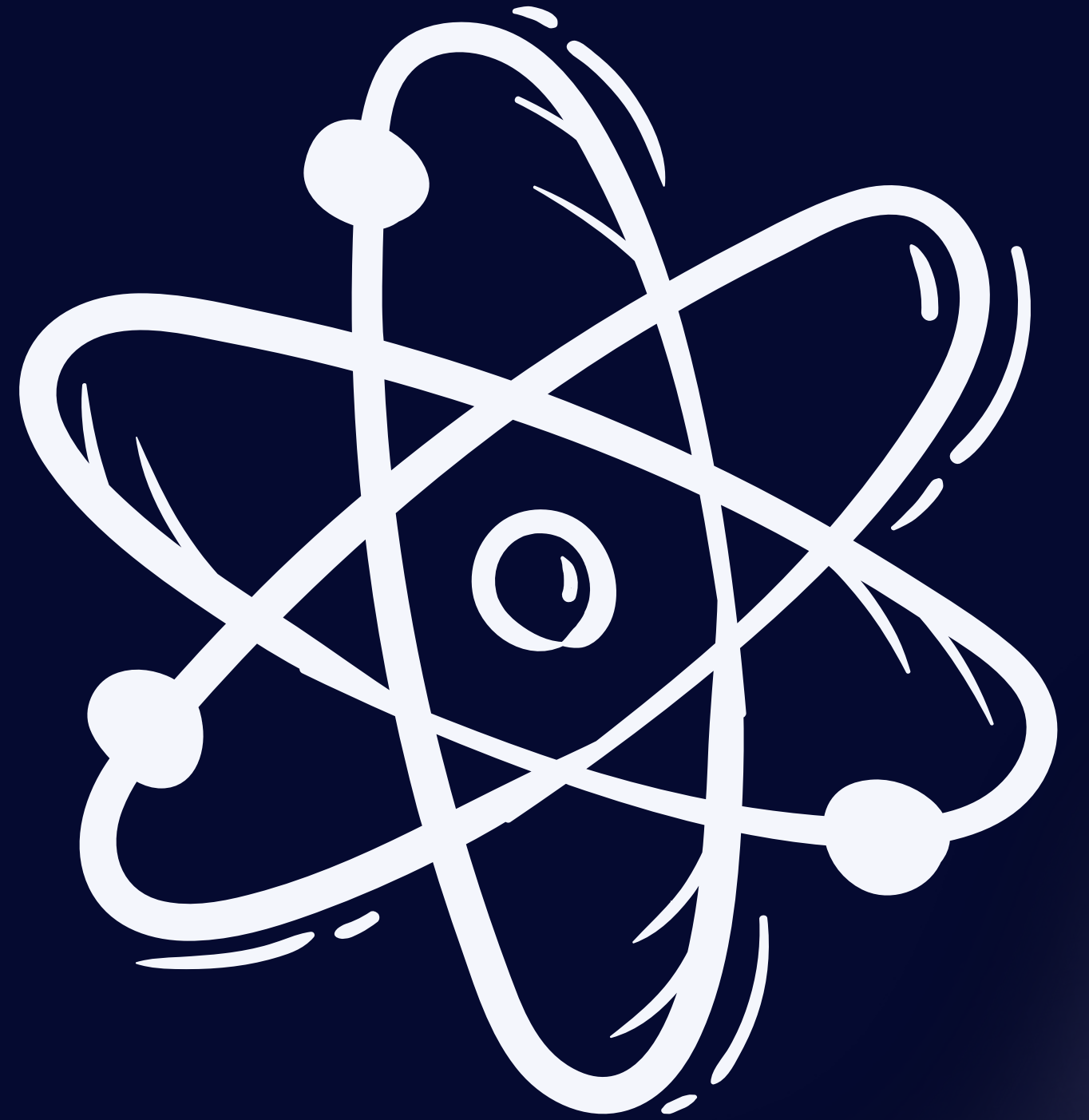


11 décembre 2025

MICRO-568 Seminar in physiology and instrumentation

Imagerie PET

CAMILLE BEGON





Sommaire



1

Introduction

2

Fonctionnement du PET scan

3

Applications actuelles et futures

4

Forces et limites du PET scan

5

Conclusion et perspectives futures



Imagerie Médicale

En bref



MRI
Magnetic Resonance Imaging

→ basé sur des champs magnétiques

Imagerie anatomique et tissulaire : structure fine et contraste élevé

CT scan
Computed Tomography

→ basé sur des rayons X

Imagerie morphologique : densité des tissus, os, organes

PET scan
Positron Emission Tomography

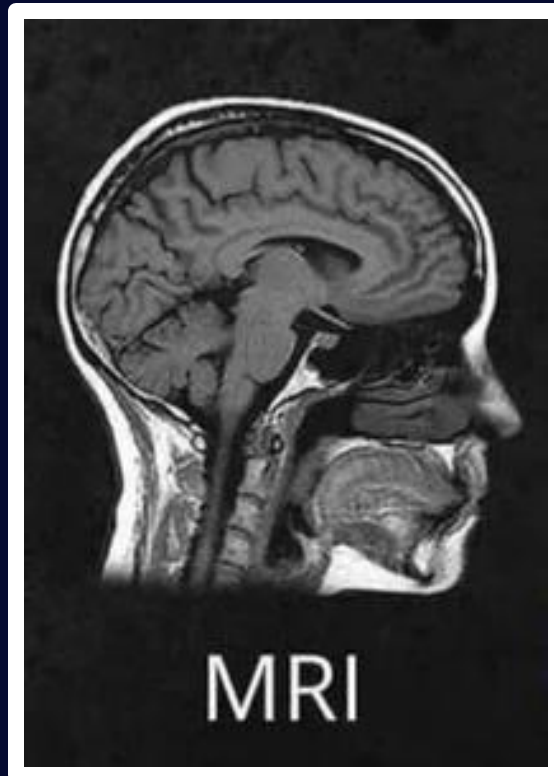
→ basé sur la distribution d'un traceur radioactif

Imagerie fonctionnelle : activité métabolique et moléculaire



Imagerie Médicale

En bref

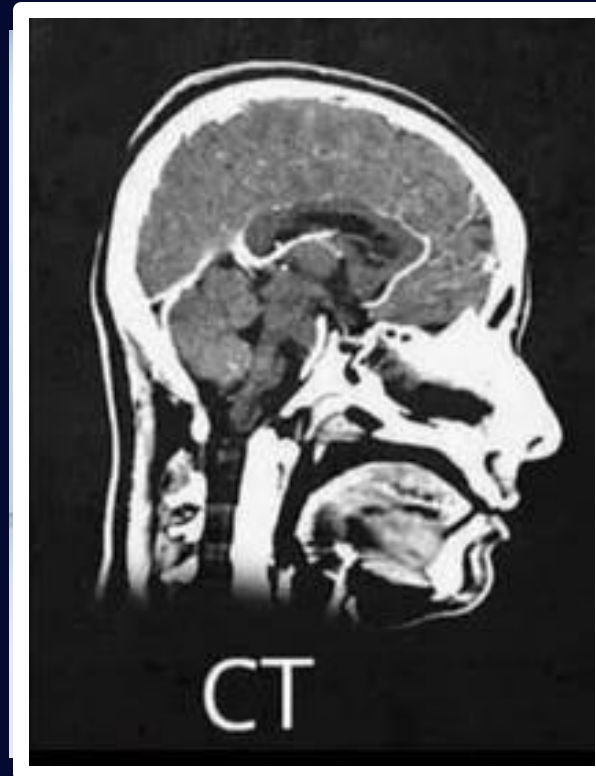


MRI

MRI
Magnetic Resonance Imaging

→ basé sur des champs magnétiques

Imagerie anatomique et tissulaire : structure fine et contraste élevé

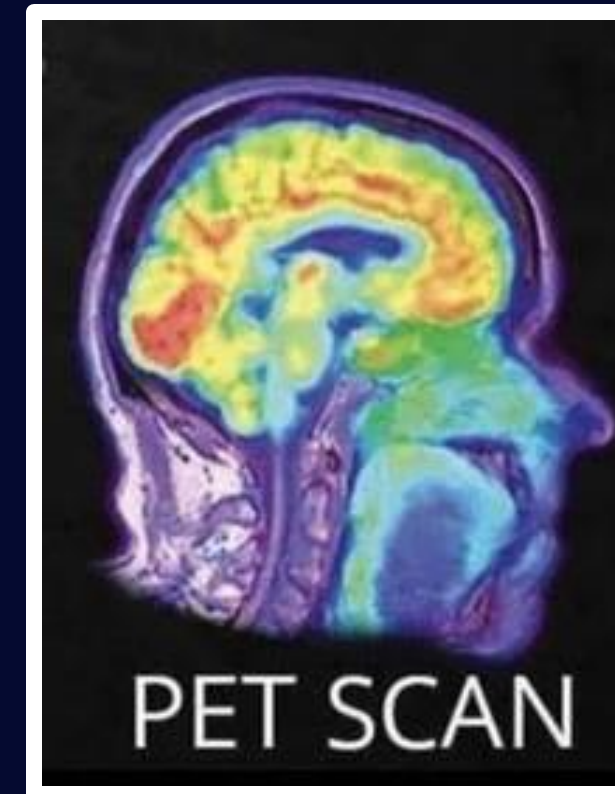


CT

CT scan
Computed Tomography

→ basé sur des rayons X

Imagerie morphologique : densité des tissus, os, organes



PET SCAN

PET scan
Positron Emission Tomography

→ basé sur la distribution d'un traceur radioactif

Imagerie fonctionnelle : activité métabolique et moléculaire



Sommaire

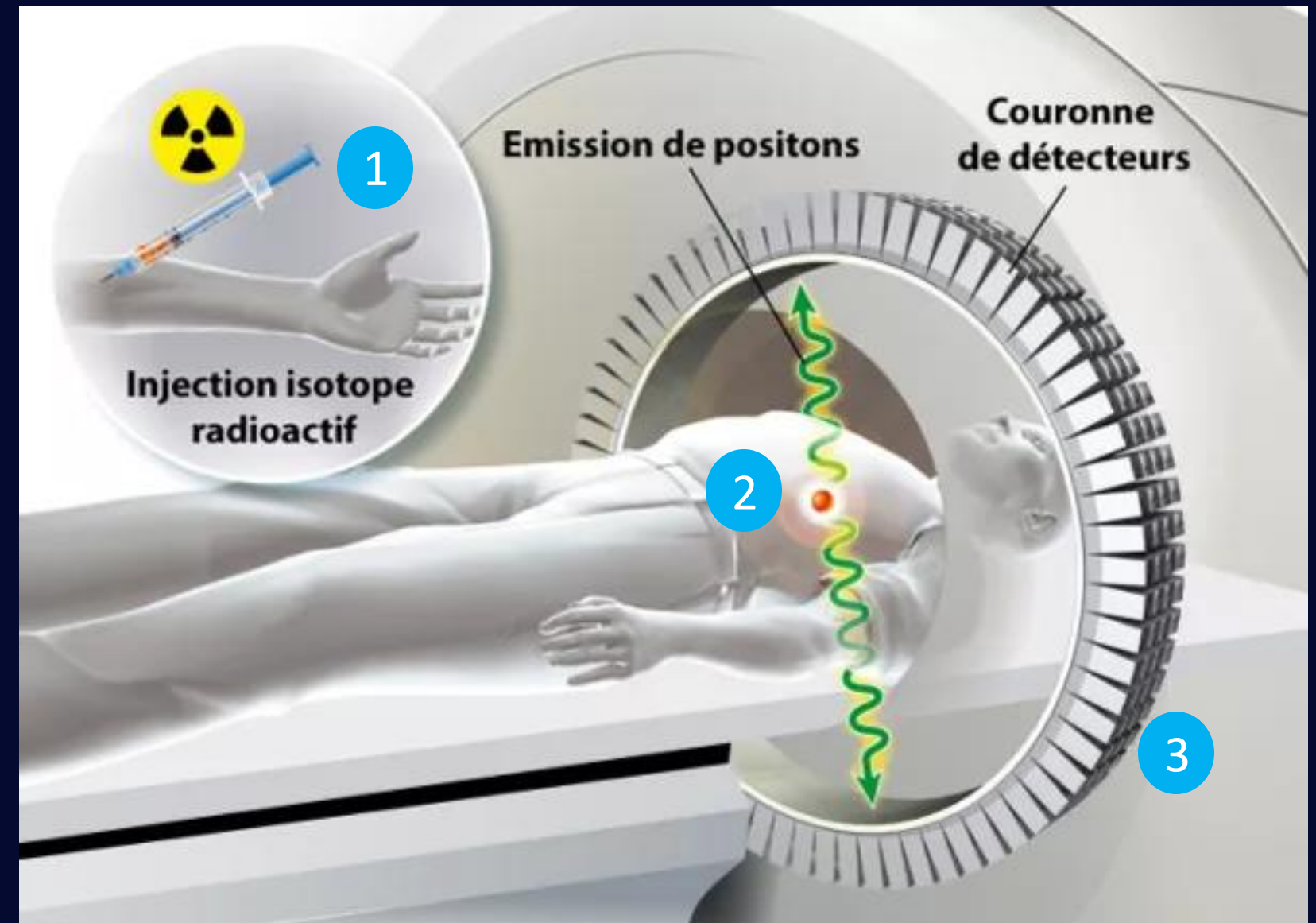


- 1 Introduction
- 2 Fonctionnement du PET scan**
- 3 Quelles sont ses principales applications ?
- 4 Forces et limites du PET scan
- 5 Conclusion et perspectives futures



Principe de base

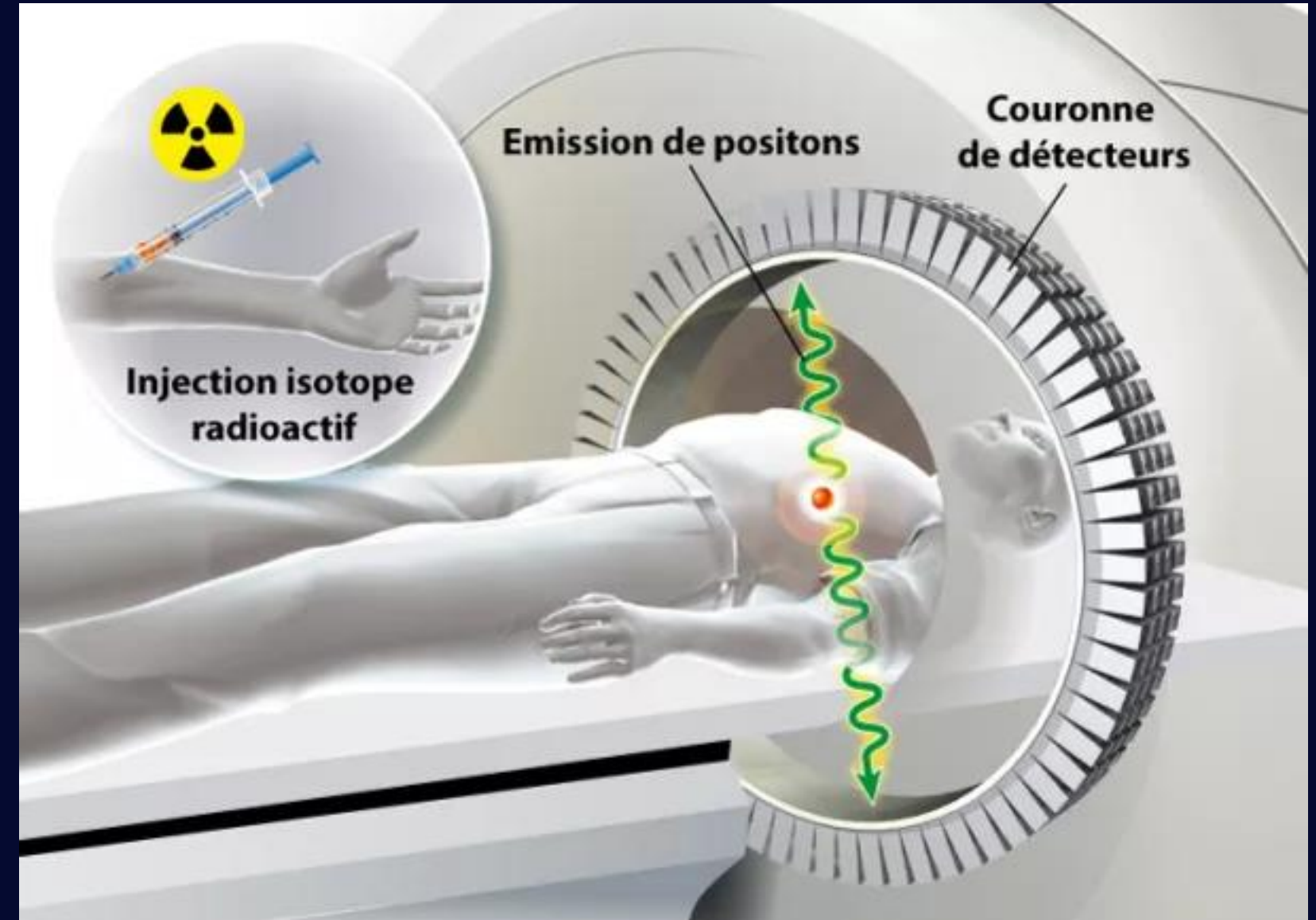
1. Injection d'un **traceur radioactif**
2. Le traceur se distribue selon l'**activité métabolique** des tissus
3. Détection du rayonnement par le scanner
4. Reconstruction informatique d'images 3D
5. Visualisation de l'activité métabolique





Principe de base

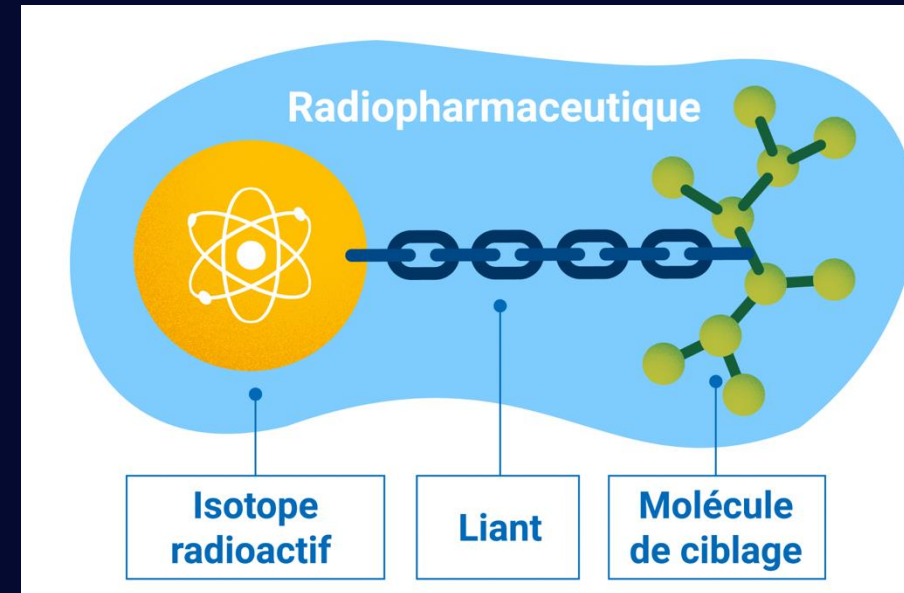
1. Injection d'un **traceur radioactif**
2. Le traceur se distribue selon l'**activité métabolique** des tissus
3. Détection du rayonnement par le scanner
4. Reconstruction informatique d'images 3D
5. Visualisation de l'activité métabolique





Traceurs

Un **traceur** est une substance chimique ou biologique utilisée pour **suivre le parcours ou la localisation d'une molécule, d'un ion, d'un organisme ou d'un processus dans un système biologique, chimique ou physique.**

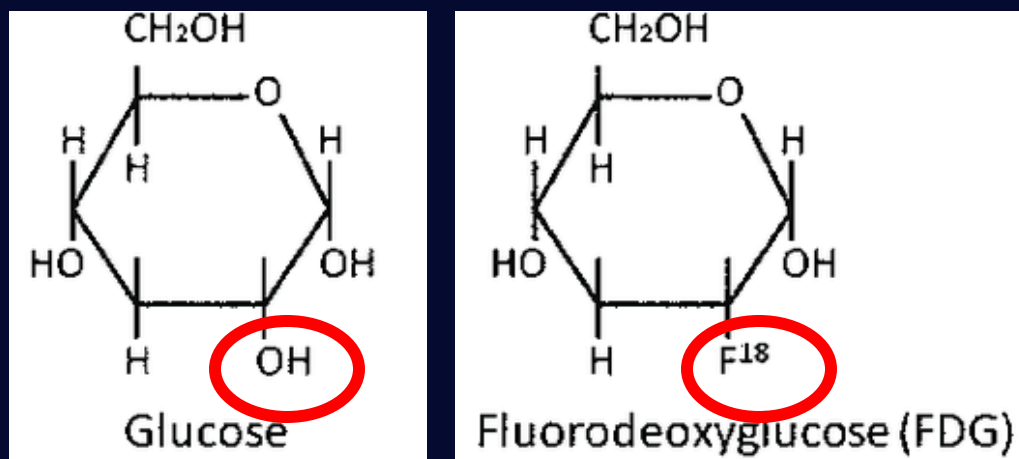


- Molécule biologique naturelle marquée avec un **isotope radioactif**
- Utilisé à des fins diagnostiques ou thérapeutiques
 - **PET-scan: diagnostique**

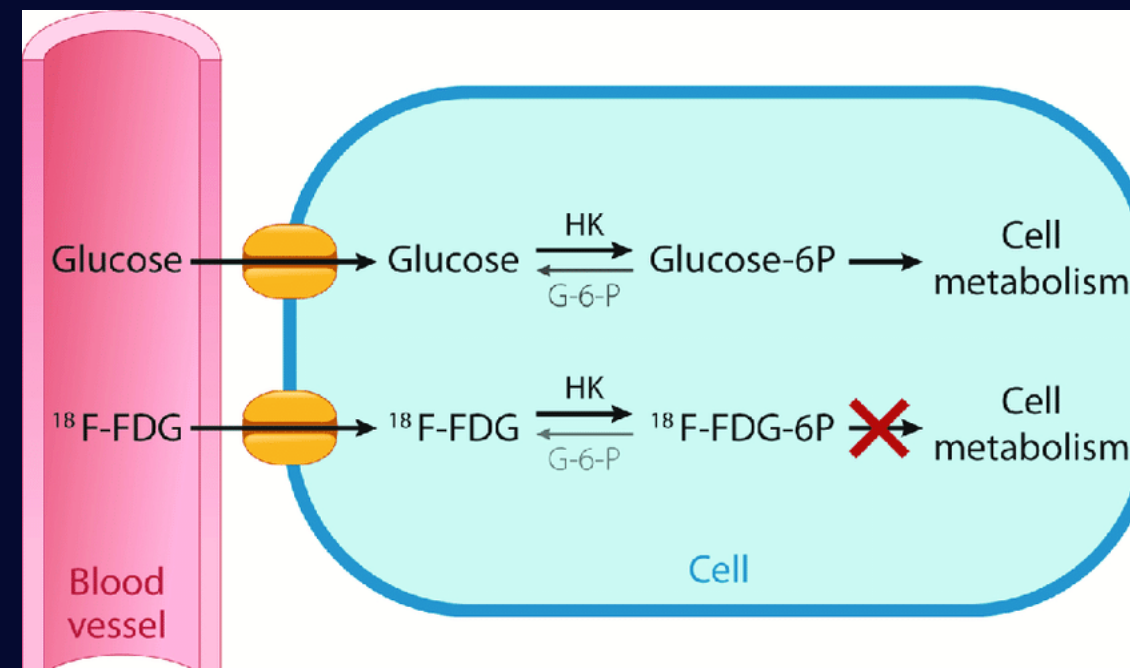
Le cas du FDG

^{18}F -fluorodésoxyglucose (^{18}F -FDG)

Diagnostic oncologique



- Analogue du glucose
- Le groupe **20-hydroxyl** remplacé par du **18F**



- Cellules cancéreuses: consommation accrue de glucose
- Accumulation de FDG dans les cellules cancéreuses

Radioactif ?



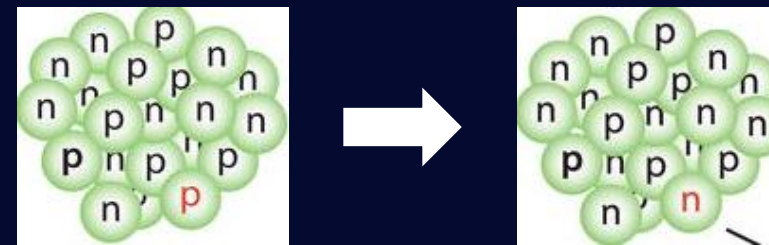
Comment fonctionne un PET scan ?

Réaction Nucléaire?

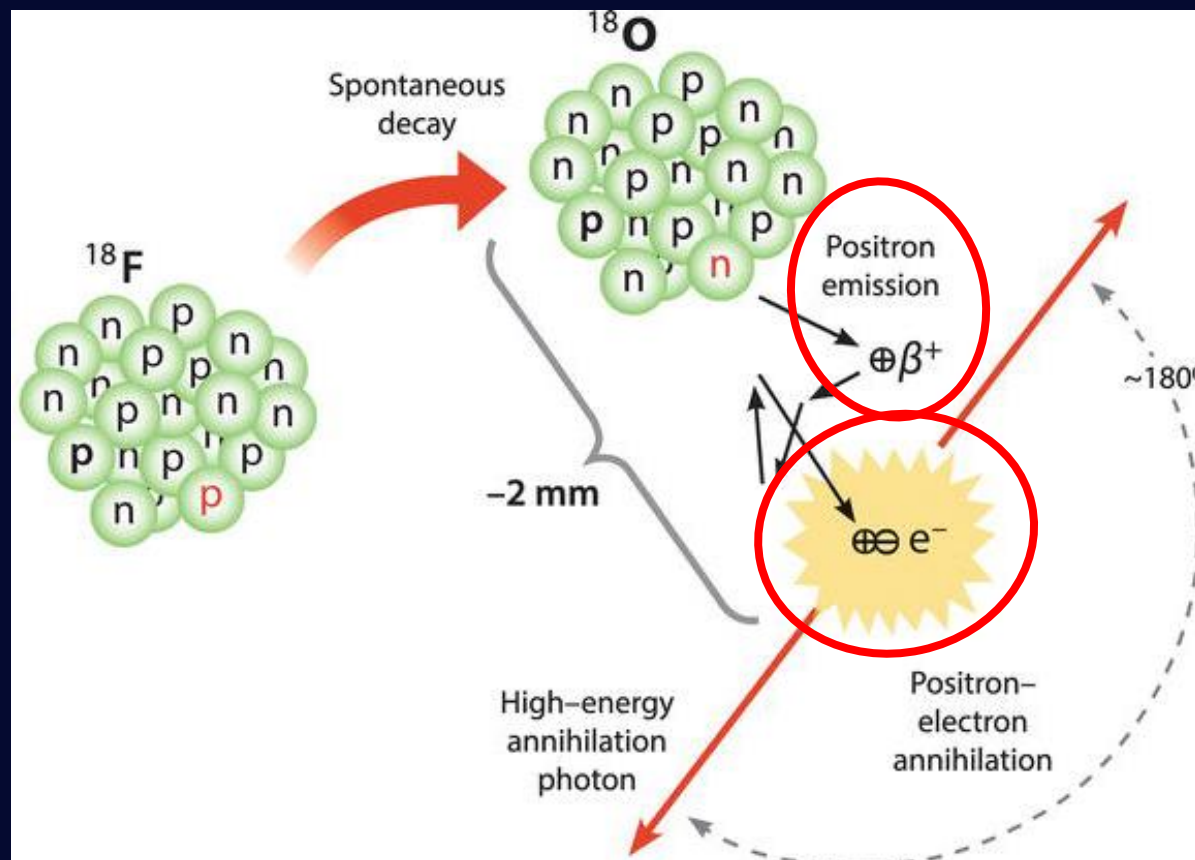
Le cas du FDG – ^{18}F

- Fluor-19: 9 protons + 10 neutrons > **Stable**
- Fluor-18: isotope avec 1 neutron en moins > **Instable**

➔ Va subir une **désintégration β^+**



- Émission d'un **positron** (ou anti-électron) chargé +e



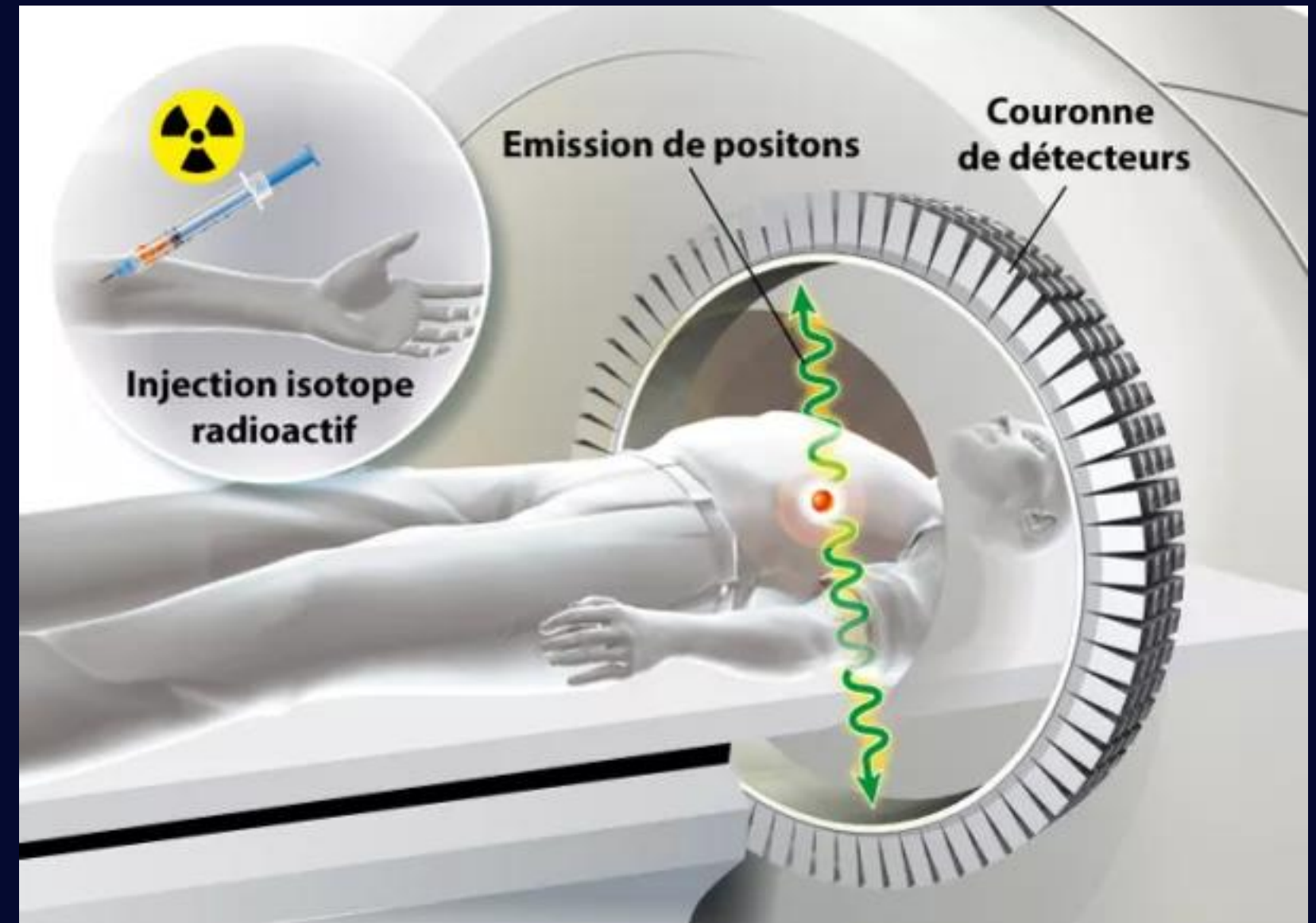
- Le positron va **s'annihiler** avec un électron des alentours
- Leur masse est convertie en énergie, sous forme de **2 photons**

- 1 Energie des photons: **511 keV**
(Loi d'Einstein $E = mc^2$)
- 2 Direction des photons : **opposée (180°)**
(conservation de la quantité de mouvement)



Principe de base

1. Injection d'un **traceur radioactif**
2. Le traceur se distribue selon l'**activité métabolique** des tissus
3. Détection du rayonnement par le scanner
4. Reconstruction informatique d'images 3D
5. Visualisation de l'activité métabolique





Détections des photons

Rayon gamma

Photons de scintillation

Électrons

Beaucoup d'électrons

Courant électrique

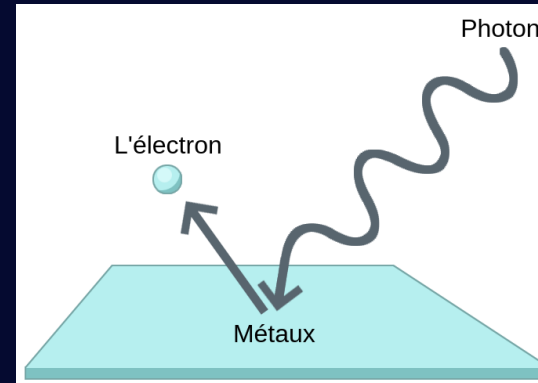
1 Cristaux scintillateurs

- E.g. NaI(Tl) : iodure de sodium dopé au thallium
- Photons de haute énergie > Photons de basse énergie

Domaine du visible « lumière »

2 Photocathode

- Effet photoélectrique

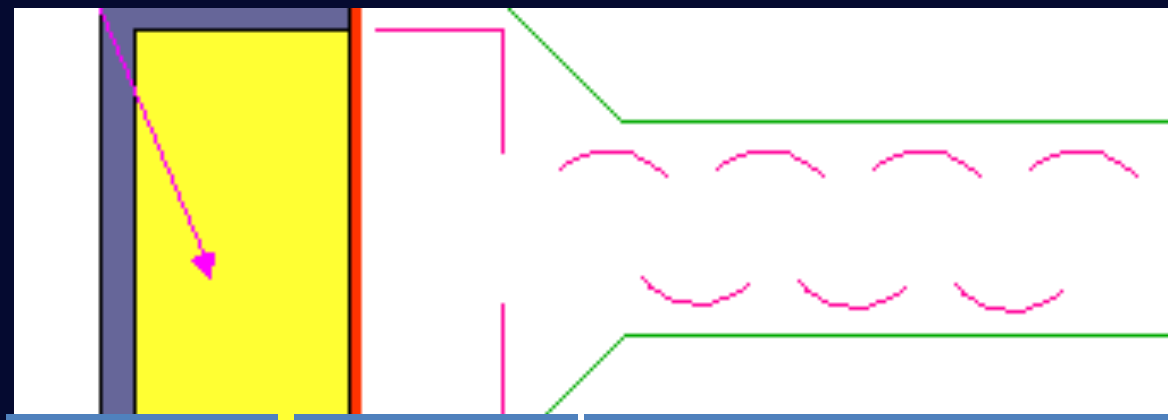


3 Tube photomultiplicateur

- Amplifie le nombre d'électrons

4 Anode

- Convertit le flot d'électrons en une impulsion électrique



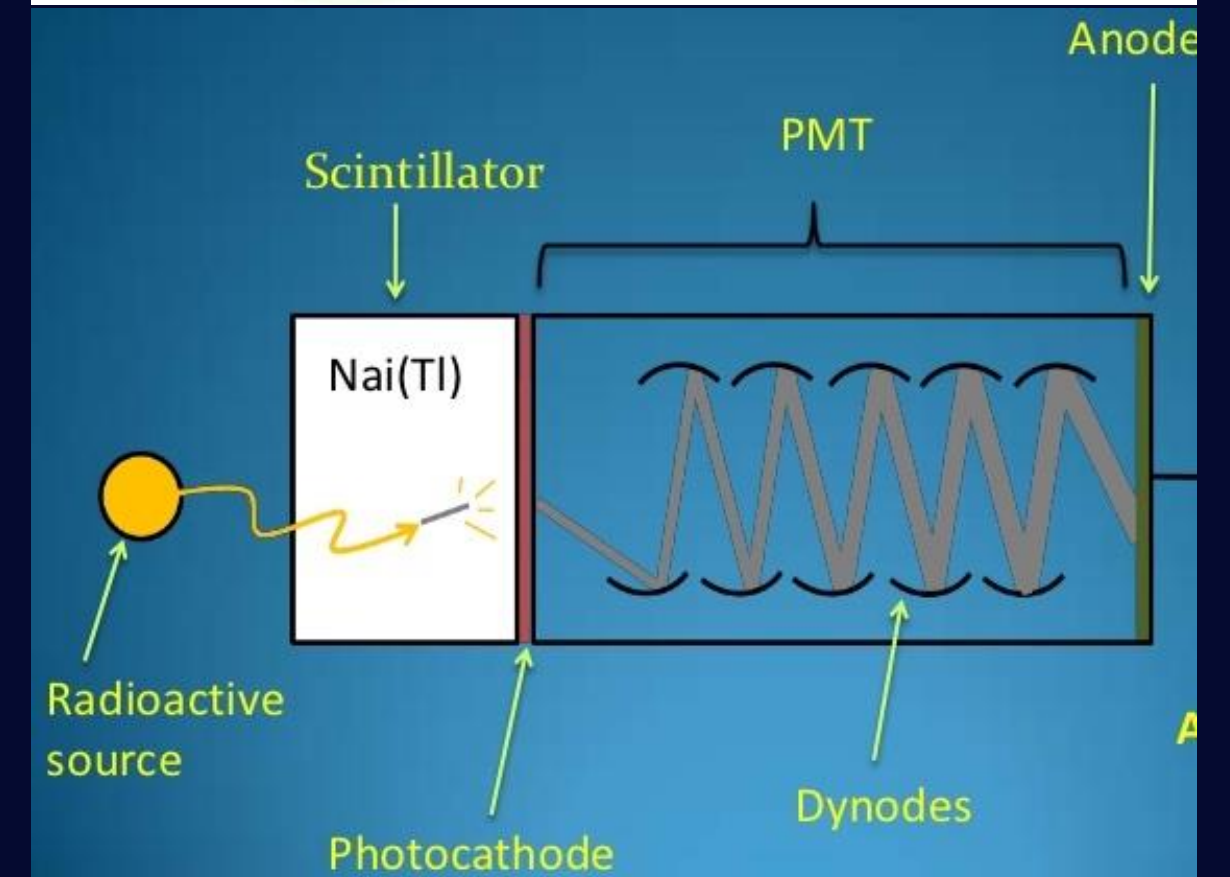
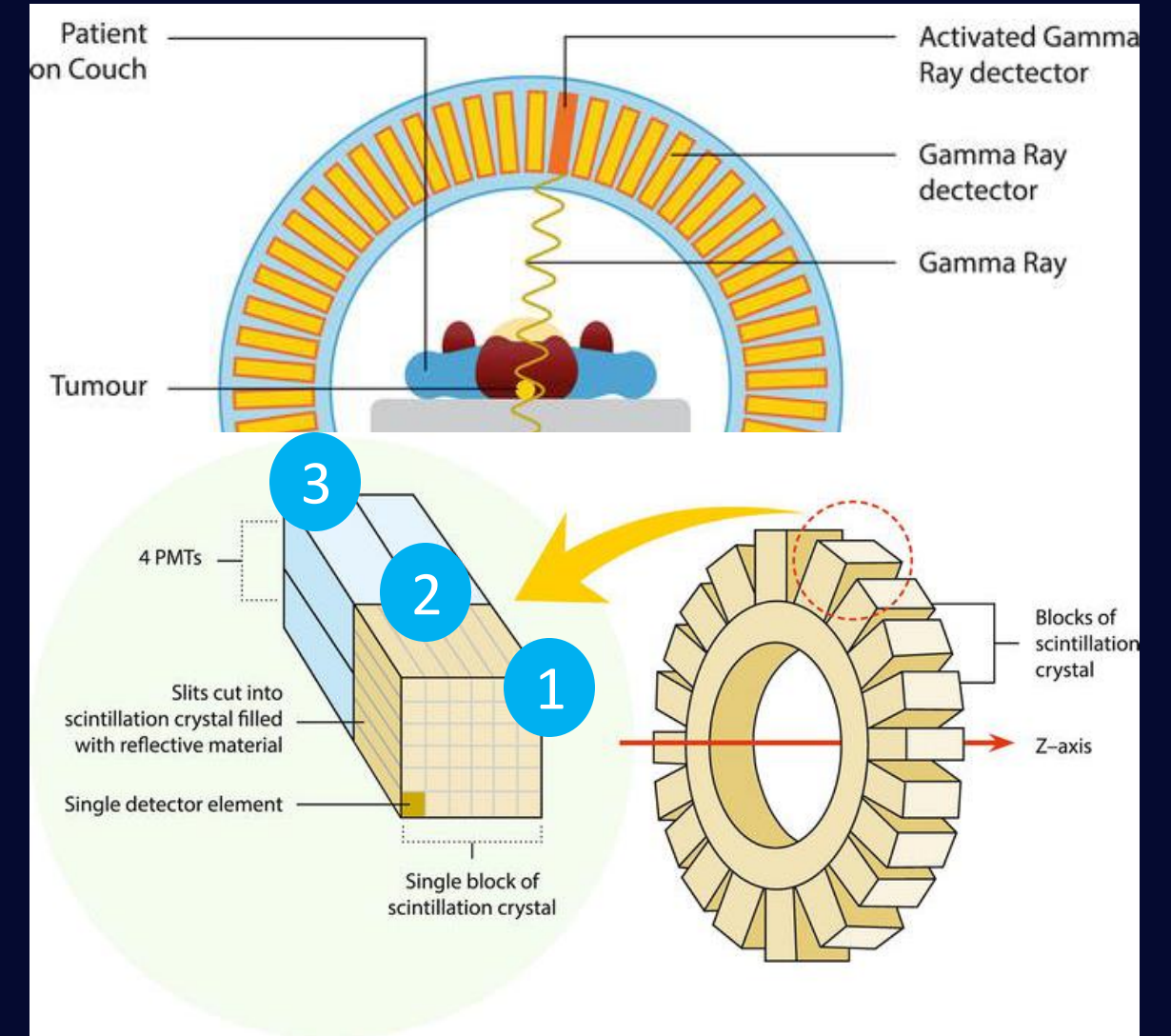
Rayon Gamma

Lumière

Électrons

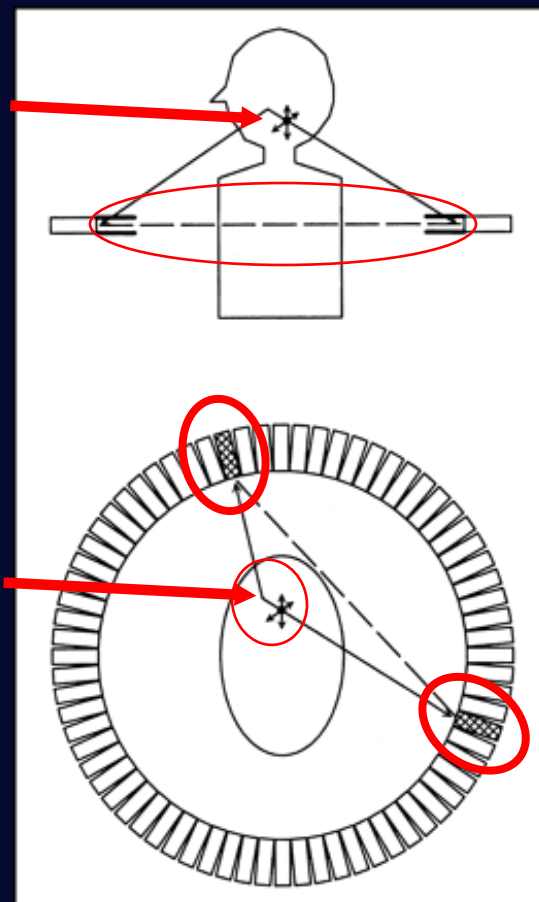
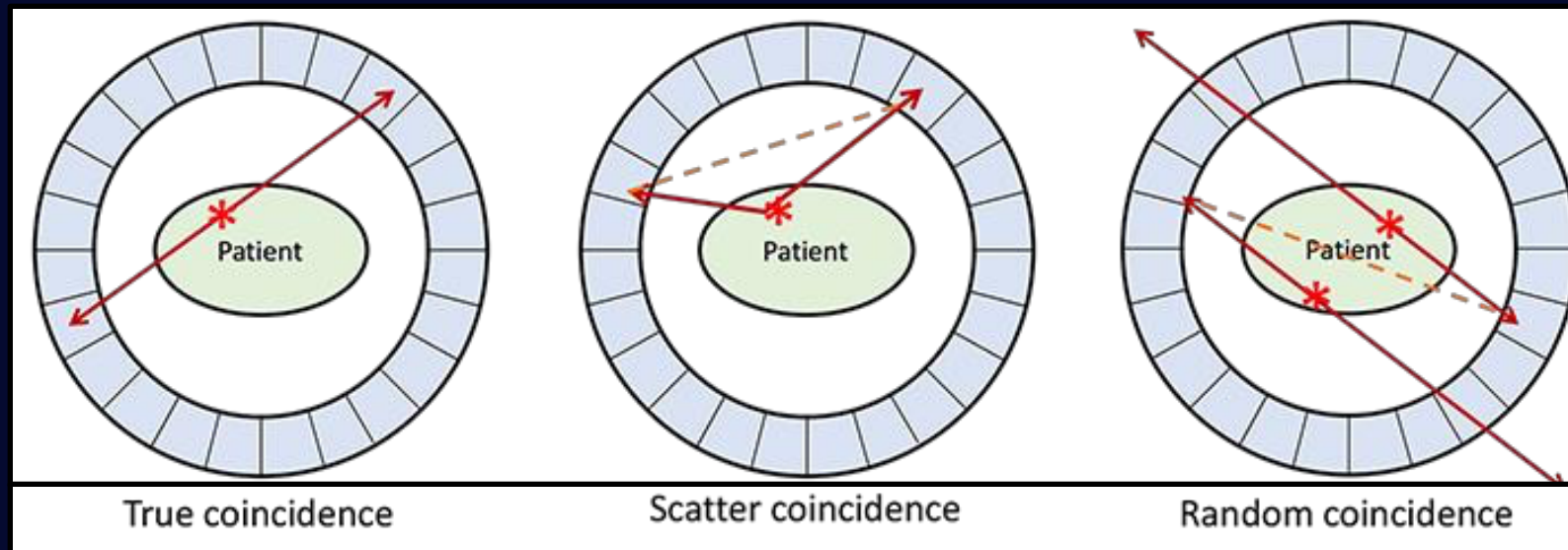
Beaucoup d'électrons

Courant électrique





Détections des (vrais) photons

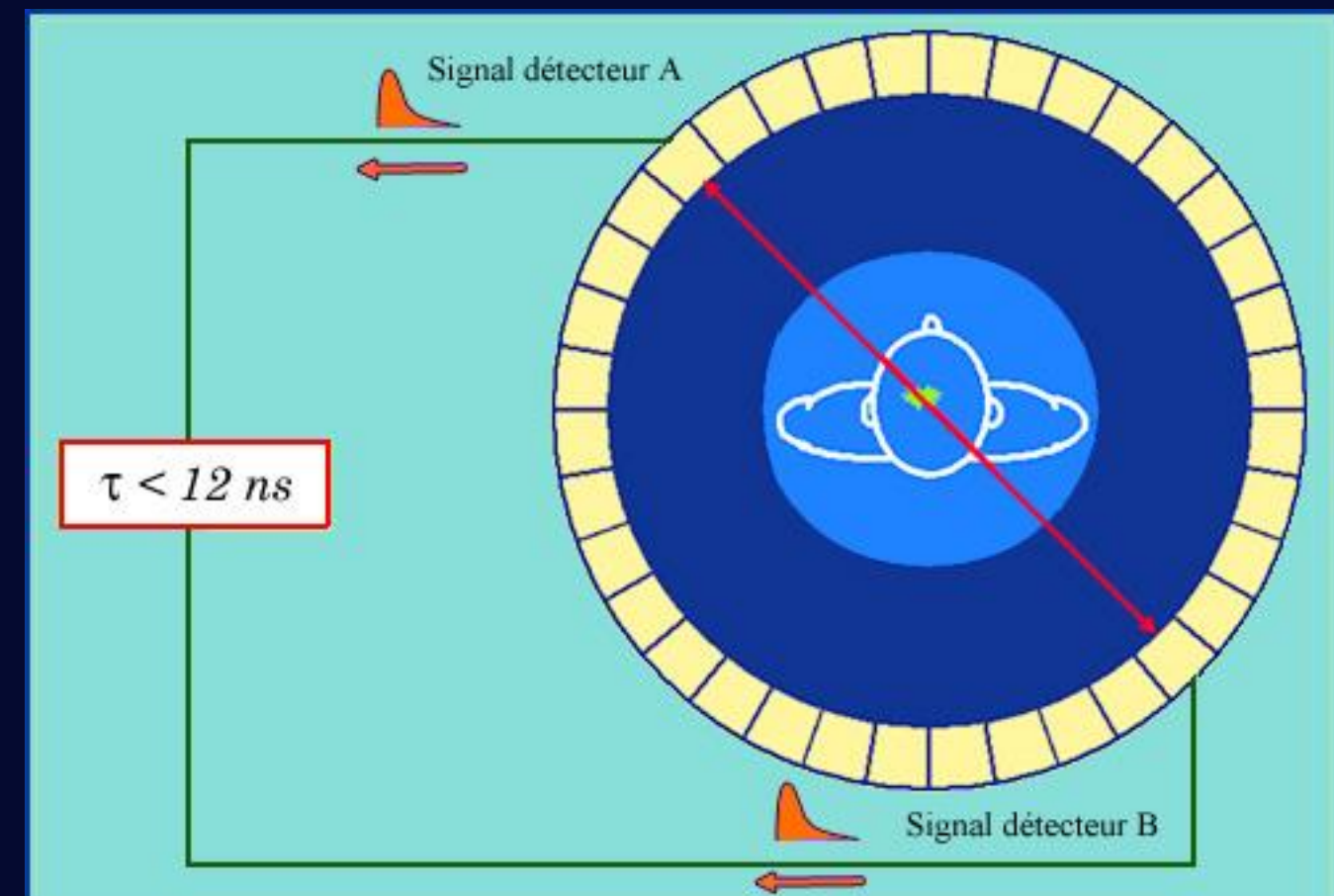
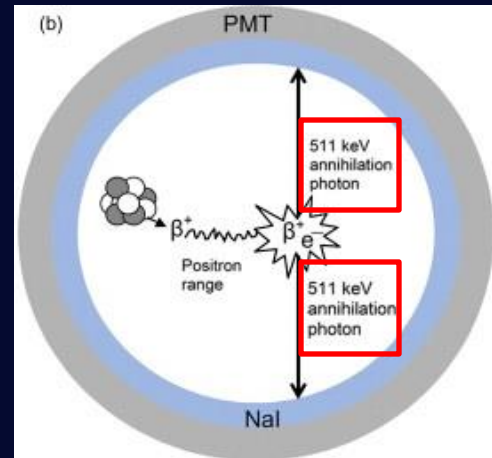


- 1. Scatter coincidences:**
 - photons déviés avant détection
→ **erreurs de localisation**
- 2. Random coincidences :**
 - 2 photons non liés détectés ensemble
→ **bruit**

Ces événements **dégradent la qualité d'image** et la **précision de la reconstruction**.

Solutions pour réduire les coïncidences parasites:

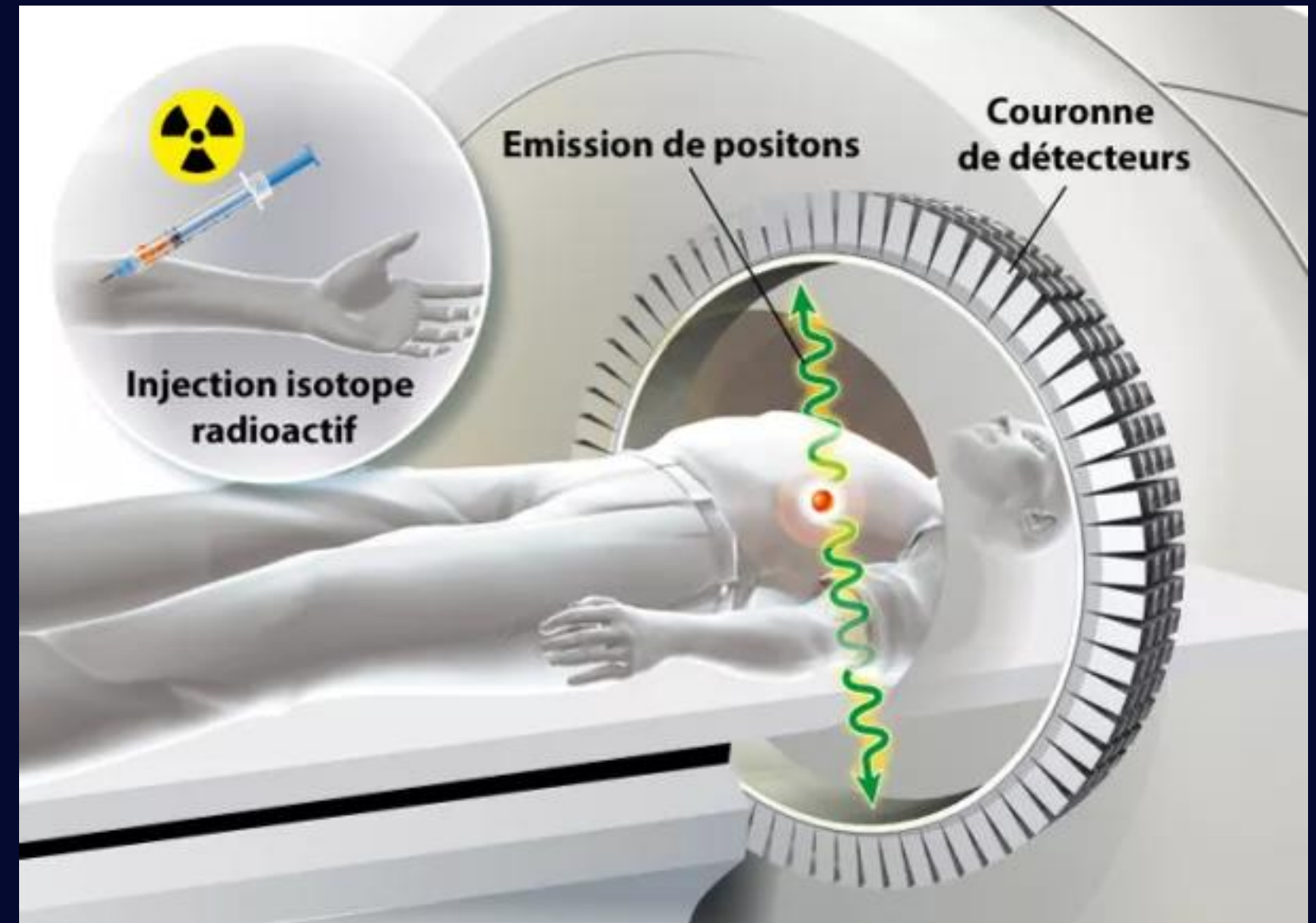
- 1. Fenêtre d'énergie:**
 - rejette les photons avec une énergie $< 511\text{keV}$
- 2. Fenêtre temporelle:**
 - quelques nanosecondes, seuls les photons arrivant quasi simultanément sont acceptés





Principe de base

1. Injection d'un **traceur radioactif**
2. Le traceur se distribue selon l'**activité métabolique** des tissus
3. Détection du rayonnement par le scanner
4. Reconstruction informatique d'images 3D
5. Visualisation de l'activité métabolique



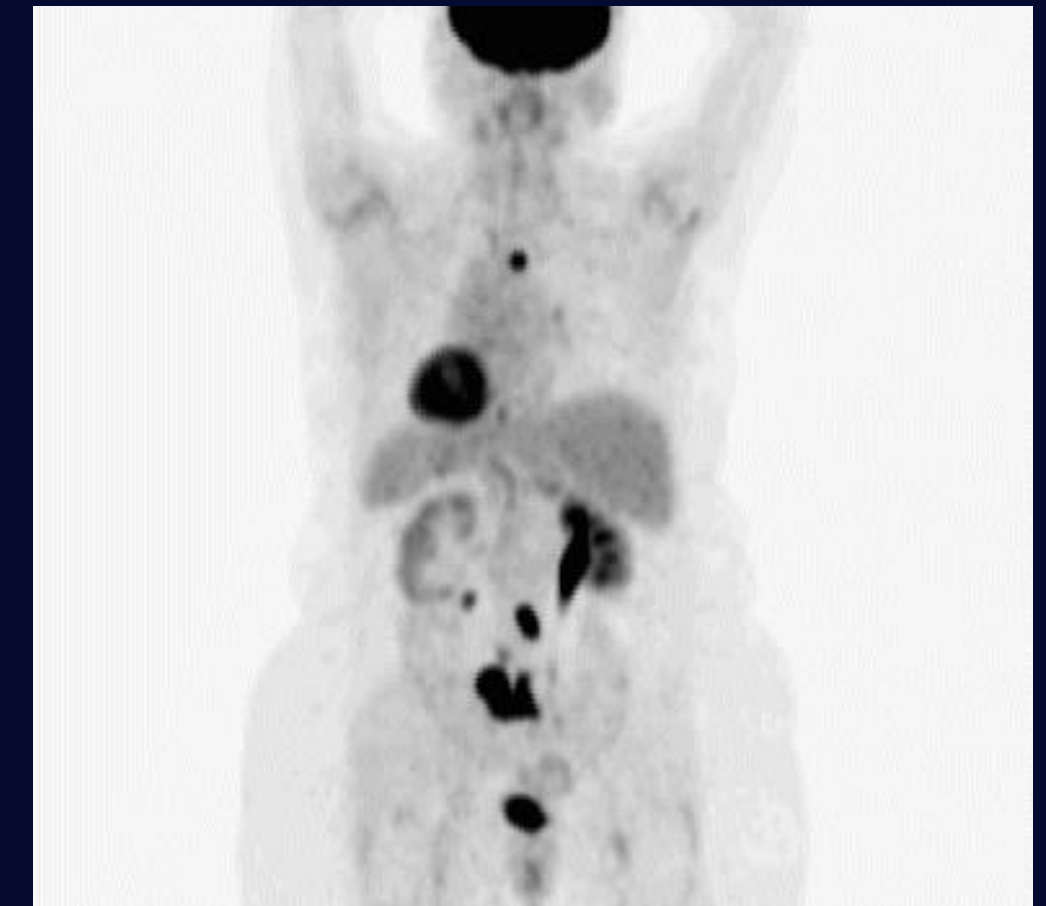
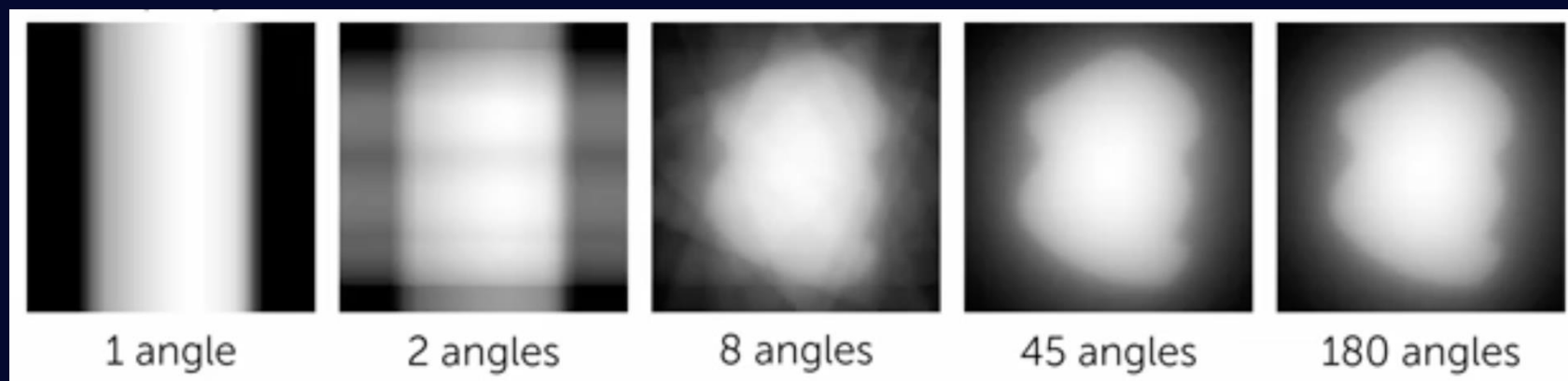


Comment fonctionne un PET scan ?

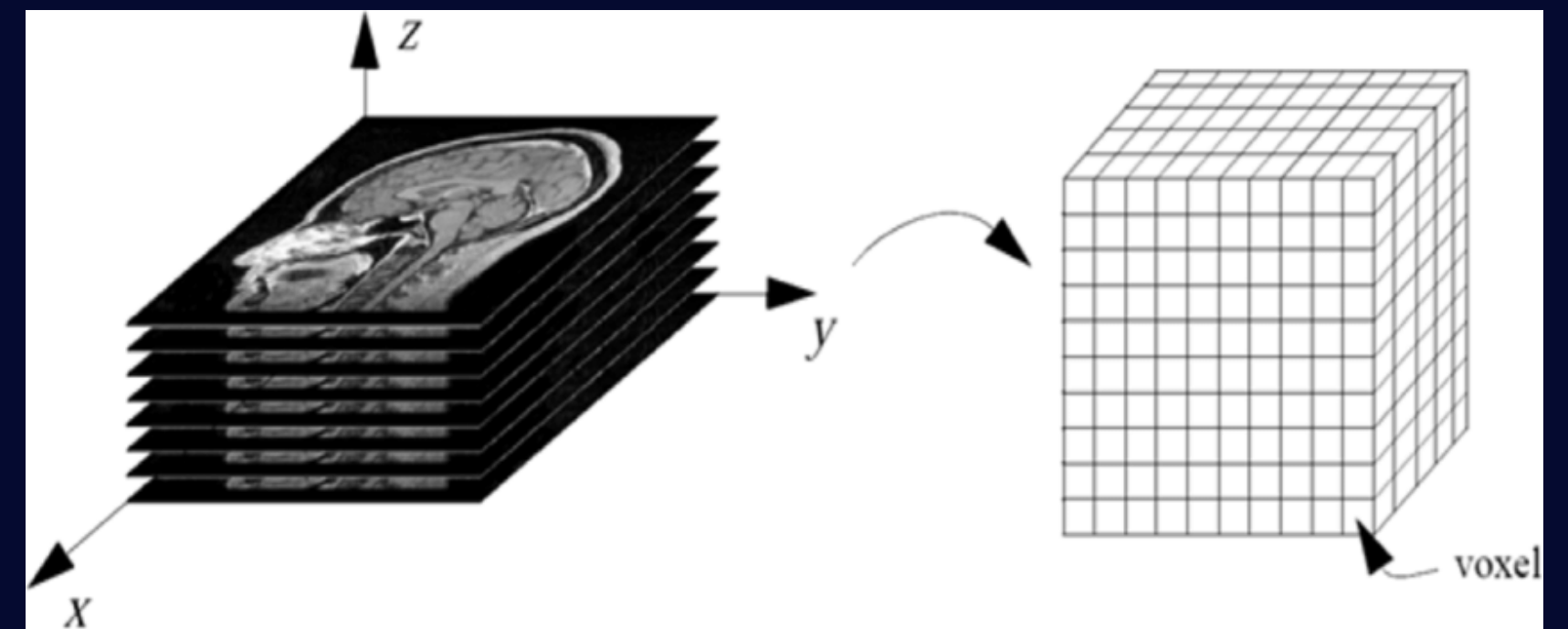
Reconstruction de l'image 3D

**Positron
Emission
Tomography**

- Le terme **tomographie** vient du grec **tomos** (coupe) et **graphia** (écriture), ce qui signifie que l'image est analysée et reconstruite **coupe par coupe**.
- En assemblant toutes ces coupes, la tomographie permet de reconstruire un volume complet, donnant ainsi une image en 3D.
- On s'intéresse donc à reconstruire des images 2D



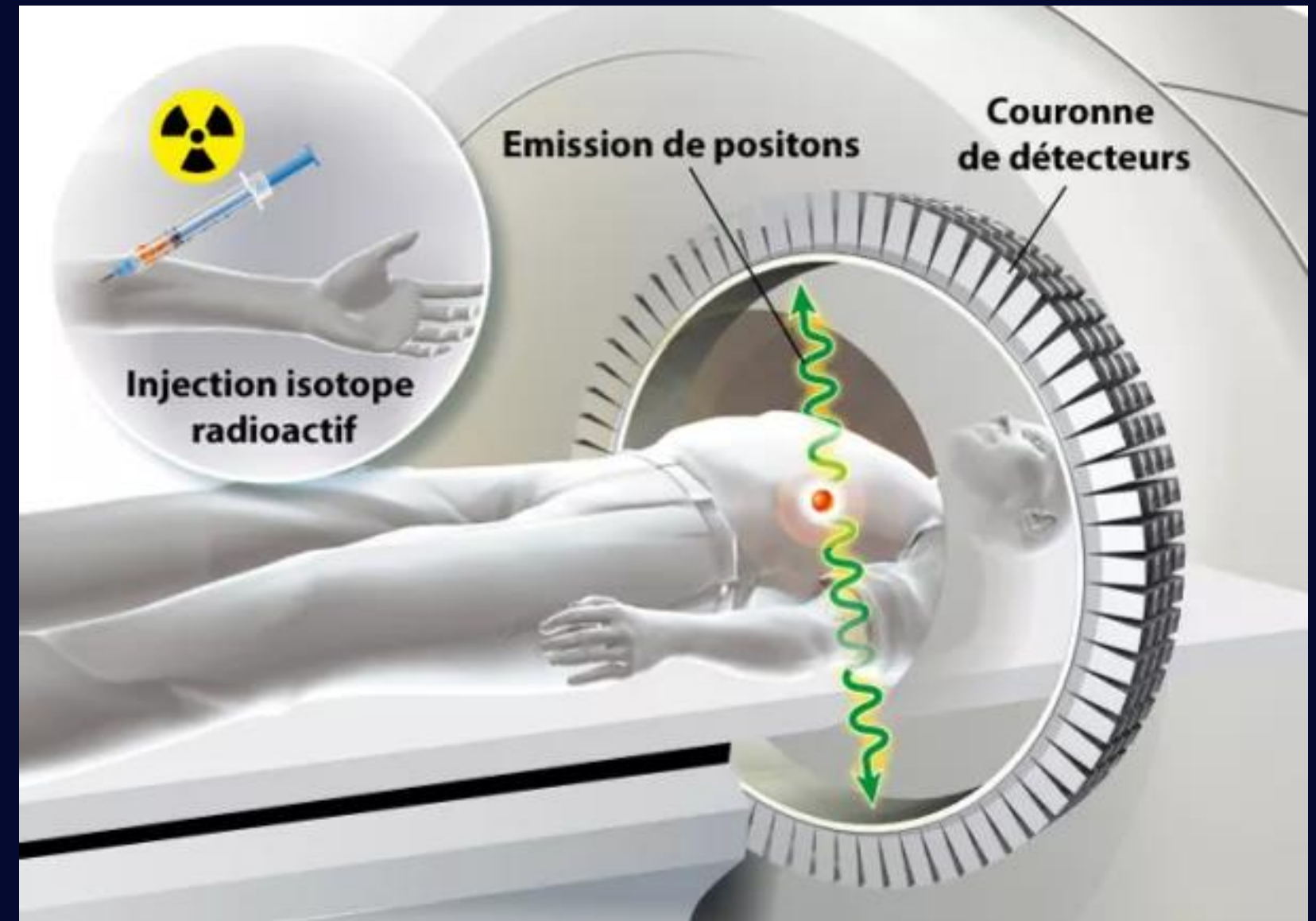
On peut voir l'image 3D comme un empilement de coupes 2D.





Principe de base

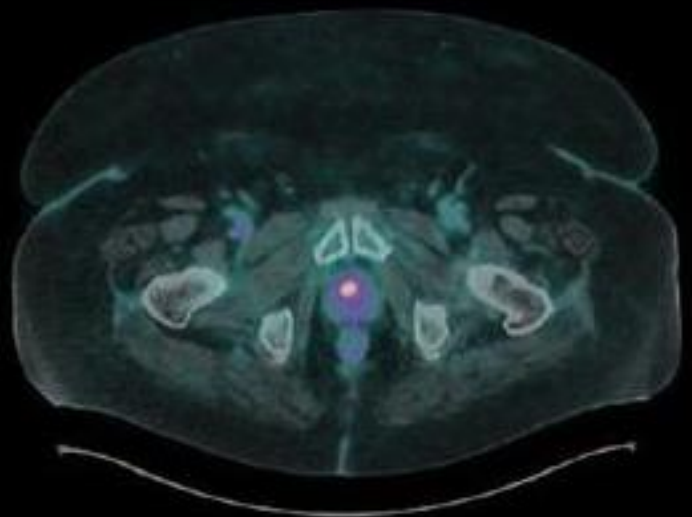
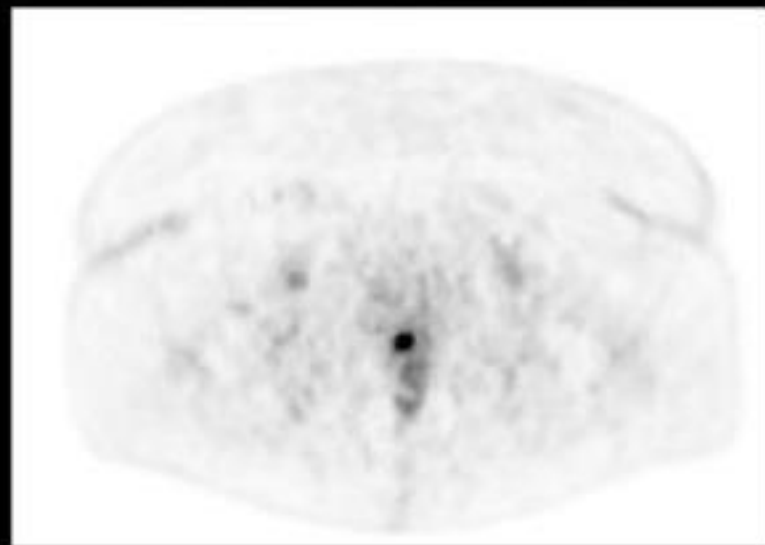
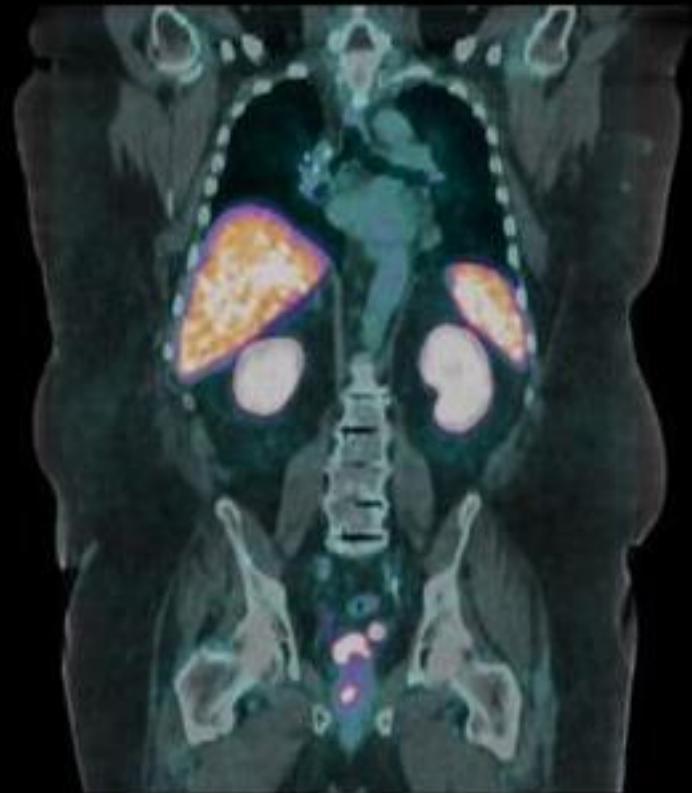
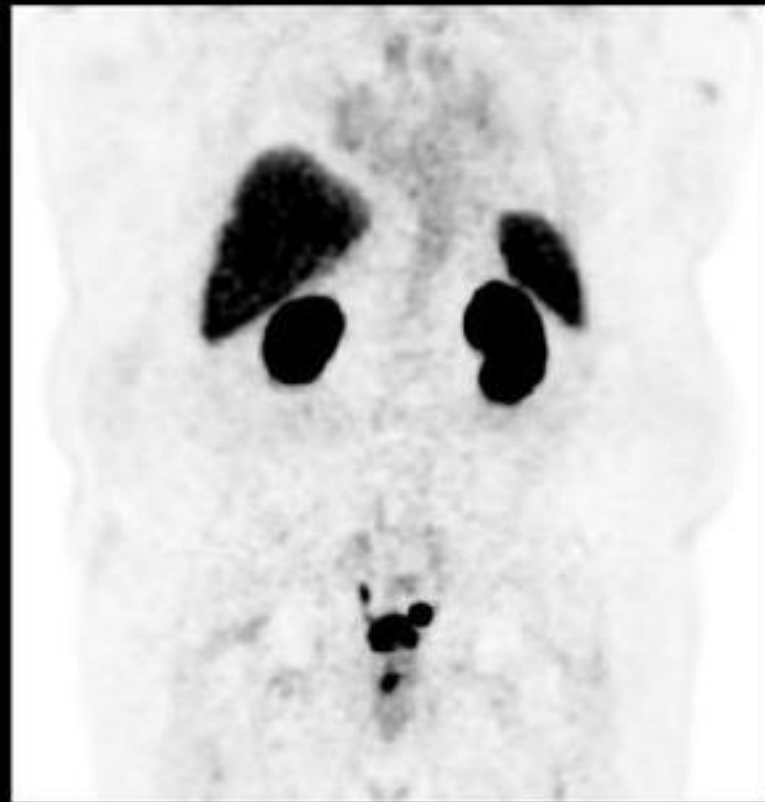
1. Injection d'un **traceur radioactif**
2. Le traceur se distribue selon l'**activité métabolique** des tissus
3. Détection du rayonnement par le scanner
4. Reconstruction informatique d'images 3D
5. Visualisation de l'activité métabolique





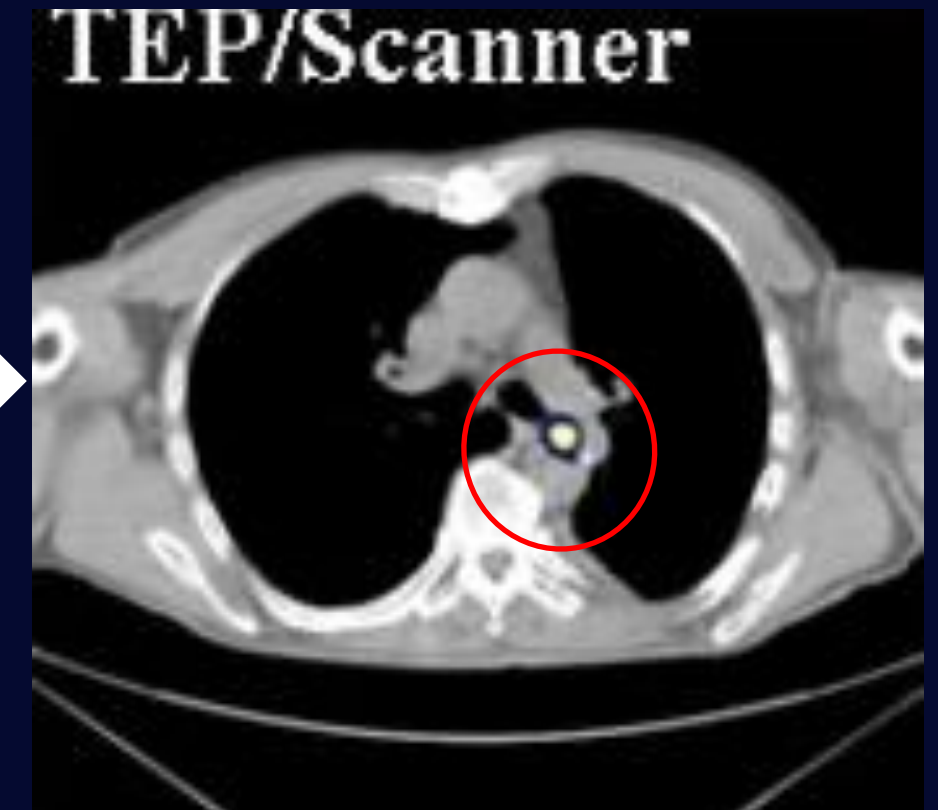
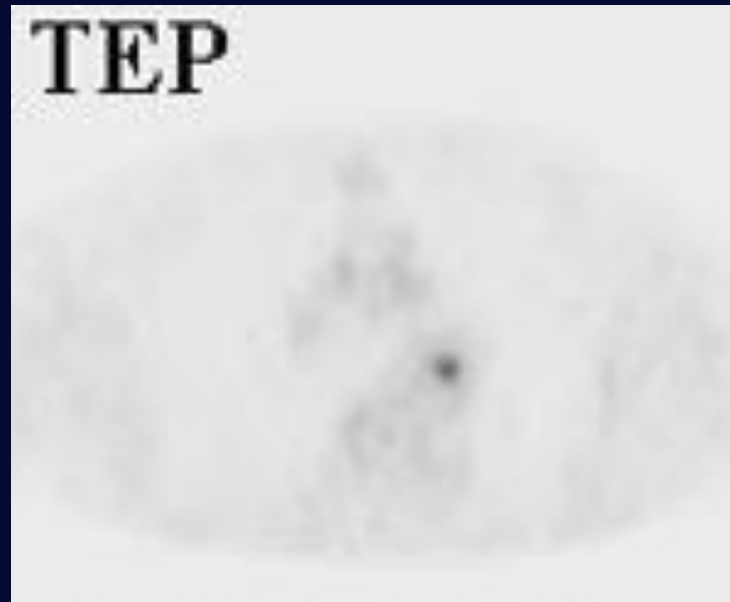
Images Fonctionnelles ?

Le PET-CT



PET

PET/CT



Scanner

TEP

TEP/Scanner



Sommaire



- 1 Introduction
- 2 Fonctionnement du PET scan
- 3 Applications actuelles et futures**
- 4 Forces et limites du PET scan
- 5 Conclusion et perspectives futures



Passé ? Futur ?

1951 : Premières publications sur la détection en coïncidence des photons issus de l'annihilation du positon (Wrenn et al., Sweet).



1953 : Premier dispositif clinique d'imagerie du positon utilisant deux détecteurs placés de part et d'autre de la tête (Brownell & Sweet).

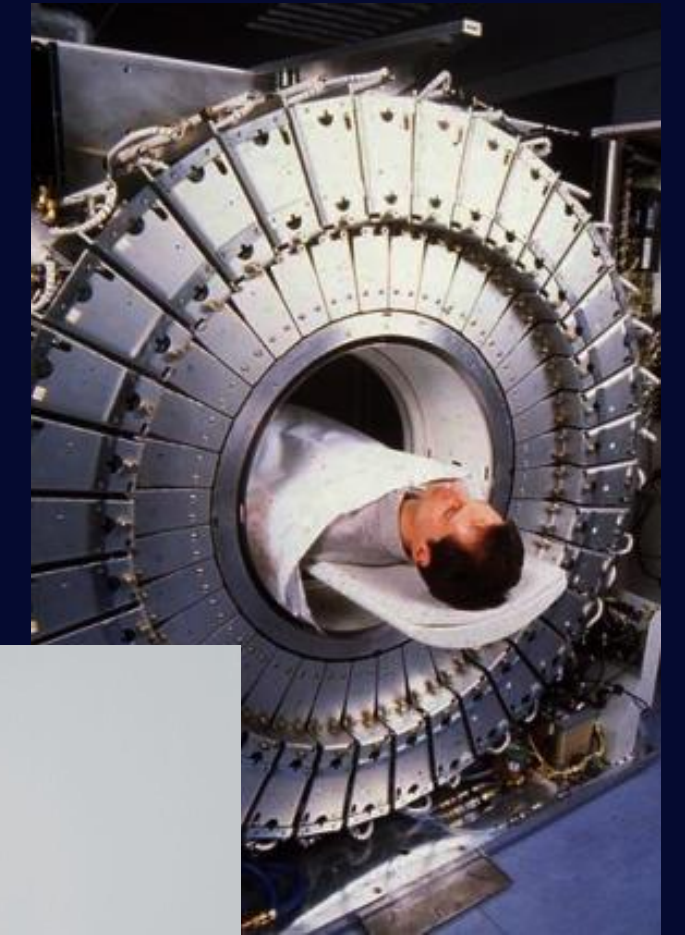
1969 : Première "positron camera" avec deux plans de détecteurs et patient placé entre eux (Brownell, MGH).



1974: Premier scanner PET commercial ECAT I installé à l'UCLA (University of California, Los Angeles) (Phelps, Hoffman, Douglass, Williams).

Premières images cérébrales convaincantes obtenues avec ^{18}F FDG.

1999: ECAT EXACT3D PET scan le plus sensible jamais conçu (Hammersmith Hospital, Londres)





Applications actuelles

Autres traceurs

ONCOLOGIE

- ^{18}F -FDG:
 - Caractérisation des tumeurs primitives
 - Recherche de récurrences
 - Évaluation de la réponse à une thérapie

INFECTIOLOGIE

- ^{18}F -FDG :
 - infections bactériennes et inflammation
 - > forte captation = tissu infecté ou inflammatoire
- 2- ^{18}F -fluorodeoxysorbitol (FDS):
 - > ciblage spécifique des Enterobacteriaceae

CARDIOLOGIE

- ^{18}F -FDG :
 - viabilité myocardique et inflammation vasculaire
 - > forte captation = tissu actif ou inflammatoire
- ^{13}N - NH_3 :
 - Flux sanguin myocardique
 - > forte captation = cœur bien perfusé
- ^{11}C -palmitate :
 - Métabolisme myocardique des acides gras
 - > forte captation = muscle cardiaque actif et viable

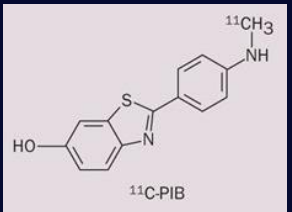
NEUROLOGIE

Application	Tracer
Cerebral blood flow	H_2^{15}O
Oxygen metabolism	$^{15}\text{O}_2$
Glucose metabolism	^{18}F -2-deoxyglucose (^{18}F FDG)
Dopamine storage	^{18}F -6-Fluorodopa (^{18}F -dopa)
Dopamine D_1 receptors	^{11}C -SCH23390
Dopamine D_2 receptors	^{11}C -Raclopride
Central benzodiazepine binding	^{11}C -Flumazenil
Opioid binding	^{11}C -Diprenorphine
Cellular amino acid uptake	^{11}C -Méthionine
Activated microglia	^{11}C (R)-PK11195

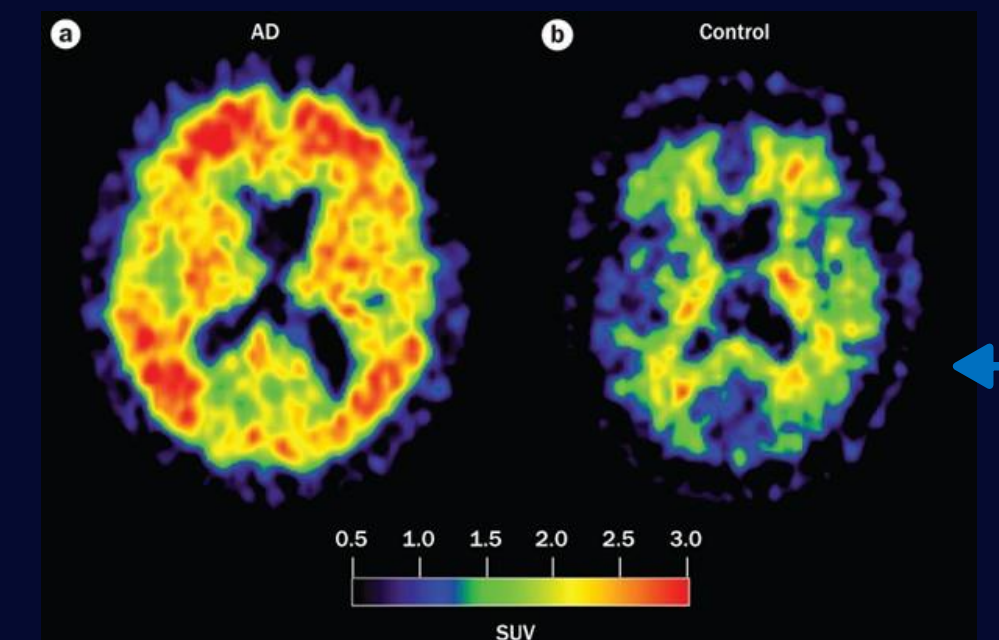
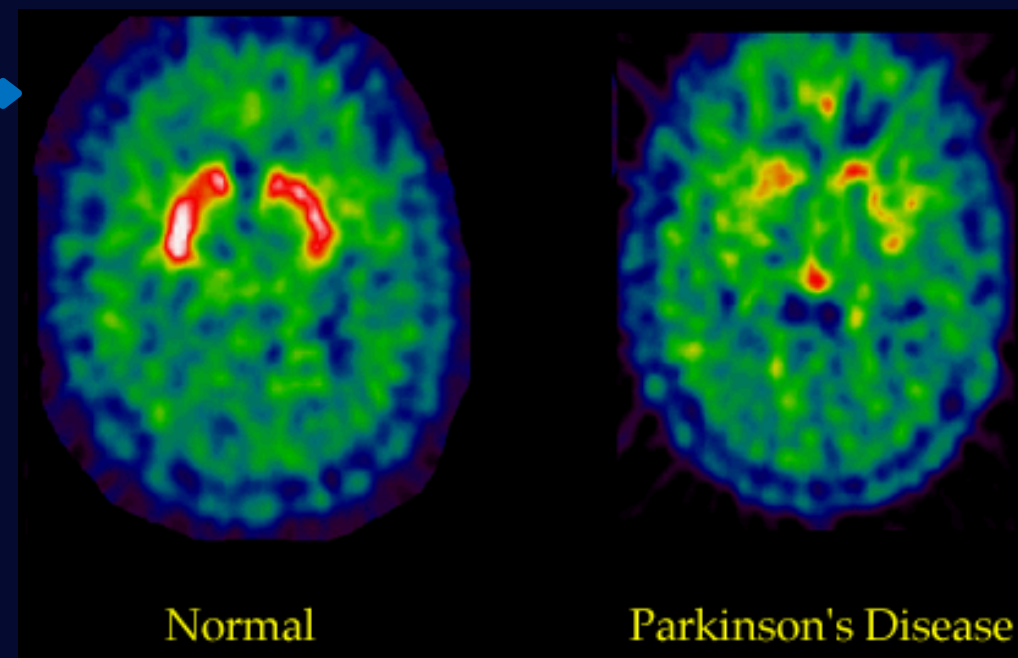
H_2^{15}O suit le flux sanguin et se concentre dans les zones bien perfusées, reflet d'une activité cérébrale plus intense.

$^{15}\text{O}_2$ se concentre dans les zones à forte consommation d'oxygène, reflétant l'activité métabolique des neurones.

➤ Alzheimer:



^{11}C -PIB (Pittsburgh Compound B) traceur spécifique des plaques amyloïdes β , utilisé pour le diagnostic précoce de la maladie d'Alzheimer.



The Role of Amyloid PET in Imaging Neurodegenerative Disorders: A Review



Sommaire



- 1 Introduction
- 2 Fonctionnement du PET scan
- 3 Applications actuelles et futures
- 4 Forces et limites du PET scan**
- 5 Conclusion et perspectives futures



PET Scan : l'imagerie parfaite ?

FORCES

- ✓ Exploration fonctionnelle plutôt qu'anatomique
- ✓ Détection précoce des anomalies
 - invisibles aux autres examens
- ✓ Permet de suivre l'évolution d'une maladie ou la réponse à un traitement

⚠ Contres Indications

- Femmes enceintes
- Femmes allaitantes : suspendre l'allaitement temporairement pour éviter l'exposition de l'enfant au traceur radioactif
- Patients diabétiques (pour le FDG)
 - une glycémie élevée peut réduire la captation du FDG et fausser les images PET
- Allergies au traceur

LIMITES

- ⚠ Résolution spatiale limitée:
 - images difficiles à interpréter sans corrélation anatomique
- ⚠ Coût élevé et disponibilité limitée
- ⚠ Radiation ionisante !!

⚠ Précautions après un PET scan:

- Éviter les contacts rapprochés prolongés (lieux confinés, ...)
 - Attention particulière aux personnes vulnérables (femmes enceintes, enfants)

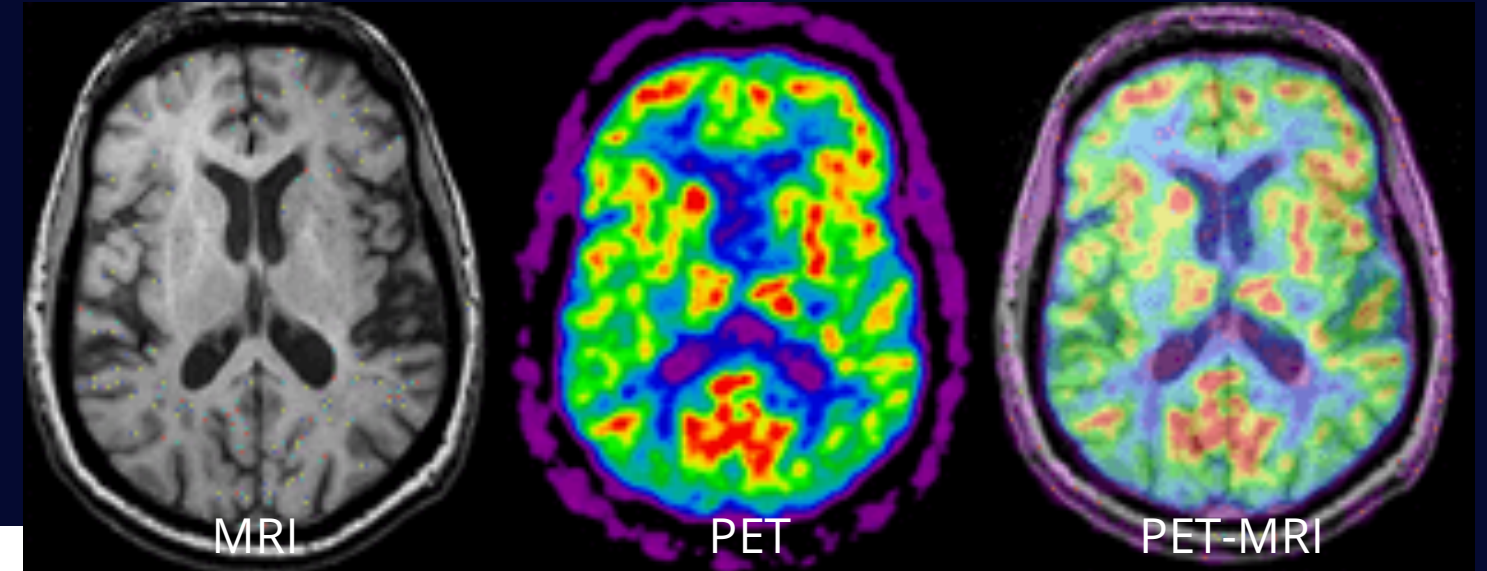
	Prix (Frs)	Prix d'un examen (Frs)
CT scan	entre 500'000 et 1,2 million	300 à 500
IRM	entre 1,5 et 3 millions	800 à 1000
PET scan	3 à 4 millions	jusqu'à 3000



Premiers PET-MRI

Entre 2010 et 2011

Première étude
simultanée PET/IRM
chez un volontaire
sain âgé de 66 ans



Philips Ingenuity TF PET/MR



Siemens Biograph mMR

TABLE 1.

Comparison of PET/CT and PET/MRI

	Strengths	Limitations
PET/CT	<ul style="list-style-type: none"> • Widely available • Established imaging protocols • Evidence proven indications • Familiarity among ordering providers • Quantitative accuracy well established • Imaging of small pulmonary nodules • Exams performed in as little as 30 minutes 	<ul style="list-style-type: none"> • Limited soft tissue contrast • Fast CT exam does not provide extra time for PET acquisition • IV contrast not routinely used • If focused MRI needed, must be additional exam • Ionizing radiation from CT component
PET/MRI	<ul style="list-style-type: none"> • Improved soft tissue contrast • Added value of DWI • Increased available time to collect PET data • Better motion correction • Convenience and time savings with combined exams • Use of MRI specific contrast agents • No ionizing radiation from MRI component 	<ul style="list-style-type: none"> • Limited availability • Protocols and indications still in development • Require technologist knowledgeable in both NM and MRI • Quantitative accuracy still being determined • Exams may take 1 hour or longer • Limited evaluation of pulmonary parenchyma

NM = Nuclear Medicine.



Sommaire



- 1 Introduction
- 2 Fonctionnement du PET scan
- 3 Quelles sont ses principales applications ?
- 4 Forces et limites du PET scan
- 5 Conclusion et perspectives futures**



Recherche sur les traceurs

- **Amélioration des molécules :**
 - plus ciblées, plus stables, plus sûres
- **Optimisation des performances :**
 - meilleure sensibilité et précision des PET scans

➤ Demi-dose de ¹⁸F-FDG avec acquisition prolongée: qualité d'image égale ou supérieure, moins d'exposition pour le patient

Total-body PET/CT using half-dose FDG and compared with conventional PET/CT using full-dose FDG in lung cancer

Hui Tan ^{1,2,3} • Xiuli Sui ^{1,2,3} • Hongyan Yin ^{1,2,3} • Haojun Yu ^{1,2,3} • Yusen Gu ^{1,2,3} • Shuguang Chen ^{1,2,3} • Pengcheng Hu ^{1,2,3} • Wujian Mao ^{1,2,3} • Hongcheng Shi ^{1,2,3}

Received: 4 May 2020 / Accepted: 26 October 2020 / Published online: 27 November 2020
 © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020

The role of new PET tracers for lung cancer

Teresa A. Szyszko ^{a,b}, Connie Yip ^{a,b,c}, Peter Szlosarek ^d, Vicky Goh ^{b,e}, Gary J.R. Cook ^{a,b,*}

^a King's College London and Guy's & St. Thomas' PET Centre, Division of Imaging Sciences and Biomedical Engineering, King's College London, London SE1 7EH, UK
^b Department of Cancer Imaging, Division of Imaging Sciences and Biomedical Engineering, King's College London, London, UK
^c Department of Radiation Oncology, National Cancer Centre Singapore 169610, Singapore
^d Lung and Mesothelioma Unit, Department of Medical Oncology, KGV Basement, St. Bartholomew's Hospital, West Smithfield, London EC1A 7BE, UK
^e Radiology Department, Guys & St. Thomas' NHS Trust, London SE1 7EH, UK

Développement de nouveaux radiopharmaceutiques pour le diagnostic et le traitement du cancer

Bouchra Hajjaj, Theodosia Maina-Nock, Panteleimon J. Marsouvanidis, Luc Brunel, Céline M'Kadmi, Ingrid L. Bakker, Jean-Alain Fehrentz, Berthold Nock, Marion de Jong et Jean Martinez

PET imaging in heart failure: the role of new tracers

Antti Saraste ^{1,2} • Juhani Knuuti ¹

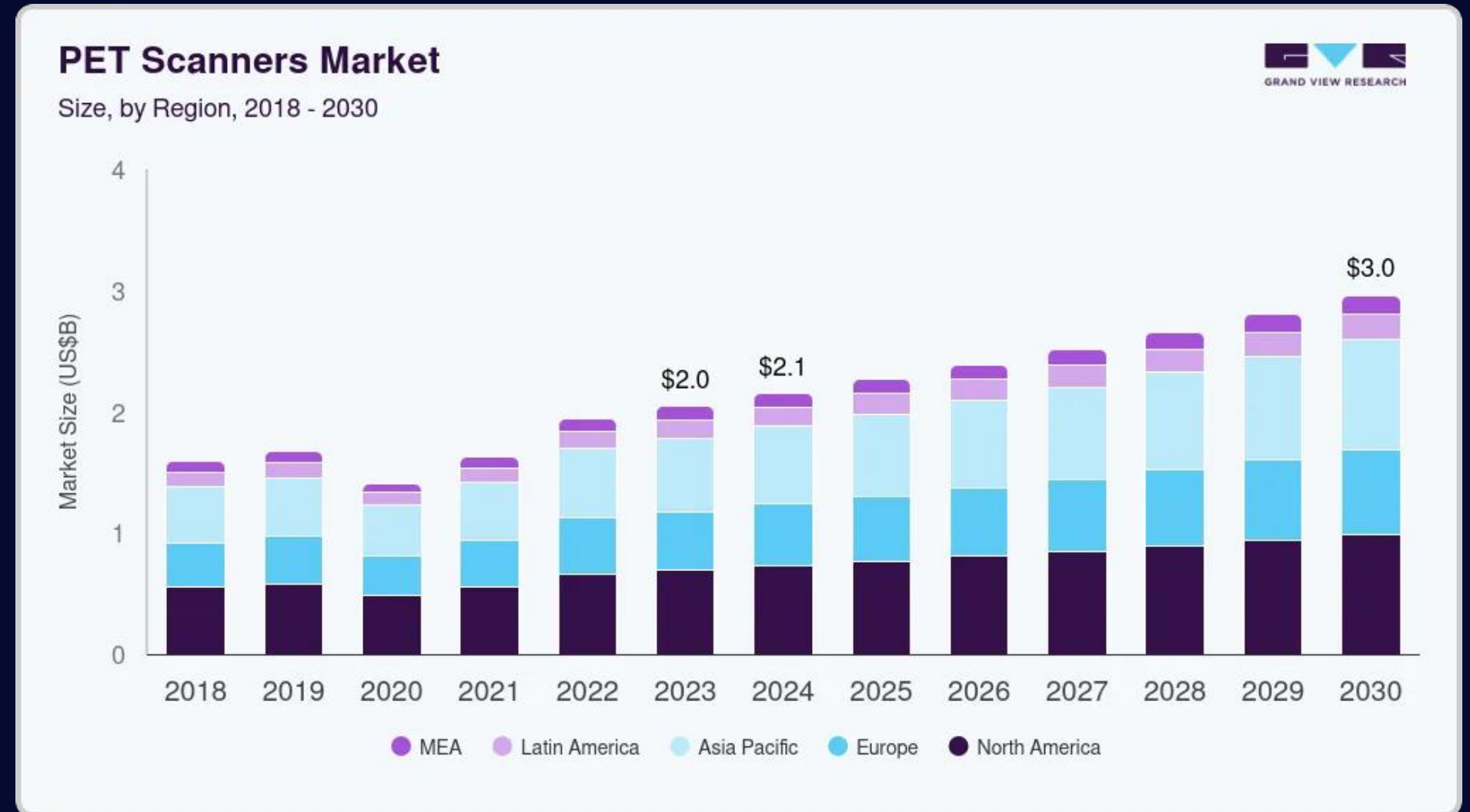
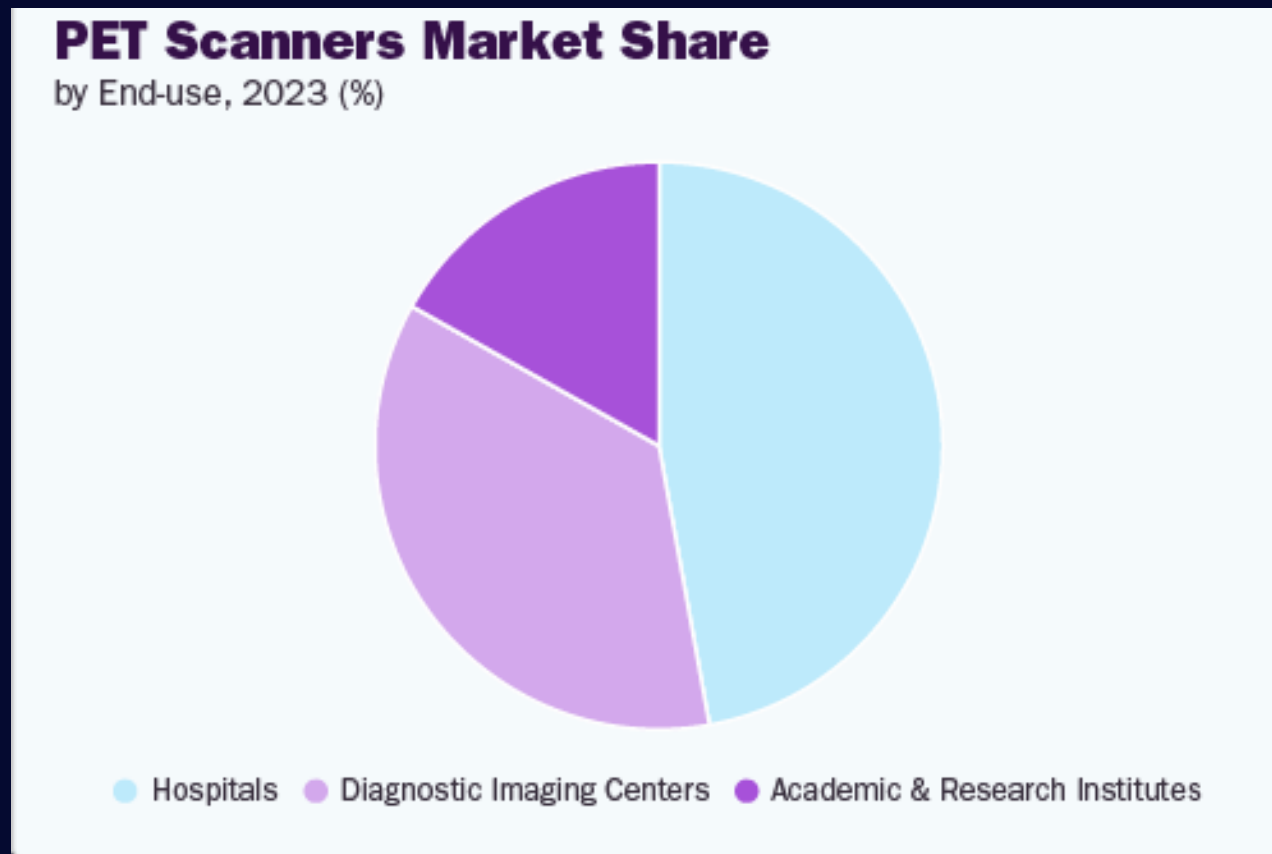
Cardiac PET Perfusion Tracers: Current Status and Future Directions ☆, ☆☆

Jamshid Maddahi MD, FACC, FASNC * † , René R.S. Packard MD *



Pour Conclure

Le PET scan: un secteur en pleine croissance ?





Pour Conclure

Le PET scan: un secteur en pleine croissance ?

❖ DIAGNOSTIC PRÉCOCE :

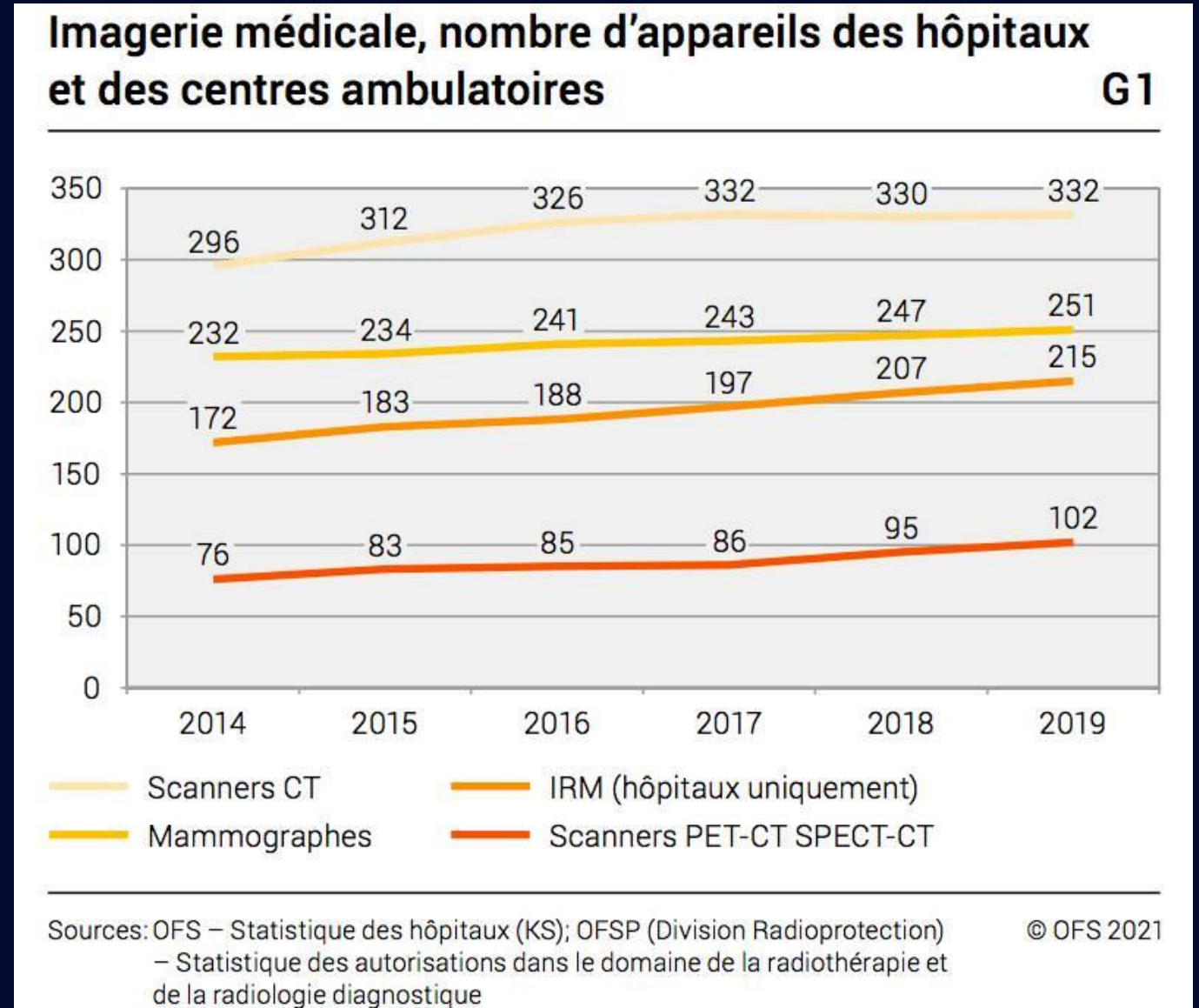
- Le besoin de détection précoce des maladies (surtout des cancers) incite les professionnels de santé à adopter des technologies pour des diagnostics précis et un traitement optimisé.

❖ MÉDECINE PERSONNALISÉE:

- Des soins de plus en plus adaptés à chaque patient.

➔ INNOVATIONS :

- Progrès en matière d'imagerie hybride: PET-CT, PET-MRI
- Développement de nouveaux radiopharmaceutiques
 - Plus spécifiques, plus efficaces, ...
- Et l'intelligence artificielle ?



*En 2019: 44 PET-CT et 58 SPECT-CT

➤ **PET-CT: Augmentation de 42% entre 2014 et 2020**



L'Intelligence Artificielle

La prochaine révolution du PET scan?

We call it Omni because its potential is limitless and we believe it is the future of PET/CT

Omni Legend : performances inégalées pour l'imagerie oncologique

27/01/2023 De Bruno Benque



L'intelligence artificielle dans le PET/CT numérique : Révolutionner le diagnostic du cancer

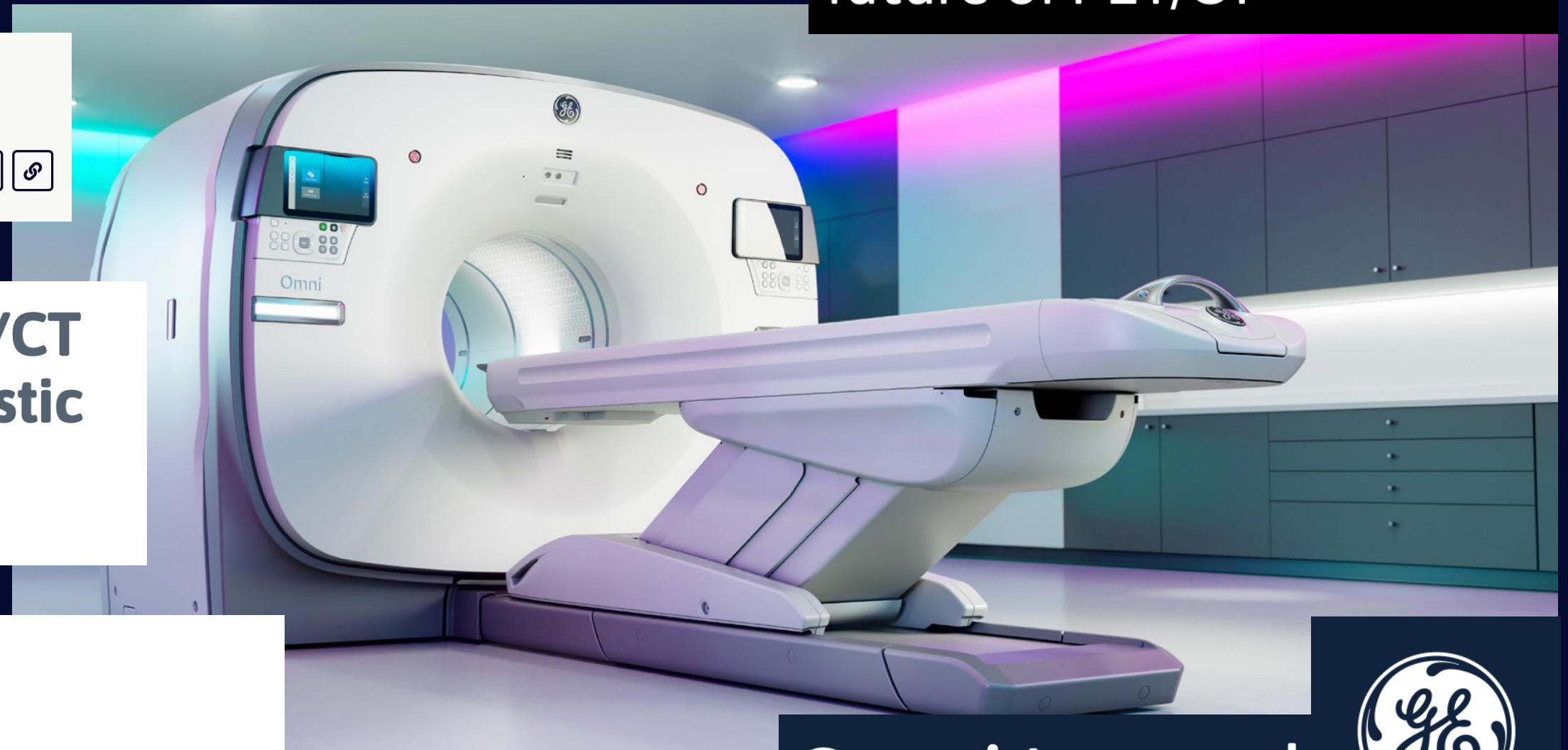
Introduction au PET/CT Omni Legend optimisé par l'IA



Clinique Générale Beaulieu est à Clinique Générale Beaulieu.
24 février · Genève, canton de Genève · 🌐

Le PET-CT OMNI Legend ! 🌟

J-7 ¹⁴ Dans quelques jours seulement, notre nouvel Institut de médecine nucléaire ouvre officiellement ses portes, équipé des dernières technologies de GE HealthCare, dont la machine PET-CT OMNI Legend !



Omni Legend





Références

Kapoor M, Heston TF, Kasi A. PET Scanning. [Updated 2025 Feb 26]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559089/>

Shaikh, Sikandar. 2022. 'PET-CT Imaging and Applications'. Computed-Tomography (CT) Scan. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.103975.

Scintillation counter – scintillation detector. (2022). Nuclear-Power.com. <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/scintillation-counter-scintillation-detector/>

L'Annunziata, M. F. (2003). Solid scintillation analysis. In M. F. L'Annunziata (Ed.), Handbook of Radioactivity Analysis (2^e éd., pp. 845–987). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012436603-9/50016-8>

Tong S, Alessio AM, Kinahan PE. Image reconstruction for PET/CT scanners: past achievements and future challenges. *Imaging Med.* 2010 Oct 1;2(5):529-545. doi: 10.2217/iim.10.49. PMID: 21339831; PMCID: PMC3039307.

Themes, U. (2017). Pet image reconstruction: Methodology and quantitative accuracy. Retrieved from <https://radiologykey.com/pet-image-reconstruction-methodology-and-quantitative-accuracy/>

Grasland-Mongrain, P. (2014). Le Principe de la Tomographie. Retrieved from <http://polgm.free.fr/petitescuriesdunet/index.php?post%2F2014%2F04%2FLe-principe-de-tomographie>

Tai, Yen & Piccini, Paola. (2004). Applications of positron emission tomography (PET) in neurology. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry.* 75. 669-76. 10.1136/jnnp.2003.028175.

<https://www.letemps.ch/sciences/lhopital-geneve-inaugure-cyclotron?srsId=AfmBOopEPYMoxodjoVwj9L7bDt35XV2GUTikeYxLg0DZvar-PxMQbTTT>

Ehman EC, Johnson GB, Villanueva-Meyer JE, Cha S, Leynes AP, Larson PEZ, Hope TA. PET/MRI: Where might it replace PET/CT? *J Magn Reson Imaging.* 2017 Nov;46(5):1247-1262. doi: 10.1002/jmri.25711. Epub 2017 Mar 30. PMID: 28370695; PMCID: PMC5623147.

Slomka PJ, Pan T, Germano G. Recent advances and future progress in PET instrumentation. In *Seminars in nuclear medicine* 2016 Jan 1 (Vol. 46, No. 1, pp. 5-19). WB Saunders.

Dudoignon, D., Pattison, D.A., Legallois, D. *et al.* The utility of pharmacological and radiological interventions to optimize diagnostic information from PET/CT. *Cancer Imaging* **20**, 68 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40644-020-00344-9>

Journal of Nuclear Medicine December 2012, 53 (12) 1916-1925; DOI: <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.105346>

Laradioactive.com. *Tomographie TEP – Examens TEP : Un dépistage précoce des cancers.* <https://laradioactive.com/articles/medecin/tomographieaemissiondepositions>

Laradioactive.com. *TEP : le principe – Détection simultanée de deux photons gamma d'annihilation.* https://laradioactive.com/articles/medecin/tep_principe

Laradioactive.com. *Principe Gamma Camera – Détecter les gamma et reconstruire leur ligne de vol.* https://laradioactive.com/articles/medecin/principe_gamma_camera

Atrain education. <https://www.atrainceu.com/content/5-diagnosis-parkinson%E2%80%99s-disease>

<https://www.gsdinternational.com/fr/examens/tep-ct-du-flux-myocardique-avec-de-l-ammoniac-13n-nh3>

Siemens Healthineers Beta-amyloid. PET imaging for alzheimer's disease. <https://www.siemens-healthineers.com/molecular-imaging/trends-innovations/pet-imaging-for-alzheimers>

Uzuegbunam, B. C., Librizzi, D., & Hooshyar Yousefi, B. (2020). PET Radiopharmaceuticals for Alzheimer's Disease and Parkinson's Disease Diagnosis, the Current and Future Landscape. *Molecules*, 25(4), 977. <https://doi.org/10.3390/molecules25040977>

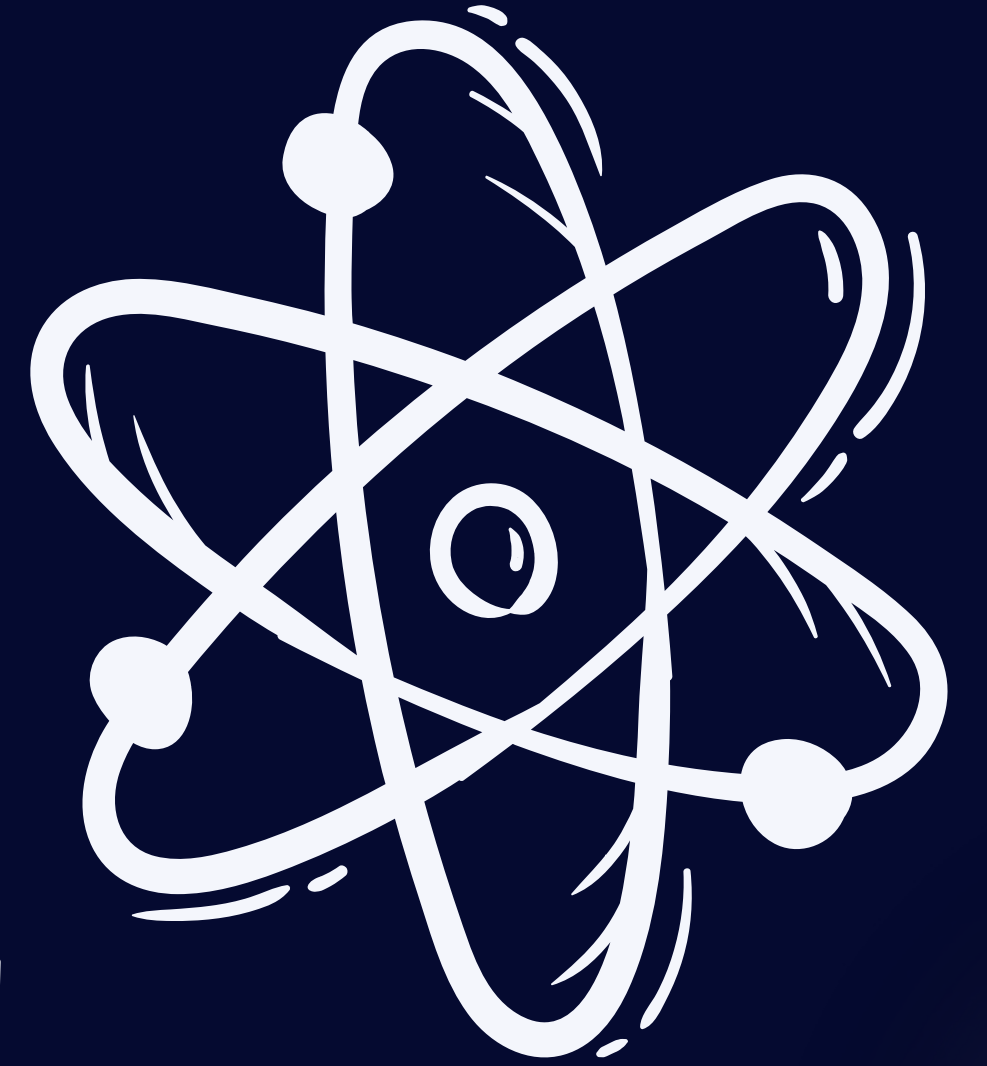
Nordberg, A., Rinne, J., Kadir, A. *et al.* The use of PET in Alzheimer disease. *Nat Rev Neurol* **6**, 78–87 (2010). <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2009.217>

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/pet-scanners-market-report>

<https://www.rts.ch/info/regions/geneve/11042228-equipement-medical-lourd-de-plus-en-plus-reglemente-en-suisse-romande.html>

Positron emission tomography scan market size, share [2032]. <https://www.fortunebusinessinsights.com/positron-emission-tomography-scan-market-111805>

Chapleau M, Iaccarino L, Soleimani-Meigooni D, Rabinovici GD. The Role of Amyloid PET in Imaging Neurodegenerative Disorders: A Review. *J Nucl Med.* 2022 Jun;63(Suppl 1):13S-19S. doi: 10.2967/jnumed.121.263195. PMID: 35649652; PMCID: PMC9165727.



Merci pour votre écoute!

Questions?