formation d'un photon de diffusion d'énergie plus basse



- **Effet photoélectrique** : un photon heurte un électron et lui transmet toute son énergie. L'électron éjecté dissipe son énergie en provoquant ionisations et excitations.

La vacance créée dans la couche interne est comblée par un électron issu d'une couche plus externe, l'énergie étant libérée sous forme d'un photon X de fluorescence ou d'un électron Auger.



- **Production de paires** : uniquement si énergie du photon $> 1,002 \text{ MeV}$

b) Atténuation des photons ($I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$)

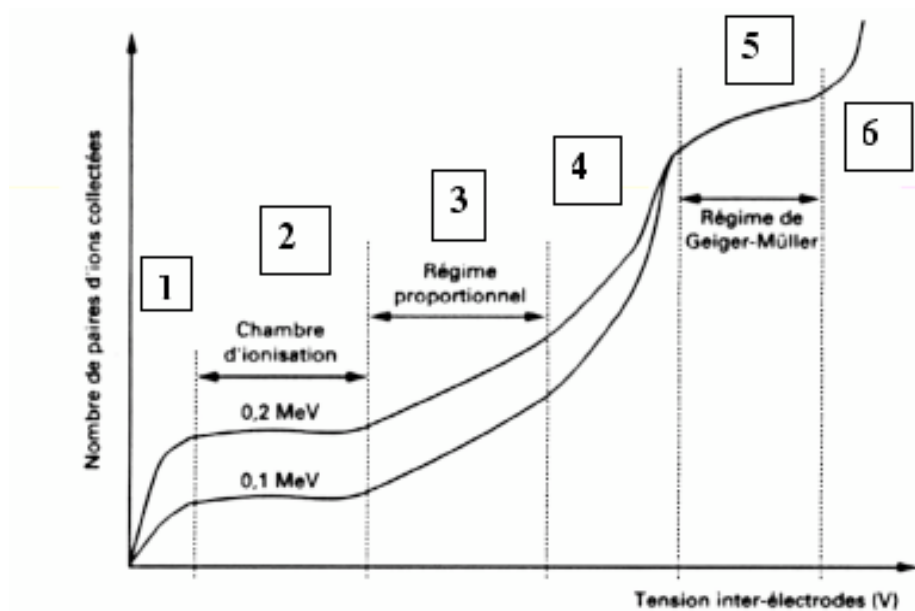
4.4 Les électrons de conversion interne (monoénergétiques β^-)

5 Détections des rayonnements

5.1 Détecteurs utilisant l'ionisation

a) Détecteurs à gaz

- **Chambre d'ionisation**
- **Compteur proportionnel**
- **Compteur Geiger-Müller**



b) Emulsion photographique

Figure 4 – Les différents modes de fonctionnement des détecteurs à gaz

5.2 Détecteurs utilisant l'excitation

a) Détecteurs à scintillation (photomultiplicateurs)

b) Détecteurs semi-conducteurs

5.3 Autres utilisation des détecteurs → Spectrométrie / chromatographie

NB : Les photons X peuvent être produits :

- par rayonnement de freinage
- par capture électronique
- par fluorescence

6 Principaux isotopes utilisés en routine en scintigraphie

(À retenir : Iode(s), Technetium, Talium, Indium, Xenon)

Les plus utilisés des émetteurs gamma sont le technétium ^{99m}Tc , le thallium ^{201}Tl , le xénon ^{133}Xe , l'iode ^{131}I , l'indium ^{111}In (tableau 2).

Isotopes	Energie gamma (keV)	Demi-vie physique (heures)
Technétium ^{99m}Tc	140	6
Iode ^{123}I	159	13
Thallium ^{201}Tl	75 et 135	73
Xénon ^{133}Xe	81	127
Indium ^{111}In	173 et 247	67

Tableau 2 : Principaux isotopes utilisés en routine

Le technétium mérite une attention particulière ; il est de loin le plus utilisé, car il présente plusieurs avantages :

- Les photons gamma qu'il émet ont une énergie optimale pour un maximum de sensibilité des systèmes usuels de détection.
- Sa demi-vie physique est de 6h : elle est par conséquent assez brève pour limiter l'irradiation du sujet, et assez longue pour que la décroissance soit négligeable lors des acquisitions durant quelques minutes.
- Cet élément est facilement disponible en routine.
- Il peut être associé à de nombreuses molécules ayant un intérêt biologique.
- Il est relativement peu coûteux par rapport à d'autres isotopes.

Pour toutes ces raisons, il est utilisé dans une grande majorité des examens de Médecine Nucléaire.

1.2. Utilisation des radioisotopes

1.2.1. Terminologie

Le radio-isotope est appelé *le marqueur* ; la molécule à laquelle il est éventuellement associé est appelée *le vecteur*. L'ensemble forme le *traceur radioactif* ou *radiotraceur* ou *radiopharmaceutique*. Il se comporte comme un micro-émetteur gamma, détectable à l'aide de dispositifs tels que les gamma-caméras.

1.2.2. Mode d'administration

Le radio-isotope peut être administré :

- seul (ex. xénon ^{133}Xe)
- associé à des molécules non biologiques (ex. pertechnétate de sodium $\text{TcO}_4^- + \text{Na}^+$)
- associé à des molécules biologiques (ex. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ associé à la sérum-albumine)
- associé à des structures présentes dans l'organisme (ex. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dans des hématies, ^{111}In dans des plaquettes sanguines)

1.2.3. Voies d'administration

Le traceur peut être administré :

- par voie veineuse (le plus souvent)
- par inhalation (spécialement dans le cas des scintigraphies pulmonaires pour l'étude de la ventilation)
- par voie orale (spécialement pour l'étude de la vidange gastrique et des reflux gastro-œsophagiens)
- par voie intratécale (spécialement pour l'étude de la circulation du liquide céphalo-rachidien)
- par voie artérielle (très rarement)

Il existe des dizaines de radiopharmaceutiques, avec des propriétés physico-chimiques et biologiques spécifiques ; le choix du radiopharmaceutique est fait en fonction de l'organe à explorer et de la pathologie (figure 2).

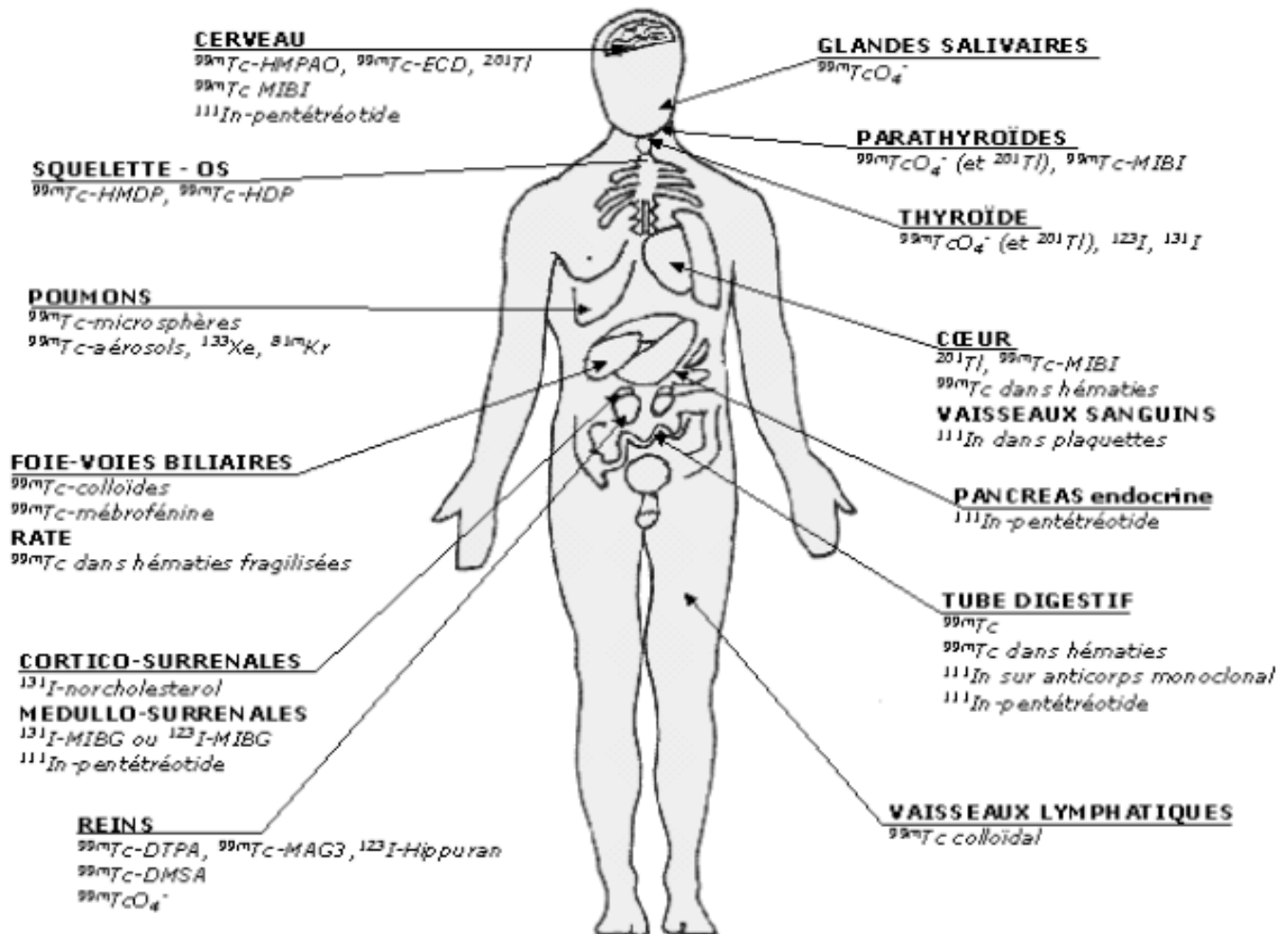


Figure 2 : Explorations fonctionnelles des principaux organes à l'aide de quelques radiotraceurs. Le technétium est l'isotope le plus utilisé.

- Iode → Scintigraphie, thyroïde
- Technetium → poumon, Coeur/GR, thyroïde
- Talium → Scintigraphie cardiaque, capital potassique cardiaque
- HMPAO+Tc → Perfusion cérébrale

1.2.5. Phénomènes étudiés

On peut observer à l'aide de ces traceurs essentiellement trois phénomènes :

- l'invasion vasculaire de la zone d'intérêt par le traceur
- la captation et/ou l'accumulation
- l'élimination

1.2.6. Quelques indications

Le grand nombre d'organes accessibles à l'examen scintigraphique et les multiples radiotraceurs font qu'il existe des dizaines d'indications à la scintigraphie.

A titre d'illustration, on mentionnera brièvement :

- visualisation de métastases osseuses
- recherche de nodules thyroïdiens hyper ou hypoactifs
- diagnostic d'embolie pulmonaire
- étude de la viabilité myocardique
- mesure de la fraction d'éjection du ventricule gauche
- recherche de sténose artérielle rénale
- estimation de la vascularisation d'un greffon rénal
- accidents vasculaires cérébraux, ischémies, anévrysmes
- recherche et localisation de rates surnuméraires
- recherche d'une hémorragie digestive
- recherche de foyers infectieux (p.ex. après la pose d'une prothèse)
- visualisation de certaines cellules tumorales (entre autres : tractus gastro-intestinal, pancréas endocrine, cortico-surrénales, cerveau...)

Élément	Symbole	Nombre de masse (A)	Numéro atomique (Z)	Période (T)	Principales émissions	
					(keV)	%
Tritium	H	3	1	12,26 ans	β^- (18,5)	100
Carbone	C	11	6	20,5 min.	β^+ (980) [2 γ (511)]	100
Carbone	C	14	6	5 730 ans	β^- (156)	100
Oxygène	O	15	8	124 s	β^+ (1 720) [2 γ (511)]	100
Sodium	Na	24	11	15 h	β^- (1 392) γ (1 369) γ (2754)	100 100 100
Phosphore	P	32	15	14,3 j	β^- (1710)	100
Soufre	S	35	16	87,9 j	β^- (167,3)	100
Chrome	Cr	51	24	27,8 j	γ (320)	9,9
Fer	Fe	59	26	44,6 j	β^- (467) β^- (274) γ (1099) γ (1292)	53 46 56 44
Cobalt	Co	60	27	5,3 ans	β^- (319) γ (1333) γ (1173)	100 100 100
Brome	Br	82	35	35,3 h	β^- (444) γ (777) γ (554) γ (619)	98 83 72 43
Technetium	Tc	99m	43	6 h	γ (140)	90
Indium	In	113m	49	99,8 h	γ (392)	64
Iode	I	125	53	60,2 j	γ (35,5)	6,6
Iode	I	131	53	8,05 j	β^- (608) γ (364,5)	87 80
Xénon	Xe	133	54	5,27 j	β^- (346) γ (81)	100 37
Caesium	Cs	137	55	30 ans	γ (662)	85
Iridium	Ir	192	77	74 j	β^- (670) β^- (590) γ (317) γ (468)	48 41 81 47
Or	Au	198	79	2,7 j	β^- (961) γ (412)	99 96

Les particules élémentaires

Dénomination	Symbole	Masse		Charge en e
		en uma	en MeV	
Électron	e^- ou β^-	0,000548	0,511	-1
Proton	p ou H^+	1,00727	938,256	+1
Neutron	n	1,00866	939,550	0
Positon	e^+ ou β^+	0,000548	0,511	+1
Hélium	α ou He^{++}	4,00150	3727,31	+2
Neutrino	ν	?	?	0