



Université de Montpellier
FACULTÉ DE MÉDECINE
Montpellier-Nîmes



SIRIC
MONTPELLIER CANCER



Institut de Recherche en Cancérologie de Montpellier
ICM
MONTPELLIER CANCER



TEP-TDM : notions générales

“ONKOLUNCH” ICM

Pr Emmanuel DESHAYES
PU-PH
Emmanuel.deshayes@icm.unicancer.fr
Service de Médecine Nucléaire ICM Val d'Aurelle
INSERM U1194 : “Radiobiology for targeted and personalized radiotherapy”

Jeudi 11 septembre 2025

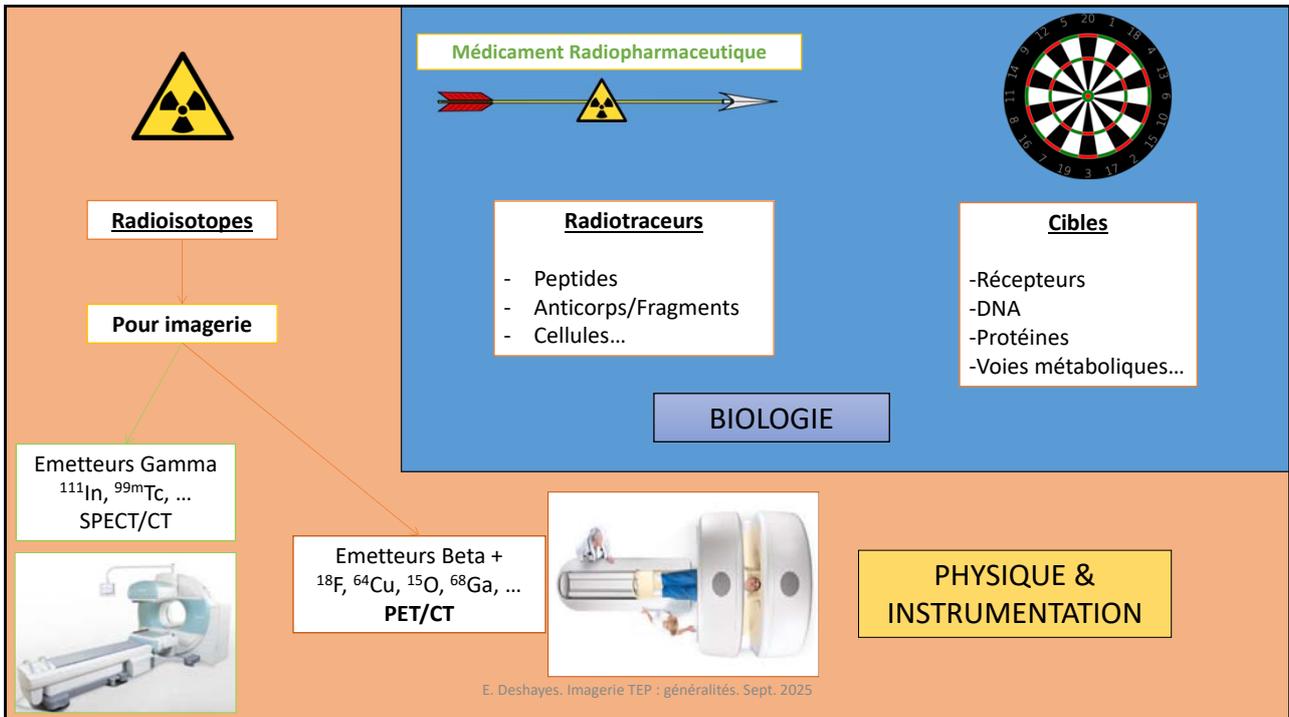


Inserm
Institut national de la santé et de la recherche médicale



ICM
Institut régional du Car Montpellier

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

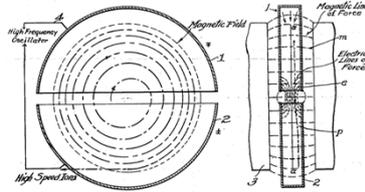




Radio-isotopes émetteurs de positrons

Positrons Emitters	$T_{1/2}$ (min)
^{18}F	110
^{15}O	2
^{11}C	20
^{13}N	10
^{124}I	6048
^{64}Cu	768
^{89}Zr	4680
^{68}Ga	67,8

Produits de Cyclotron



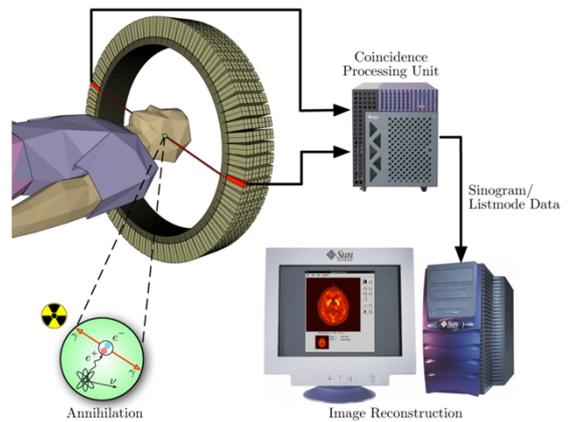
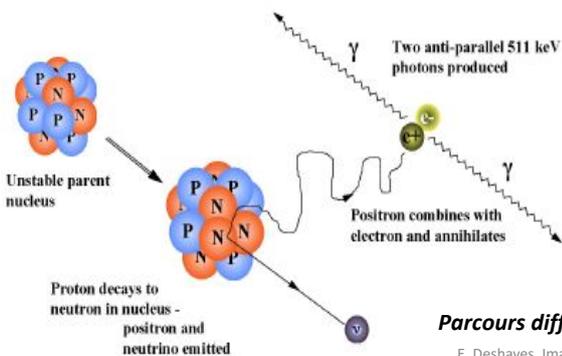
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Ou via un générateur



Principes de l'imagerie TEP

Désintégration beta +



2 photons de 511 keV émis simultanément à 180°(coïncidence)

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Acquisition multimodale

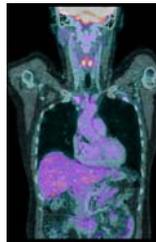
- TEP-TDM : Tomographie par émission de positron
- PET-CT
- PET-Scan
- Morpho-TEP



Niveau de gris



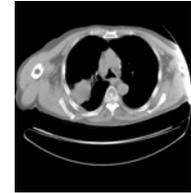
Scanner



Fusion



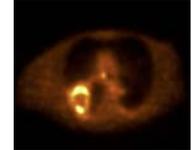
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025



TDM



TEP-TDM



TEP

Quantification

SUV ?



SUV: Sport Utility Vehicle

Concentration activité dans un volume de tissu
Concentration moyenne activité dans le patient

Le SUV traduit l'intensité de la fixation, et l'écart par rapport à une captation homogène dans le volume d'intérêt

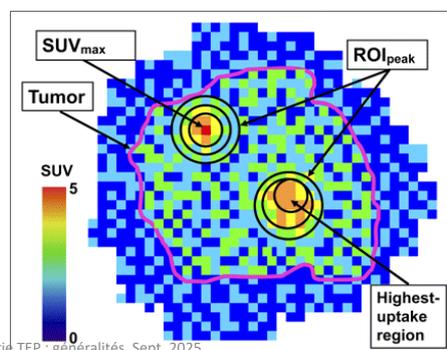
D'autres indexes :

- MTV (Metabolic Tumor Volume)
- TLG (Total Lesion Glycolysis),

- ...

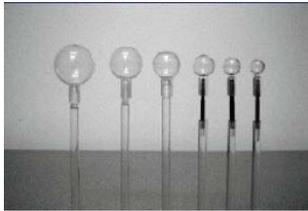
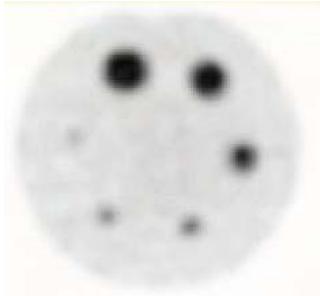
Standardized Uptake Value

$$\text{SUV} = \frac{\text{fixation dans le tissu d'intérêt (kBq/mL)}}{[\text{dose injectée (kBq) / poids (g)}]}$$

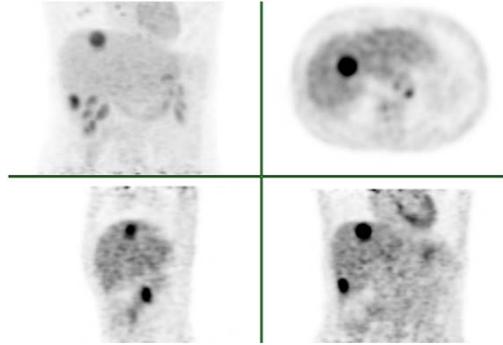


E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

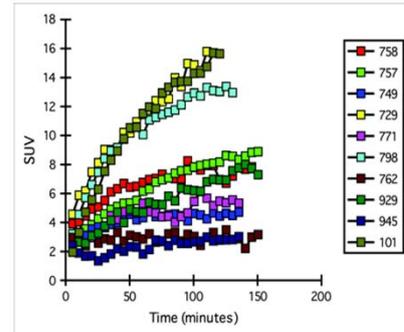
Nombreuses limites à la quantification



Effet de Volume Partiel



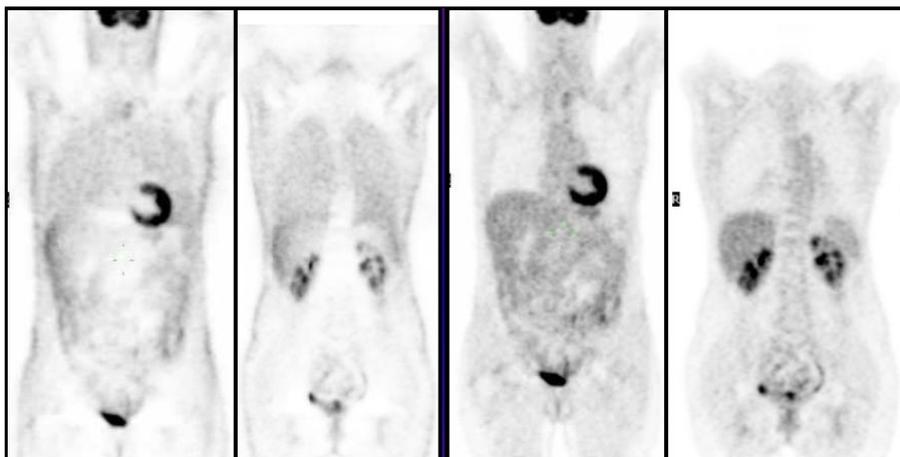
Synchronisation Respiratoire



Décalage Injection Acquisition

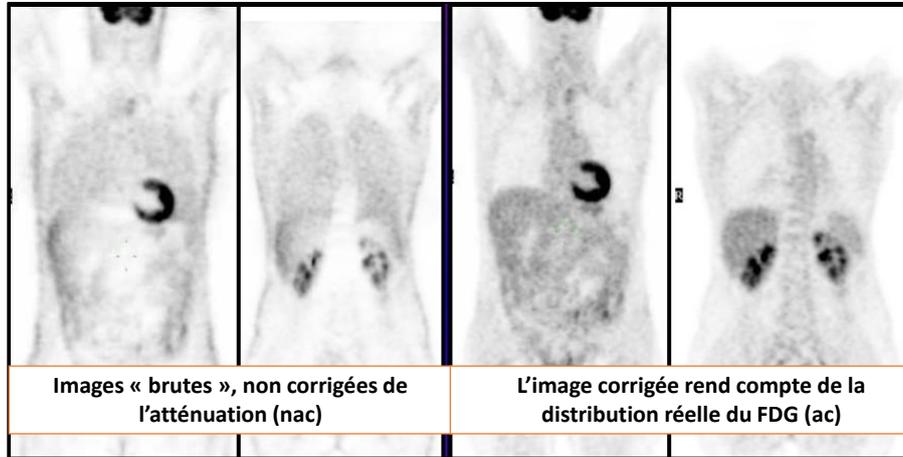
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Correction de l'atténuation



E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Correction de l'atténuation



Images « brutes », non corrigées de l'atténuation (nac)

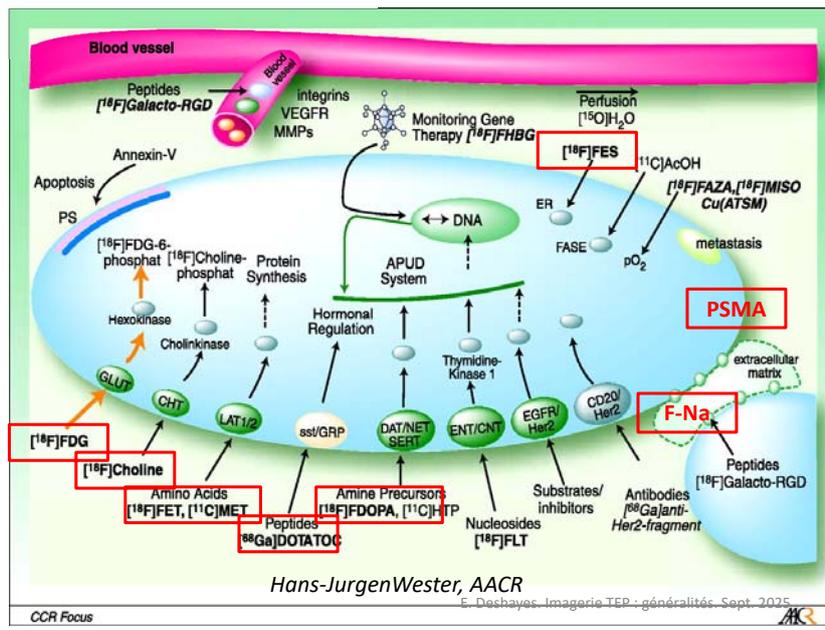
L'image corrigée rend compte de la distribution réelle du FDG (ac)

Une correction de l'atténuation est calculée grâce à la TDM

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025



Radio-traceurs TEP



- Métabolisme
 - Glucose
 - Membrane cellulaire
 - Protéique
 - Osseux
- Cible tumorale spécifique
- Prolifération
- Angiogenèse
- Apoptose
- Vasularisation
- Hypoxie
- ...

AMM

CCR Focus

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Traceurs disposant d'une AMM en Oncologie

-[¹⁸F]-FluoroDésoxyGlucose

-[¹⁸F]-Fluorométhylcholine

-[¹⁸F]-Fluoro-L-DOPA

-[¹⁸F]-Fluorure de sodium

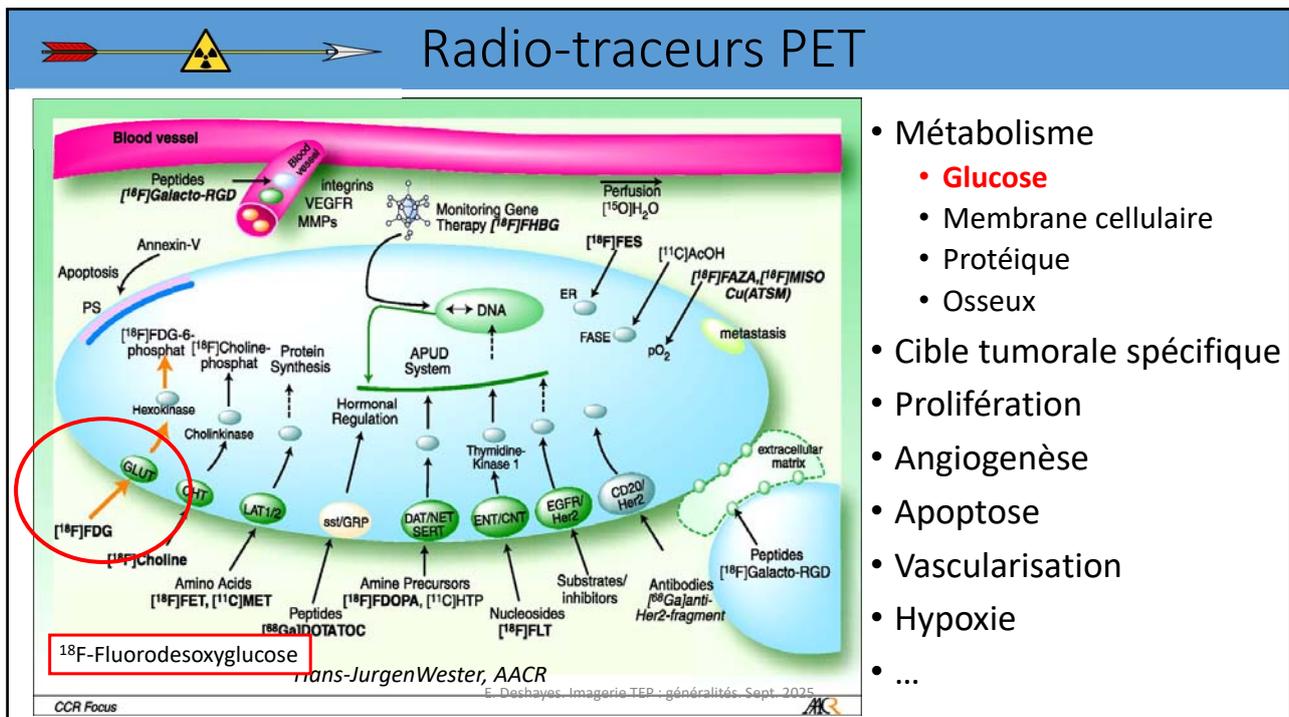
-[¹⁸F]-Fluoro-Ethyl-Estradiol

-[⁶⁸Ga]-DOTATOC

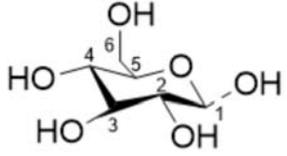
-[⁶⁸Ga]-PSMA-11

-[¹⁸F]-DCFPyL

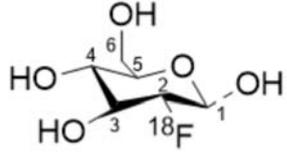
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025



 ^{18}F -FDG : ^{18}F -Fluorodesoxyglucose



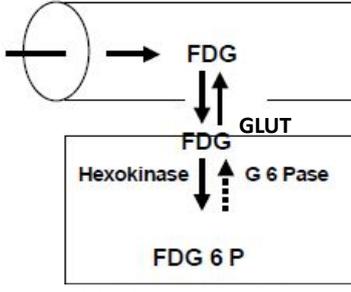
Glucose



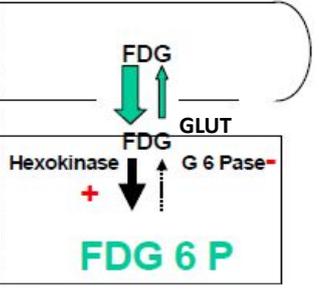
[^{18}F]FDG

Glucose \neq FDG

- Majoration métabolisme glucidique (glycolyse) dans la cellule cancéreuse
- Majoration transport membranaire glucose (GLUT 1)
- « *Impasse métabolique* »



Cellule Saine



Cellule Cancéreuse

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

 ^{18}F -FDG : ^{18}F -Fluorodesoxyglucose

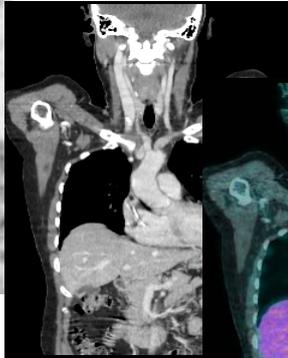
Biodistribution physiologique



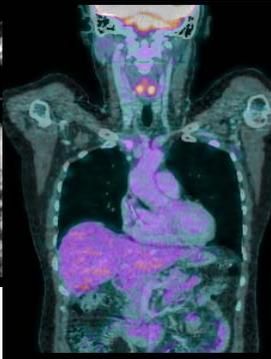




PET



CT



Fusion

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

^{18}F -FDG : ^{18}F -Fluorodesoxyglucose : réalisation pratique

- **Contre-indications** : grossesse (relative), allaitement, diabète déséquilibré
- **Préparation du patient**:
 - Patient à **jeun** depuis 6 heures
 - Contrôle de la glycémie réalisé juste avant l'injection
 - **Repos strict** au moins 45 minutes après l'injection :
 - limite la fixation musculaire physiologique
 - patient au repos dans une pièce calme
- **L'injection**: 1 à 5 MBq/Kg IV
- **L'examen**:
 - Réalisé à 1 heure après l'injection (délai +++)
 - **Miction** avant examen
 - Durée: environ 30 minutes
 - Acquisition tomographique:
 - Partie basse de l'encéphale à mi-cuisse
 - Reconstruction des images:
 - Fusion des images avec le scanner X

Eur J Nucl Med Mol Imaging (2015) 42:328–354
DOI 10.1007/s00259-014-2961-x

GUIDELINES

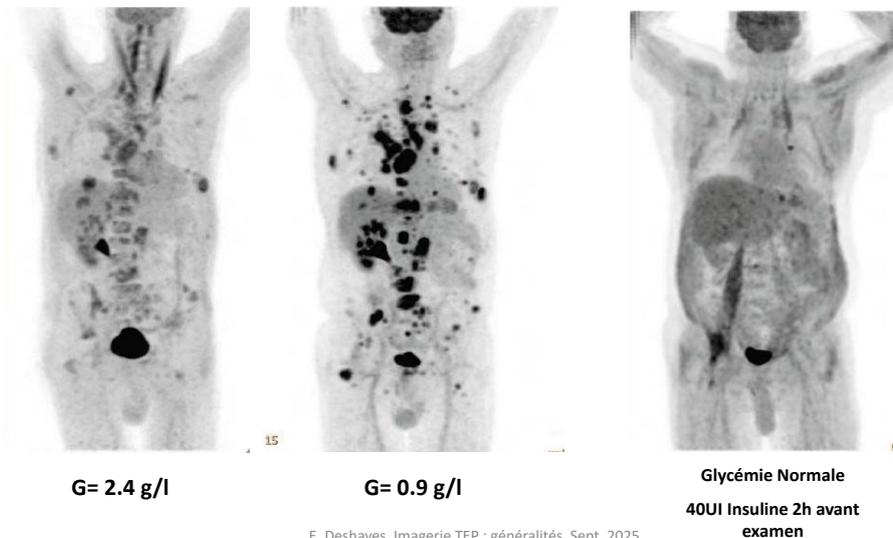
FDG PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour imaging: version 2.0



Boellaard, 2015, *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Respect de la glycémie et du jeûne.



E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

^{18}F -FDG : ^{18}F -Fluorodesoxyglucose : limites

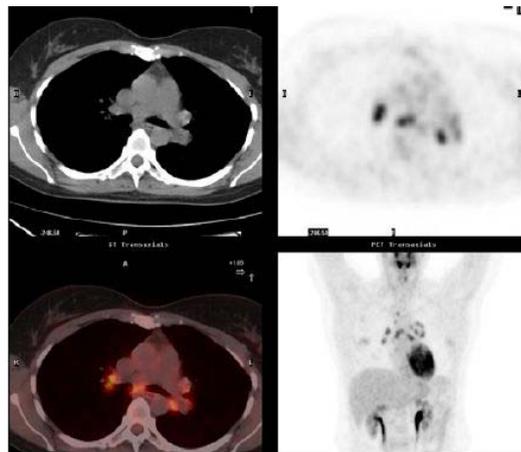
- Causes de faux négatifs:
 - Taille de la lésion (4mm ?)
 - Sidération cellulaire post-chimiothérapie (respect délai +++)
 - Tumeurs peu/pas avides pour le FDG:
 - Carcinomes **bronchiolo-alvéolaire**, lymphomes **indolents**, carcinome hépatocelulaire (Se 50%), sein: **lobulaires**, ovaires: adénocarcinome **mucineux**, reins: cellules claires (Se: 50%), **prostate** (ADK), digestifs: tumeurs endocrines (**bien différenciés**), etc...
- Limiter les faux positifs:
 - Myorelaxant (muscles, graisse brune)
 - Contexte clinique (infection, inflammation, délai dernière séance de RT, dernière chirurgie)

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

^{18}F -FDG : ^{18}F -Fluorodesoxyglucose : limites

- Sarcoïdose:
adénopathies hilaires
hyperfixantes bilatérales
> granulomatose

- RAPPEL: L'imagerie TEP ^{18}F -FDG n'est pas une « imagerie du cancer » mais du métabolisme glucidique



E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

^{18}F -FDG : évaluation réponse au traitement (Tumeurs solides)

- **PET de référence indispensable, et dans les mêmes conditions de réalisation (même appareil)**
- Evaluation quantitative:
 - Critères EORTC 1999: variation (%) de SUVmax
 - Critères PERCIST 2009: variation (%) de SULpeak
- Avantages PERCIST: reproductibilité
- NB: globalement peu d'évaluation de la réponse au traitement des tumeurs solides en TEP au ^{18}F -FDG, hors essai

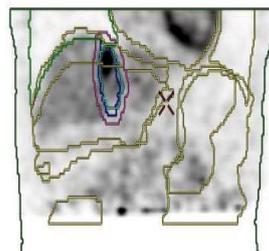
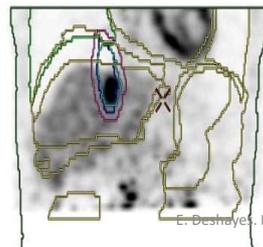
Young, 1999, Eur Jour of Cancer

Wahl, 2009, J. Nucl. Med

	EORTC 1999	PERCIST 2009
Réponse métabolique complète	Pas de fixation	Pas de fixation
Réponse métabolique partielle	Baisse de 25% SUVmax	Baisse de 30% du SUVpeak
Maladie stable	-25% +25% SUVmax	Le reste
Maladie progressive	Augmentation de 25% du SUVmax ou nouvelle(s) lésion(s)	Augmentation de 30% du SULpeak ou nouvelle(s) lésion(s)

E. Deshayes, Imagerie TEP : généralités, Sept. 2025

Interactions MN / RT

 ^{18}F -FDG

E. Deshayes, Imagerie TEP : généralités, Sept. 2025

Positionnement du patient

Les différents systèmes de positionnement utilisés en radiothérapie externe doivent être retrouvés au niveau du PET afin de placer le patient dans la même position

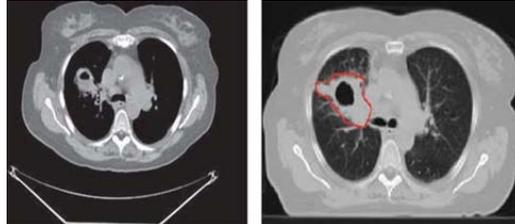
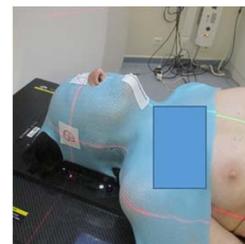


Table plate
(« plateau de radiothérapie »)

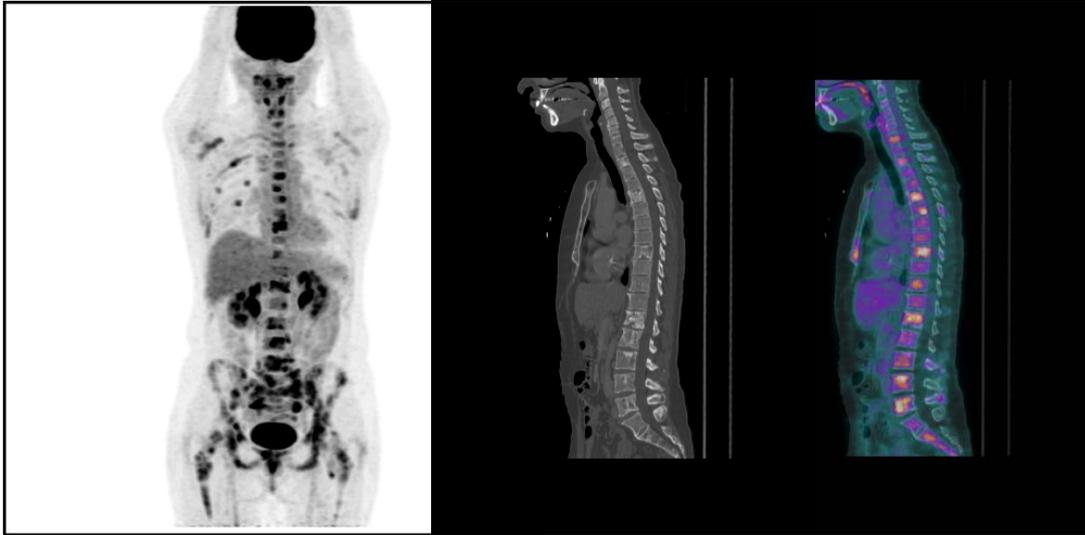
Positionnement du patient

Les différents systèmes de positionnement utilisés en radiothérapie externe doivent être retrouvés au niveau du PET afin de placer le patient dans la même position

- Immobilisation du patient (cales, masque rigide, etc...)
- Lasers centrés sur l'isocentre (tatouage)
- Déplacement du personnel et/ou envoi de photos du patient en position de traitement

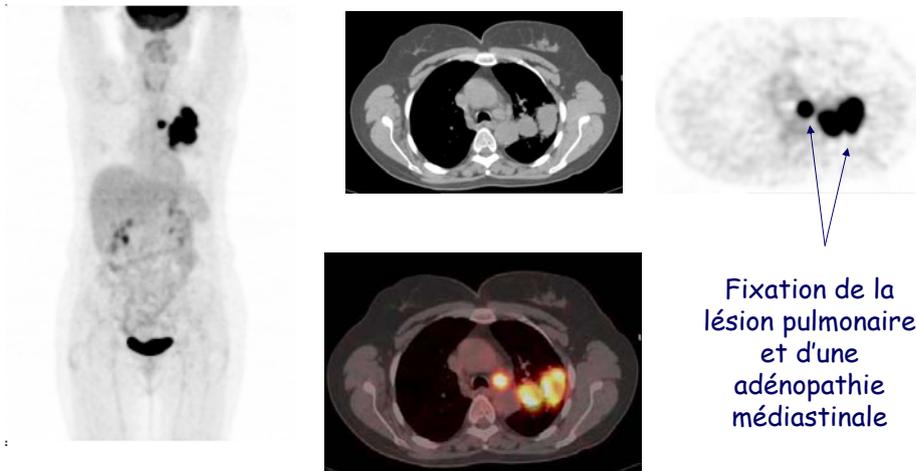


Quelques exemples :
Atteinte métastatique osseuse diffuse d'un tumeur du sein



CAS CLINIQUE

- Bilan initial : Mme MAR..., 53 ans présente une masse pulmonaire lobaire supérieure gauche.

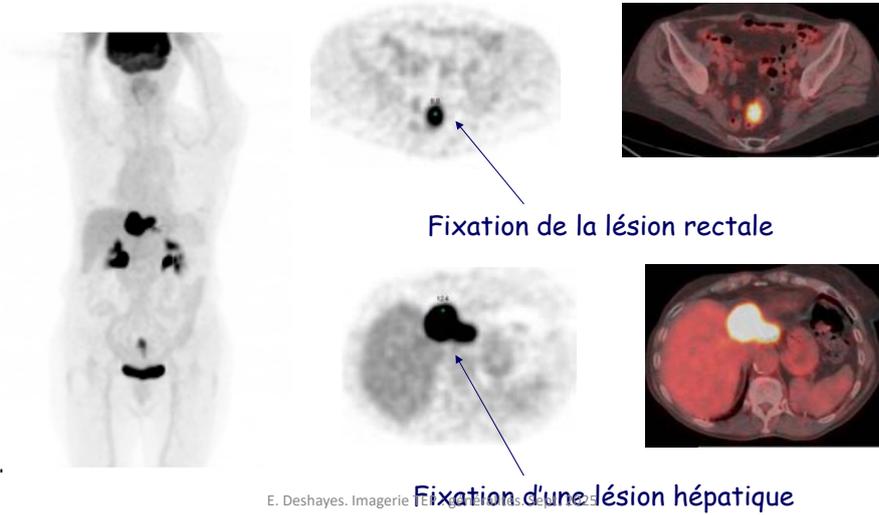


Fixation de la
lésion pulmonaire
et d'une
adénopathie
médiastinale

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

CAS CLINIQUE

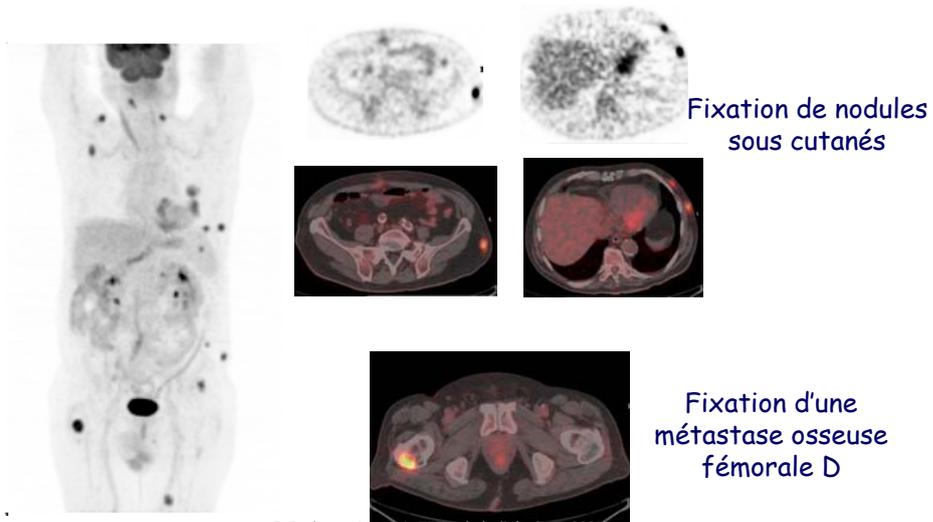
- Bilan d'extension: Mme DAH..., 77 ans, présente une lésion rectale.



E. Deshayes. Imagerie TEP - généralités. Sept. 2025

CAS CLINIQUE

- Bilan extension: M. RAN..., 70 ans, présente un mélanome.



E. Deshayes. Imagerie TEP - généralités. Sept. 2025

^{18}F -CHOLINE (^{11}C -CHOLINE)

Indications "historiques" :

- Cancer prostate (rising PSA)
- CHC

Indications « résiduelle » :

- Recherche d'adénome parathyroïdien

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Radio-traceurs TEP

Hans-Jürgen Wester, AACR
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

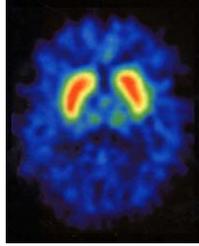
- Métabolisme
 - Glucose
 - Membrane cellulaire
 - Protéique
 - Osseux
- Cible tumorale spécifique
- Prolifération
- Angiogenèse
- Apoptose
- Vasularisation
- Hypoxie
- ...

AMM

 ^{18}F -L-DOPA : métabolisme protéique

Oc1ccc(O)cc1CC[C@@H](C(=O)[O-])[NH3+]
Dihydroxyphenylalanine (L-DOPA)
 aromatic amino acid decarboxylase
 \downarrow CO_2
Oc1ccc(O)cc1CCCN
Dopamine





Physiological distribution:
 striatum, kidneys, pancreas, liver, gallbladder, biliary tract, esophagus, myocardium and duodenum.
 Adrenal glands may be faintly visible

✓ **Cible : traceur spécifique ciblant la biosynthèse des acides aminés**
L-DOPA : acide aminé aromatique analogue de la DOPA rapidement accumulé par les tissus cibles (striatum cérébral), transformé en dopamine
En cas de tumeur: augmentation de la synthèse protéique donc plus de transport intracellulaire et de la décarboxylation de la L-DOPA

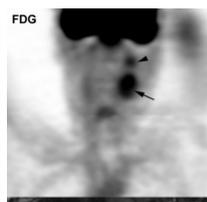
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025
 D.Taieb Endocrine Reviews 2014; P.Santhanam, Clinical Endoc. 2014

 ^{18}F -L-DOPA : métabolisme protéique

• **Indications :**

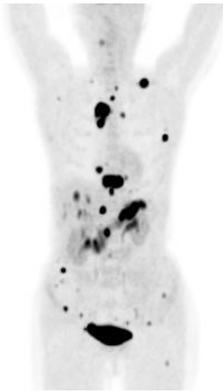
- Cancer médullaire thyroïde (en fonction du dosage de Thyrocalcitonine)
- Phéochromocytome & paragangliome : bilan de caractérisation et d'extension
- Tumeurs neuroendocrines intestinales (bilan de caractérisation et d'extension)
- Tumeurs cérébrales (I_r ou II_r) : différenciation évolution vs radionécrose, caractérisation
- Maladie de Parkinson (dimin. Prod. Dopamine)

FDG

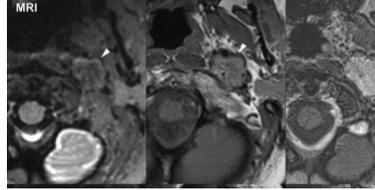


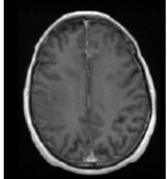
FDOPA

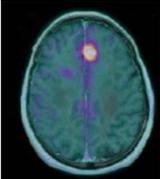


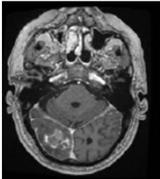


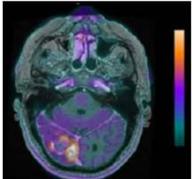
MRI











NB : chaque indication a un protocole d'acquisition et un délai injection/acquisition différent

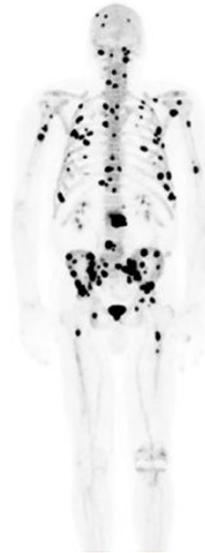
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025
 Verger et al. Cancers, 2022

^{18}F -Na : métabolisme osseux

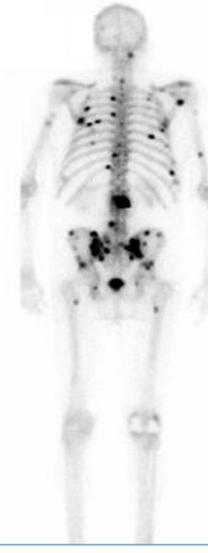


Indications : La TEP-FNa est indiquée dans la recherche de métastases osseuses dans le cadre de la stadification initiale ou au cours de la surveillance à la recherche d'une récurrence osseuse des cancers ostéophiles et notamment du cancer de la prostate, du sein ou du poumon.

En pratique : **très peu utilisé** (cf autres traceurs)



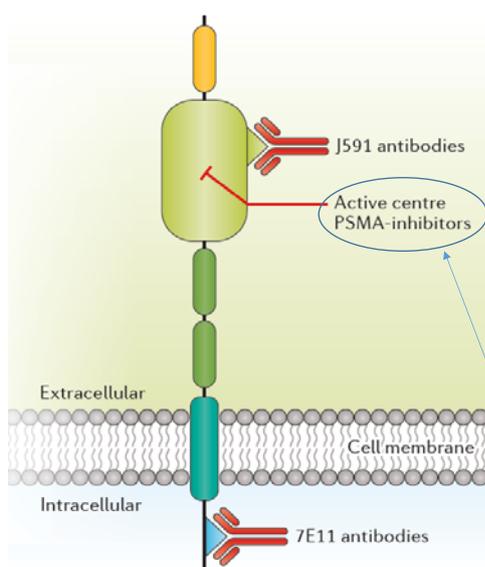
^{18}F -Na PET



Scintigraphie osseuse
($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HDP)

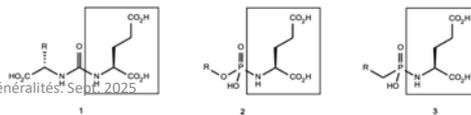
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

$^{18}\text{F}/^{68}\text{Ga}$ -PSMA Ligands



- Glycoprotéine transmembranaire type II
- Activité enzymatique: glutamate carboxypeptidase 2
- Surexpression dans le cancer de prostate
 - 100-1000 fois > dans tumeurs que les tissus non spécifiques (reins, intestins glandes salivaires) et prostate non tumorale
- Expression accrue si :
 - Hormonorésistance
 - Gleason élevé
 - PSA augmenté
 - Maladie métastatique
- Petits ligands avec forte affinité, internalisation et élimination plasmatique rapide.

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025



Maurer, Eiber, Schwaiger, Gschwend, 2016, Nature Reviews Urology



$^{18}\text{F}/^{68}\text{Ga}$ -PSMA Ligands

- Deux traceurs disponibles (AMM)

- ^{18}F -DCFPyL
- ^{68}Ga -PSMA-11

- Indications

- Rising PSA
- Bilan d'extension initial cancer de prostate à risque intermédiaire ou haut
- Sélection pour la Radiothérapie Interne Vectorisée



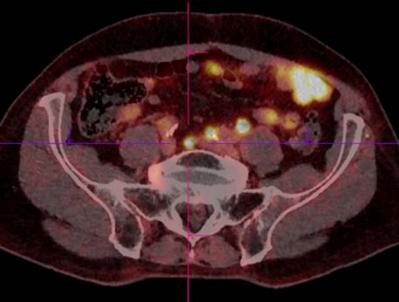
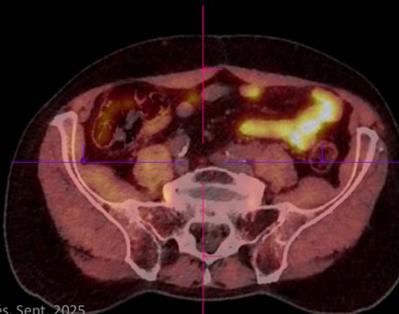
Biodistribution physiologique ^{68}Ga -PSMA-11

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

<p>^{68}Ga-PSMA 11 03/10/2023</p>		
<p>Mr H, 76 ans PSA 1,9 ng/mL Chirurgie en 2021 Radiothérapie 2022 Cas clinique fictif</p>		
<p>^{18}F-Choline 31/08/2023</p>	<p>E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025</p>	

Données ICM

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

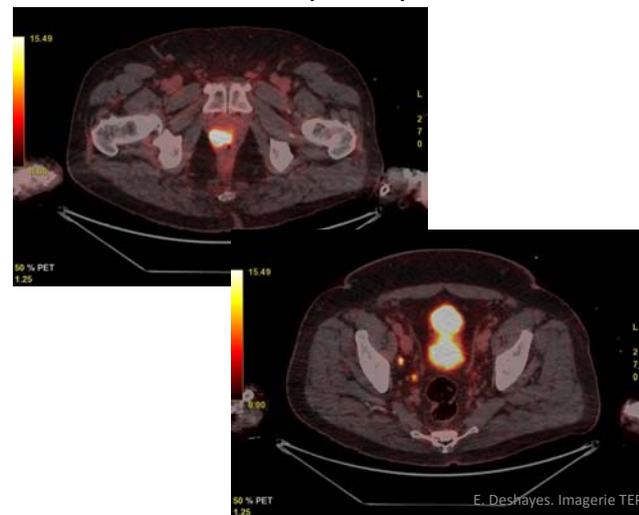
<p>^{18}F-DCFPyL 31/01/2024</p>		
<p>Mr H, 76 ans PSA 6,9 ng/mL Chirurgie en 2005 Radiothérapie 2021</p> <p>Cas clinique fictif</p>		

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025



$^{18}\text{F}/^{68}\text{Ga}$ -PSMA Ligands

- Bilan d'extension : aide à la décision thérapeutique
- Eligibilité RIV (théranostique)

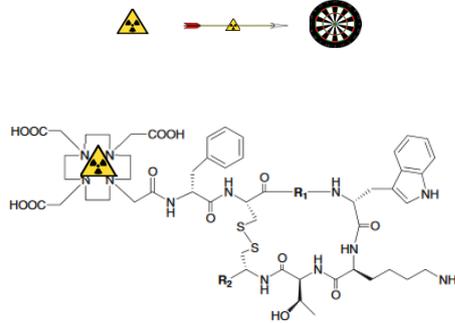


E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025



Imagerie des Récepteurs à la Somatostatine (SSTRi)

⁶⁸Ga-DOTA-Peptides



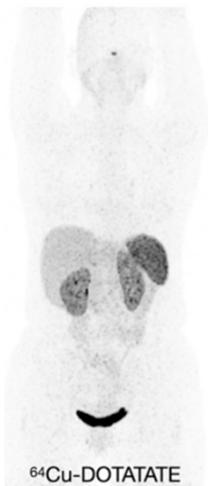
Compound	R ₁	R ₂
DOTA-OC	Phe	Thr(ol)
DOTA-TOC	Tyr	Thr(ol)
DOTA-TATE	Tyr	Thr
DOTA-NOC	Nal-1	Thr(ol)
DOTA-NOC-ATE	Nal-1	Thr
DOTA-BOC	BzThi	Thr(ol)
DOTA-BOC-ATE	BzThi	Thr



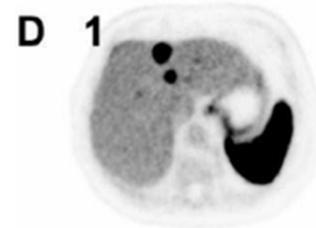
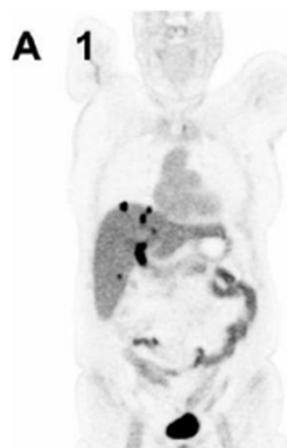
NB : pas d'arrêt ou de délai si traitement par SSA. F. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Imagerie des Récepteurs à la Somatostatine (SSTRi)

⁶⁴Cu-DOTATATE



¹⁸F-SiTATE



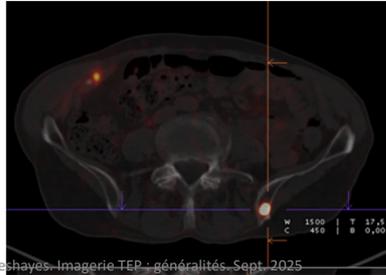
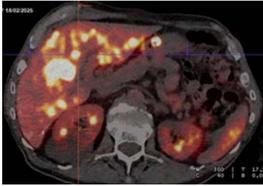
Avantages F-18 vs Ga-68 :

- Disponibilité (production industrielle)
- Demi-vie
- "netteté" : parcours plus court du positron.

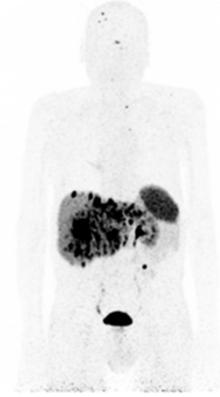
• Hope, T. A., et al., *J Nucl Med* 64, no. 2 (Feb 2023): 204-10. F. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025
 • Beyer, L., et al., *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 48, no. 11 (Oct 2021)
 • Trautwein, N. F., et al., *EJNMMI Phys* 12, no. 1 (Feb 5 2025): 13.

Imagerie des Récepteurs à la Somatostatine (SSTRi)

- AMM : **$^{68}\text{Ga-DOTATOC (SOMAKIT®)}$** est indiquée pour l'imagerie par tomographie par émission de positons (TEP) de la surexpression de récepteurs de la somatostatine afin de **localiser les tumeurs primitives et leurs métastases chez des patients adultes atteints de tumeurs neuroendocrines gastro-entéro-pancréatiques (TNE-GEP) bien différenciées confirmées ou suspectées.**
- Extension aux différentes tumeurs surexprimant les SSTR.
- Sélection patients pour la RIV



E. Deshayes-Imagerie TEP : généralités, Sept. 2025



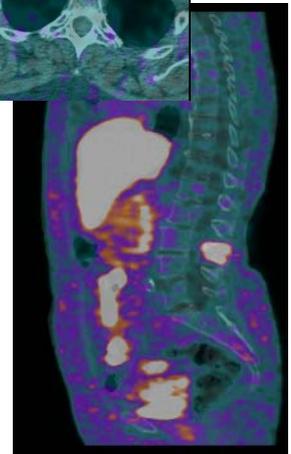
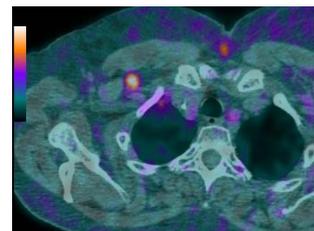
^{18}F -Estradiol Cible : récepteurs aux Estrogènes

Indication (AMM): caractérisation des lésions métastatiques, connues ou suspectées comme exprimant les récepteurs oestrogéniques dans le cancer du sein de l'adulte, exprimant initialement le récepteur des œstrogènes.

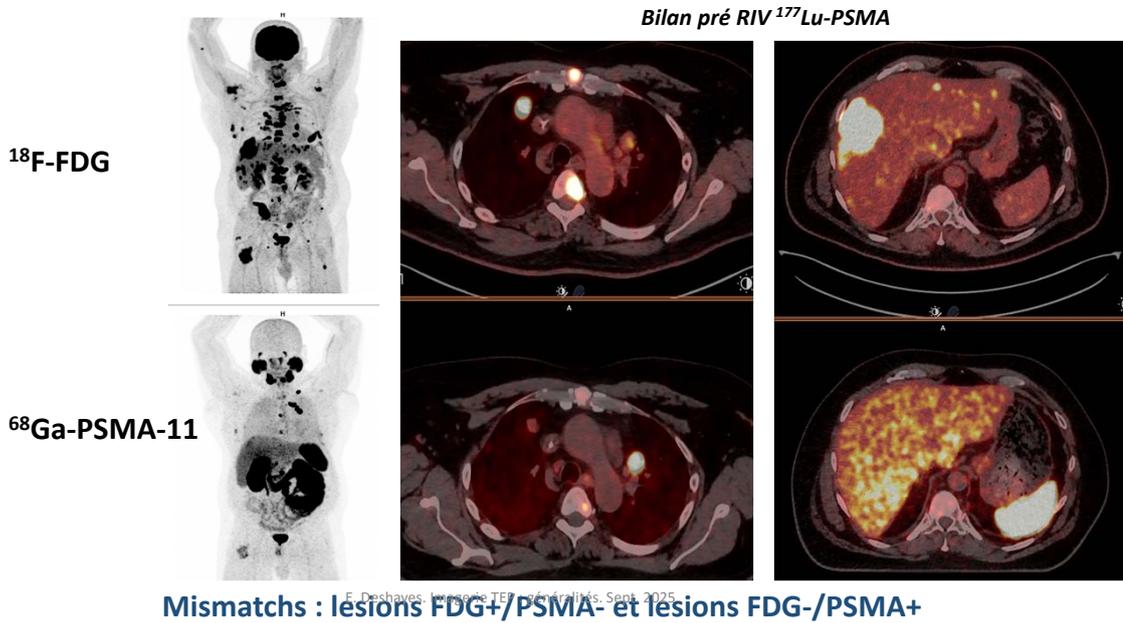
Place dans la stratégie diagnostique :

- ESTROTEP® (^{18}F -Fluoroestradiol) est un médicament radiopharmaceutique qui a une place dans la stratégie diagnostique chez les patients ayant un cancer du sein initialement RE+, métastatique, en rechute précoce après un traitement par hormonothérapie, lorsque la biopsie est jugée impossible et qu'il existe une ligne d'hormonothérapie envisageable. (Seule indication remboursée en France).
- ESTROTEP® (^{18}F -Fluoroestradiol) n'a pas de place dans les autres situations cliniques de l'AMM.

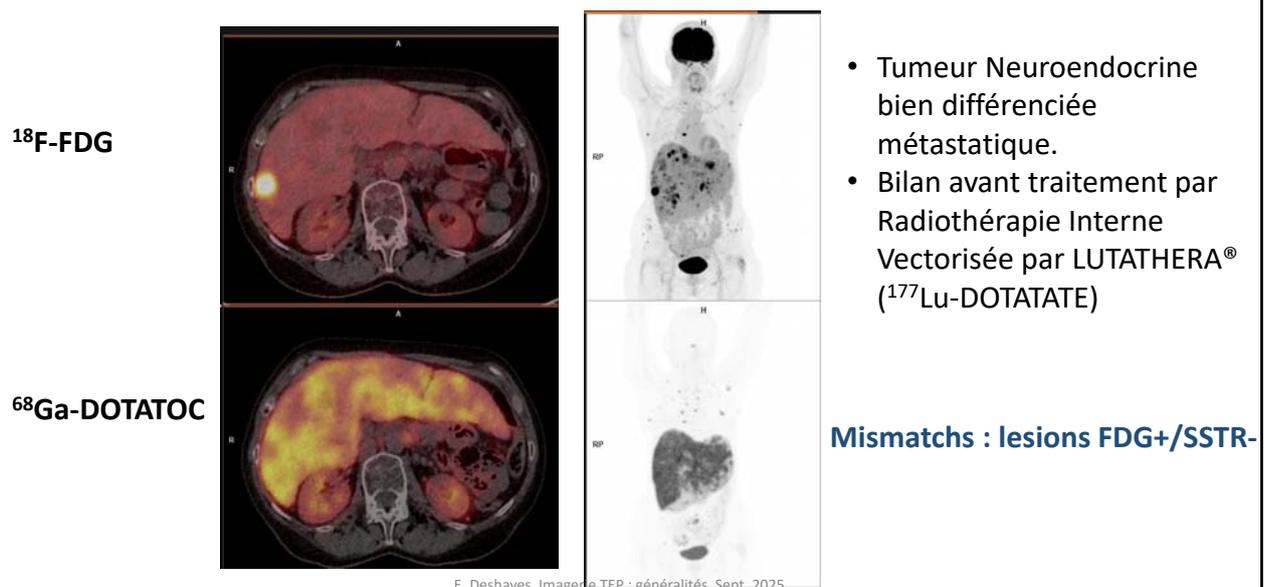
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025



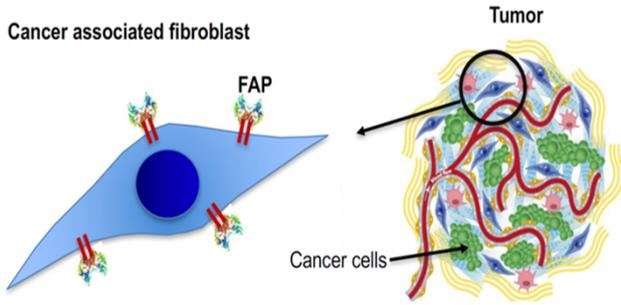
Exemple de complémentarité des imageries TEP



Exemple de complémentarité des imageries TEP



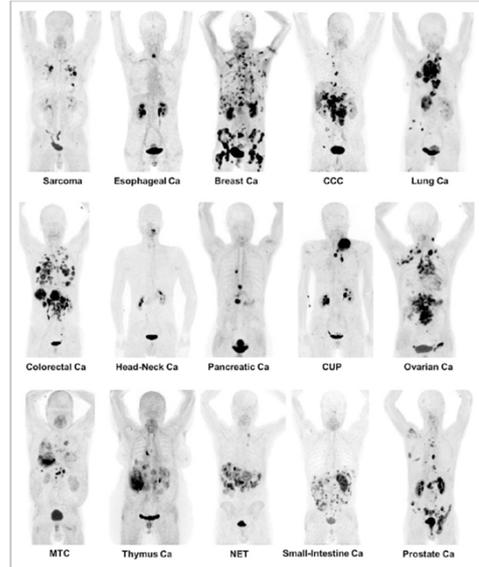
Radiotraceurs TEP : futures applications



Fibroblast Activation Protein Alpha : protéine transmembranaire de surface qui est surexprimée par les CAF.



FAPi (= FAP inhibitors) : plusieurs : FAPi46, 74, etc...
Marqués on-site au Gallium-68

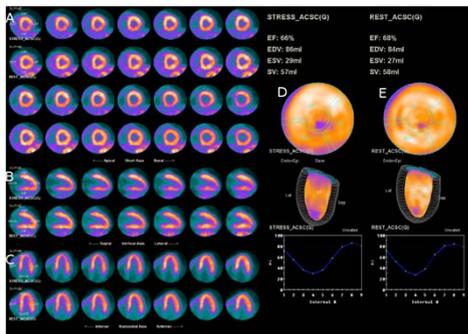


Kratohwill, C., et al. "(68)Ga-Fapi-Pet/Ct: Tracer Uptake in 28 Different Kinds of Cancer." *J Nucl Med* 60, no. 6 (Jun 2019): 801-05.

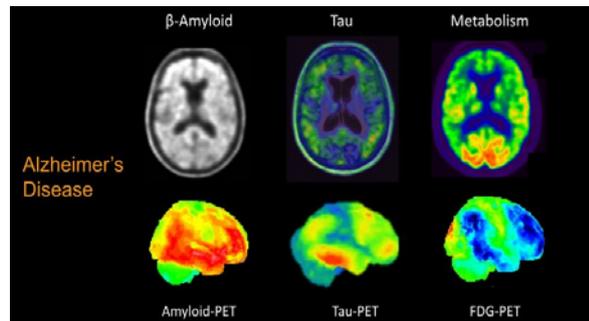
E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Plusieurs essais à l'ICM avant fin 2025

Radiotraceurs TEP : futures applications



Perfusion myocardique ⁸²Rb



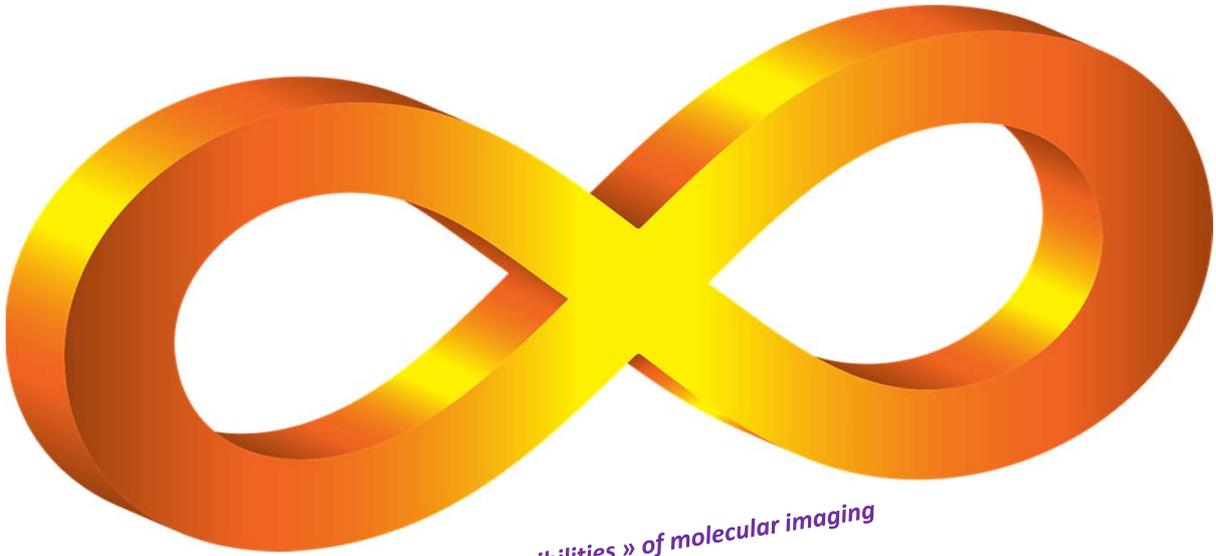
Alzheimer's Disease

Neurologie

⁸⁹Zr-MaBs, etc...

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025

Merci de votre attention



The « infinite possibilities » of molecular imaging

E. Deshayes. Imagerie TEP : généralités. Sept. 2025