

**DOSIMETRIE OPERATIONNELLE EN MEDECINE
NUCLEAIRE.
ETUDE DU POSTE DE LA TOMOGRAPHIE PAR
EMISSION DE POSITONS (TEP).**

**Dr Xavier CASTAGNET
Service de Protection Radiologique des Armées,
BP n°1, 00 480 Armées**

**DOSIMETRIE OPERATIONNELLE EN MEDECINE NUCLEAIRE.
ETUDE DU POSTE DE LA TOMOGRAPHIE PAR EMISSION DE POSITONS (TEP).**

**Dr Xavier CASTAGNET
Service de Protection Radiologique des Armées,
BP n°1, 00 480 Armées**

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	3
2	LA TOMOGRAPHIE PAR EMISSION DE POSITONS (TEP)	6
2.1	PRESENTATION GENERALE.....	6
2.2	PRINCIPES TECHNIQUES DE LA TEP	6
2.2.1	<i>Etape radio chimique : la synthèse de l'isotope radioactif</i>	6
2.2.2	<i>Etape radio pharmaceutique : la synthèse du traceur</i>	7
2.2.3	<i>La caméra TEP et son fonctionnement</i>	9
2.2.4	<i>De la détection du signal à l'image</i>	11
2.3	PRINCIPALES APPLICATIONS	12
2.3.1	<i>Les domaines de recherche</i>	13
2.3.2	<i>Applications médicales en oncologie</i>	13
2.4	TEP ET RADIOPROTECTION	16
2.4.1	<i>Données élémentaires concernant le ¹⁸F</i>	16
2.4.2	<i>Radioprotection du patient</i>	17
3	MATERIEL ET METHODES	19
3.1	PRESENTATION DE L'ETUDE DE POSTE	19
3.2	MATERIEL D'INSTRUMENTATION.....	19
3.3	DEROULEMENT DE L'EXPERIMENTATION	20
3.3.1	<i>Personnel surveillé</i>	20
3.3.2	<i>Postes de travail étudiés</i>	20
4	RESULTATS	21
4.1	DISTRIBUTION DE LA DOSE PAR CATEGORIE DE PERSONNEL.....	21
4.2	DISTRIBUTION DE LA DOSE PAR POSTE DE TRAVAIL	21
5	ANALYSE ET DISCUSSION	22
5.1	DISTRIBUTION DE LA DOSE PAR CATEGORIE DE PERSONNEL.....	22
5.2	DISTRIBUTION DE LA DOSE PAR POSTE DE TRAVAIL	22
5.3	DOSES MESUREES ET LIMITES D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE ANNUELLE.....	22
5.3.1	<i>Comparaison par catégorie de personnel</i>	22
5.3.2	<i>Comparaison par poste de travail</i>	23
5.4	COMPARAISON AVEC LES DONNEES DE LA LITTERATURE	25
5.4.1	<i>Exposition du personnel par examen TEP</i>	25
5.4.2	<i>Dosimétrie des extrémités du personnel par examen TEP</i>	26
5.4.3	<i>Exposition du personnel par le patient</i>	26
5.5	RECAPITULATIF	27
6	SYNTHESE ET CONCLUSION.....	28
7	REMERCIEMENTS.....	29
8	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	30

FIGURES ET TABLEAUX

<i>Figure 1 : Cyclotron 18/9 Cyclone</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2 : Réaction d'annihilation</i>	<i>9</i>
<i>Figure 3: Schéma de principe de la caméra TEP</i>	<i>9</i>
<i>Figure 4: Caméra TEP Ecat Exact HR (Siemens-CTI).....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 5: Statif de la caméra TEP ouvert</i>	<i>11</i>
<i>Figure 6: Résultats de la dosimétrie par poste de travail ($\mu\text{Sv/j}$)</i>	<i>21</i>
<i>Figure 7: Comparaison des doses annuelles par poste de travail à la limite catégorie A.....</i>	<i>24</i>

<i>Tableau 1: Limites de dose pour les travailleurs et le public</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 2 : Principaux radioéléments utilisés en TEP.....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 3: Caractéristiques de principaux radioéléments utilisés en TEP</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 4: Radiotoxicités comparées de différents isotopes</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 5: Caractéristiques d'émission du ^{18}F.....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 6: Exemple de CDA pour le ^{18}F</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 7: ^{18}F-FDG, dose absorbée par activité administrée ($\mu\text{Gy/MBq}$).....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 8: Comparaison des doses délivrées en radiologie et médecine nucléaire.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 9: Résultats de la dosimétrie opérationnelle individuelle</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 10 : Doses annuelles et limites réglementaires d'exposition</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 11: Projection des doses annuelles par poste de travail TEP.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 12: Chiesa, exposition du personnel par examen TEP.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 13: Laffont, exposition du personnel par examen TEP.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 14: Laffont, dosimétrie des extrémités du personnel TEP.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 15: Laffont, exposition du personnel par le patient</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 16: Synthèse des mesures de dose efficace au technicien par examen TEP.....</i>	<i>27</i>

1 INTRODUCTION

La radioprotection des personnes (public ou travailleurs) exposées aux rayonnements ionisants repose sur trois piliers fondamentaux :

- **La justification des pratiques** : toute exposition aux rayonnements ionisants doit être justifiée par les avantages (pour l'individu ou la société) qu'elle procure. En milieu médical, il s'agit de justifier les procédures mises en œuvre pour améliorer le diagnostic de telle ou telle affection pour chaque patient. Elle implique également la plus grande vigilance vis-à-vis de l'exposition du personnel soignant.
- **L'optimisation de la protection** : le niveau d'exposition doit être maintenu le plus bas que l'on puisse raisonnablement atteindre, compte tenu des facteurs économiques et sociaux. L'objectif est donc de maintenir toutes les doses qui ne concourent pas à l'obtention d'une information pertinente, à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, démarche couramment appelée ALARA (As low as reasonably achievable).
- **La limitation des doses individuelles** : l'exposition des individus doit être soumise à des limites de dose. Aucun individu ne doit être exposé à un risque radiologique jugé inacceptable dans le cadre d'une situation normale de travail.

L'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en milieu hospitalier dépend directement du type de sources de rayonnements ionisants employées et de la manière de les utiliser, dans un but diagnostique ou thérapeutique. Ces sources diverses émettent d'une manière générale des photons X ou gamma, des électrons de haute énergie, des particules bêta ou encore des protons. Elles sont utilisées dans les principaux domaines suivants : radiothérapie externe, curiethérapie, radiologie, médecine nucléaire et laboratoires de radio analyse. Toutes ces applications entraînent pour le personnel un risque d'exposition externe, ainsi que, pour certaines d'entre elles, un risque d'exposition interne en raison de l'utilisation de sources non scellées.

Le personnel du milieu médical représente en France la majorité de la population des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants : les applications médicales des rayonnements ionisants emploient plus de 100 000 personnes, sur un total d'environ 210 000 travailleurs pouvant être soumis à une exposition d'origine professionnelle. Les données les plus complètes concernant l'exposition de cette population proviennent de la dosimétrie réglementaire passive, basée sur l'exposition du film dosimètre porté à la poitrine.

Pour certaines pratiques médico-chirurgicales (radiologie interventionnelle, chirurgie sous amplificateur de brillance, médecine nucléaire...), et souvent les plus irradiantes, ces résultats sont loin de refléter la réalité en particulier pour l'exposition des extrémités. En effet, si les rayonnements sont plutôt bien détectés et caractérisés, l'estimation de la dose délivrée au personnel, reposant une dosimétrie parfois inadaptée à l'activité professionnelle, est difficile. De plus, la réglementation concernant la surveillance de tout travailleur exposé aux rayonnements ionisants impose maintenant l'enregistrement, en temps réel, de toute dose susceptible d'être reçue en zone contrôlée, à l'aide de la dosimétrie active ou opérationnelle..

Afin de mieux respecter encore les trois principes précédemment décrits, la place de la dosimétrie opérationnelle dans la surveillance réglementaire des travailleurs directement affectés aux travaux sous rayonnements ionisants a été définie par le décret 98-1186 du 24 décembre 1998. Cette dosimétrie, obligatoire pour tout travailleur présent en zone contrôlée quelle que soit son exposition annuelle potentielle, est constituée par l'ensemble des mesures effectuées en continu en vue d'une lecture immédiate de la dose. La dosimétrie opérationnelle

appelée également dosimétrie active ne se substitue pas à la dosimétrie passive réalisée actuellement avec le dosimètre photographique. Elle la complète en permettant, par retour d'expérience, d'optimiser sur le lieu de travail la protection radiologique du personnel et de réduire son exposition.

Un arrêté en date du 23 mars 1999 a précisé les modalités d'application du décret 98-1186. L'organisation et les moyens prescrits semblent davantage adaptés aux installations nucléaires industrielles qu'aux installations hospitalières mais s'y appliquent cependant, et notamment aux services de médecine nucléaire.

La présente étude a été réalisée dans le service de médecine nucléaire de l'Hôpital d'Instruction des Armées du Val-de-Grâce, avec le concours technique du Service de Protection Radiologique des Armées. Le but de l'expérimentation était d'évaluer l'importance, pour le personnel, des expositions liées aux différentes techniques de radiodiagnostic, et d'apprécier les doses efficaces reçues par le personnel à l'aide de dosimètres opérationnels. La Tomographie par Emission de Positons (TEP) a particulièrement été étudiée, compte tenu de son installation récente dans le service et du peu de données disponibles dans ce domaine. Enfin l'efficacité des mesures d'aménagement du poste de travail des techniciens et manipulateurs (et surtout celui d'une manipulatrice enceinte) a pu être appréciée.

Les limites réglementaires d'exposition du personnel aux rayonnements ionisants connaissent actuellement des évolutions liées à la publication des décrets d'application de deux directives européennes, la directive 96/29 EURATOM du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, et la directive 97/43 EURATOM du 30 juin 1997 relative à la protection sanitaire des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants lors d'expositions à des fins médicales.

Ces directives ont été transposées partiellement, avec la publication récente de quatre décrets :

- Décret 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.
- Décret 2003-270 du 24 mars 2003 relatif à la protection des personnes exposées à des rayonnements ionisants à des fins médicales et médico légales et modifiant le code de la santé publique.
- Décret 2003-295 du 31 mars 2003 relatif aux interventions en situation d'urgence radiologique et en cas d'exposition durable et modifiant le code de la santé publique.
- Décret 2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.

Les évolutions les plus importantes concernent les nouvelles limites de dose individuelle, la définition des zones réglementées, la dosimétrie passive et opérationnelle, le rôle de la personne compétente en radioprotection. Aucun arrêté d'application des décrets n'a encore été publié.

En France les limites d'exposition professionnelle suivantes ont été retenues:

- 20 mSv par an pour le personnel de catégorie A,
- 6 mSv par an pour le personnel de catégorie B,
- dans le cas de la femme enceinte, 1 mSv pour l'enfant à naître, dose reçue entre la déclaration de la grossesse et l'accouchement.

Les doses limites tolérées aux extrémités n'ont pas été modifiées : 150 mSv/an pour le cristallin, 500 mSv/an pour la peau et les extrémités.

La catégorie A regroupe les travailleurs exposés susceptibles de recevoir une dose efficace supérieure à 6 mSv par an ou une dose équivalente supérieure aux 3/10^e des limites de dose fixées pour le cristallin, la peau ou les extrémités.

La catégorie B regroupe tous les travailleurs exposés qui ne relèvent pas de la catégorie A.

Les limites professionnelles réglementaires d'exposition externe retenues en France sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Travailleurs exposés aux travaux sous rayonnements ionisants	Limites anciennes	Limites nouvelles
Exposition globale (dose efficace)	50 mSv / 12 mois	20 mSv / 12 mois
Exposition partielle (dose équivalente) Cristallin Peau Mains, pieds	150 mSv/an 500 mSv/an 500 mSv/an	150 mSv/an 500 mSv/an 500 mSv/an
Grossesse déclarée (dose équivalente)	10 mSv/an à l'abdomen	1 mSv/an au fœtus
Public (dose efficace)	5 mSv/an	1 mSv/an (publié)

Tableau 1: Limites de dose pour les travailleurs et le public

2 LA TOMOGRAPHIE PAR EMISSION DE POSITONS (TEP)

2.1 Présentation générale

La tomographie par émission de positons (TEP) est une technique d'imagerie basée sur l'utilisation de molécules biologiques marquées par des radio-éléments, qui permet d'explorer le fonctionnement et le métabolisme du corps humain. Elle tend à devenir une technique de routine en oncologie, pour le bilan initial de la maladie, la détection précoce des récives tumorales et le suivi thérapeutique. Elle présente également de nombreuses applications en recherche biomédicale.

La TEP présente l'avantage de combiner différentes techniques d'imagerie :

- *une technique d'imagerie isotopique*: elle utilise des molécules biologiques marquées par des isotopes radioactifs à demi-vie très brève.
- *une technique d'imagerie fonctionnelle in vivo*: elle fournit des images de la répartition dans le corps de la molécule marquée, injectée en quantité infime non toxique. Selon le traceur, une fonction particulière d'un organe peut être explorée, ce qui permet par exemple de caractériser certains métabolismes.
- *une technique d'imagerie quantitative* : son principe est basé sur la détection du rayonnement γ d'annihilation, conséquence de l'interaction du positon avec la matière. La quantité de rayonnement γ détectée est proportionnelle à la concentration locale de la molécule marquée par l'isotope radioactif.
- *une technique d'imagerie tomographique 3D*: l'empilement de coupes tomographiques permet la reconstitution du volume étudié avec une précision de quelques millimètres cubes.

La réalisation d'une image de TEP est donc l'aboutissement d'une chaîne multidisciplinaire qui contient les principales étapes suivantes :

- la production d'isotopes émetteurs de positons (ou β^+) par un cyclotron biomédical,
- la synthèse d'une molécule biologique et son marquage par un émetteur de positons,
- l'injection d'une dose traceuse de la molécule marquée au sujet,
- l'acquisition du signal avec la caméra TEP,
- la reconstruction de l'image tomographique.

2.2 Principes techniques de la TEP

2.2.1 Etape radio chimique : la synthèse de l'isotope radioactif

L'un des atouts majeurs de la TEP est la possibilité d'obtenir un très grand nombre de traceurs à partir d'isotopes émetteurs de positons à demi-vie très courte comme l'Oxygène-15, l'Azote-13 ou le Fluor-18. L'intérêt des émetteurs de positons en médecine nucléaire est connu depuis plusieurs années (Bendriem et al, 1998). Sont utilisés des radionucléides qui existent dans la plupart des molécules biologiques (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O), ou bien des halogènes (^{18}F , ^{76}Br) qui peuvent facilement être incorporés aux ligands naturels sans altérer leurs propriétés biologiques.

La synthèse des isotopes émetteurs de positons nécessite la présence d'un cyclotron à proximité du site d'utilisation. Plusieurs machines très différentes permettent d'accélérer des particules légères à des énergies suffisantes pour créer, par bombardement de cibles, ces isotopes instables.



Un cyclotron (**Figure 1**) est un accélérateur de particules qui utilise la combinaison d'un champ magnétique (circularisation de trajectoire), d'un champ électrique (accélération électrostatique) et d'une radiofréquence (synchronisation des accélérations). Des faisceaux de protons (noyaux de l'atome d'hydrogène) ou de deutons (noyaux formés par l'association d'un proton et d'un neutron) peuvent ainsi être obtenus.

Figure 1 : Cyclotron 18/9 Cyclone

Le bombardement des noyaux cibles par les particules accélérées va créer des noyaux excédentaires en protons, des éléments à très courte période qui se désactivent par émission de positons. La courte période est favorable d'un point de vue dosimétrique, mais empêche le transport des radioéléments à grande distance, et oblige à disposer à proximité d'un cyclotron dédié ou partagé, et la présence d'un laboratoire radio chimique.

Les radioéléments émetteurs β^+ les plus utilisés sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Isotope	Période (min)	LPM * (mm)
^{11}C	21	4,1
^{13}N	10	5,4
^{15}O	2	8,2
^{18}F	110	2,6

LPM : libre parcours moyen dans la matière.

Tableau 2 : Principaux radioéléments utilisés en TEP

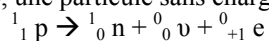
Seul le ^{18}F présente une demi-vie physique suffisamment longue pour autoriser une radio synthèse, un transport et une utilisation relativement aisée dans les services de médecine nucléaire.

RAPPEL : LE POSITON CET INCONNU

Le positon est une particule dont la masse et le spin sont identiques à ceux de l'électron, mais dont la charge est opposée, et donc positive. On le note β^+ ou e^+ . Il est émis par un atome radioactif qui possède dans son noyau un nombre excessif de protons par rapport au nombre de neutrons.

La notation standard de la réaction s'écrit : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + {}^0_{+1}\text{e}$

Le bilan énergétique de la réaction implique un seuil minimum de transition de 1,022 MeV (deux fois la masse de l'électron). En fait cette réaction correspond au sein du noyau à la transformation d'un proton en un neutron avec émission d'un positon et d'un neutrino, une particule sans charge et de masse nulle au repos:



La différence entre l'énergie disponible dans la transition et celle de 1,022 MeV apparaît sous forme d'énergie cinétique qui se répartit entre le positon et le neutrino.

2.2.2 Etape radio pharmaceutique : la synthèse du traceur

La production de molécules marquées est l'élément clé de la TEP. Le marquage des molécules peut être effectué en quelques dizaines de minutes avec une très haute activité spécifique, ce qui permet d'injecter des doses sous forme de traces. Ce type de marquage respecte le métabolisme, contrairement à la médecine nucléaire traditionnelle utilisant des

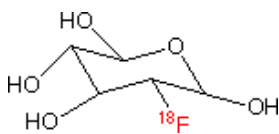
molécules marquées à l'iode ou au technétium qui introduisent un atome étranger, susceptible de perturber le devenir biologique du traceur.

La demi-vie extrêmement courte des émetteurs de positons représente un défi pour l'équipe de radiochimie, puisqu'il va falloir incorporer ces atomes radioactifs dans une molécule traceuse en quelques minutes avant la disparition de la radioactivité. La radioprotection du personnel impose que les synthèses soient automatisées et se déroulent à l'intérieur de cellules blindées (50 mm de plomb). De plus, la molécule sera injectée à l'homme, il faut donc suivre des règles de fabrication rigoureuses des médicaments : à l'issue de la synthèse rapide selon une procédure bien codifiée, une étape de contrôle de qualité permettra de vérifier les caractéristiques du produit radio pharmaceutique.

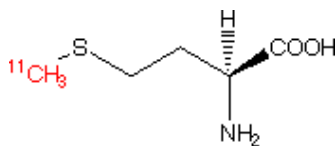
On obtient ainsi des ligands biologiques marqués (radio pharmaceutiques), qui vont pouvoir suivre les principales voies du métabolisme telles que :

- le métabolisme énergétique (consommation de sucres),
- le métabolisme oxydatif,
- le métabolisme protéique (incorporation d'acides aminés dans les protéines),
- les réactions enzymatiques,
- les interactions ligands-récepteurs ou hormonales.

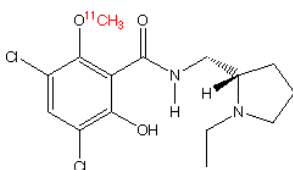
Quelques molécules synthétisées sont décrites ci-après.



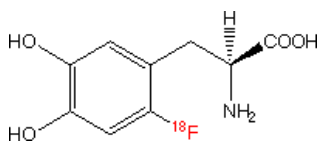
¹⁸F-FDG : le 18-fluoro-désoxyglucose est la molécule la plus utilisée dans les centres TEP pour suivre le métabolisme du glucose dans diverses pathologies tumorales, dans l'épilepsie, dans diverses atteintes cardiaques. Son utilisation sera plus amplement détaillée au chapitre « Principales applications médicales ».



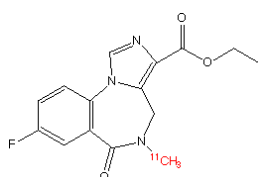
¹¹C-Méthionine : la méthionine est un acide aminé indicateur de la synthèse protéique, utilisée en TEP pour les études du métabolisme des tumeurs.



¹¹C-Raclopride : c'est un ligand antagoniste des récepteurs post-synaptiques dopaminergiques, utilisé dans l'étude des maladies dégénératives présentant des désordres des mouvements coordonnés, comme la maladie de Parkinson.



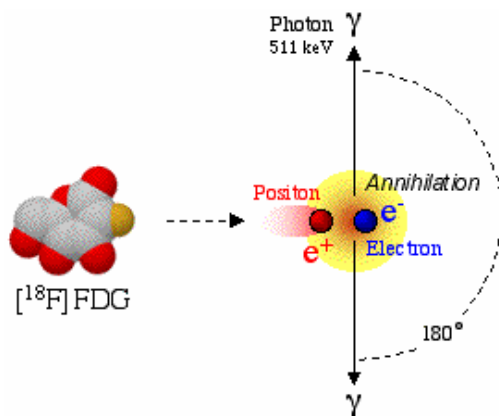
¹⁸F-FluoroDOPA : cette molécule permet de suivre la synthèse de dopamine dans les noyaux cérébraux qui contrôlent le mouvement, et est également très utilisée dans les études sur la maladie de Parkinson.



¹¹C-Flumazenil : antagoniste des récepteurs aux benzodiazépines, situé sur le complexe du récepteur GABA, il est utilisé dans l'exploration des épilepsies et l'étude de l'anxiété.

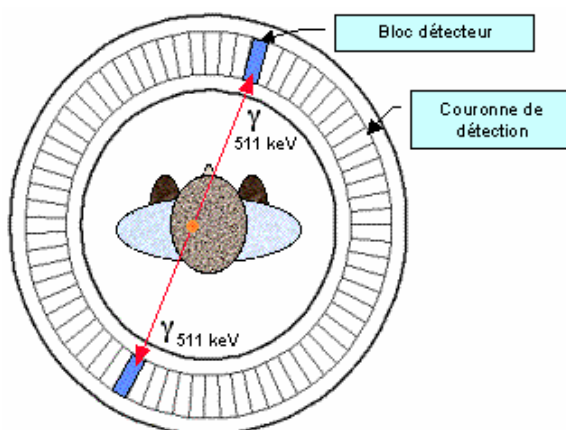
2.2.3 La caméra TEP et son fonctionnement

2.2.3.1 Nature du signal détecté



Lors du retour à l'état stable d'un atome de Carbone-11, d'Oxygène-15, de Fluor-18 ou d'Azote-13, un positon (e^+) est émis. Dans la matière, il perd son énergie cinétique initiale essentiellement par collisions, et il finit par se combiner avec un électron libre ou peu lié au milieu (**Figure 2**). La paire positon-électron ainsi créée a une durée de vie extrêmement brève, et deux photons sont émis dans deux directions diamétralement opposées, d'énergie 511 keV chacun. Il y a réaction d'annihilation : la collision matière/antimatière (e^-/e^+) entraîne la disparition des deux particules et la création de deux photons emportant l'énergie totale du système, respectant ainsi la loi de la conservation de l'énergie.

Figure 2 : Réaction d'annihilation



La tomographie par émission de positons consiste à détecter la paire de photons, à l'aide de cristaux à scintillation couplés électroniquement (**Figure 3**).

Pour recueillir le maximum de paires de photons, la caméra TEP est formée de plusieurs blocs détecteurs, constitués de cristaux scintillateurs ayant la capacité d'émettre un photon secondaire lors de l'absorption d'un photon de 511 keV. Ce photon secondaire est peu énergétique et est dans le domaine du visible. Ce faible signal lumineux est amplifié par photomultiplication, et converti en signal électrique. Il peut alors être traité par une électronique d'acquisition adaptée.

Figure 3: Schéma de principe de la caméra TEP

Si deux photons sont détectés sur deux cristaux diamétralement opposés dans un intervalle de temps de quelques nanosecondes (appelé "fenêtre de coïncidence"), la caméra considère ces deux signaux comme étant la conséquence de l'annihilation d'un positon et d'un électron. La détection de ces deux photons gamma est appelée un "événement en coïncidence". Les deux photons gamma ont donc parcouru une droite et ont terminé leur course sur les cristaux scintillateurs. Le segment de droite reliant deux cristaux scintillateurs en vis-à-vis est appelé "ligne de réponse".

La collecte de tous ces événements sur les lignes de réponses liant les milliers de cristaux du système de détection de la caméra TEP constitue l'information brute que l'on enregistre dans des fichiers appelés "sinogrammes".

2.2.3.2 La caméra TEP

La caméra TEP est un instrument de détection de rayonnements gamma d'énergie 511 keV et de mesure tridimensionnelle de radioactivité. (Figure 4).



Elle est composée de :

- un statif contenant le système de détection (les blocs de détecteurs, l'électronique de coïncidence),
- un lit réglable en hauteur et en profondeur,
- un système informatique pour le stockage des acquisitions, et la reconstruction des images.

Figure 4: Caméra TEP Ecat Exact HR (Siemens-CTI)

De nombreuses innovations ont été concrétisées ces dernières années pour améliorer les performances des systèmes de détection. La détection en coïncidence nécessite au moins deux blocs détecteurs, mais peut être réalisée par un système équipé de trois, voire six blocs de détection. Les modèles les plus récents forment plusieurs couronnes de détecteurs autour de la tête du patient, délimitant un cylindre de détection d'une quinzaine de centimètres.

Les performances de la détection des positons sur les gamma-caméras sont le résultat d'un compromis qui permet aux différents systèmes de rester performants pour l'imagerie des émetteurs de simples photons, tout en effectuant l'imagerie des émetteurs de positons : un cristal plus épais permet d'augmenter l'efficacité de détection, mais entraîne une dégradation de la résolution spatiale intrinsèque du détecteur.

2.2.3.3 L'importance du choix du scintillateur

En TEP, le scintillateur doit être dense pour l'arrêt des photons de 511 keV, résolu en énergie pour limiter le nombre de coïncidences diffusées, et rapide pour réduire le taux d'évènements aléatoires. La densité et le coefficient d'atténuation linéaire influent directement sur l'efficacité de détection. La résolution en énergie ainsi que la constante de décroissance d'un scintillateur renseignent sur la possibilité de limiter les fenêtres temporelles et spectrométriques, et ainsi de réduire les coïncidences aléatoires et diffusées (Bendriem, 1998).

- L'iodure de sodium NaI(Tl) : c'était le matériau le plus employé jusqu'à présent. Caractérisé par une bonne résolution en énergie, il possède l'avantage de permettre d'obtenir des grandes surfaces de détection pour un coût modéré. Les appareils TEP - NaI(Tl) sont constitués d'un ensemble de six détecteurs rectangulaires plans ou curvilignes disposés en anneau autour du patient.
- Le germanate de bismuth (BGO) : les détecteurs les plus récents sont des cristaux scintillateurs en BGO. Le germanate de bismuth est actuellement le plus utilisé du fait de sa densité élevée qui entraîne une bonne efficacité de détection. Chaque bloc de BGO est découpé en 64 cristaux élémentaires de détection, et est couplé à 4 photomultiplicateurs pour former un bloc détecteur (Cho et al. 1997).
- L'avenir : Orthosilicate de Lutétium (LSO) et Orthosilicate de Gadolinium (GSO). Ce sont des scintillateurs denses, rapides et résolus en énergie, qui permettront de réduire la fenêtre temporelle de coïncidence vers 6 ns, et ainsi de limiter le taux de coïncidences aléatoires.

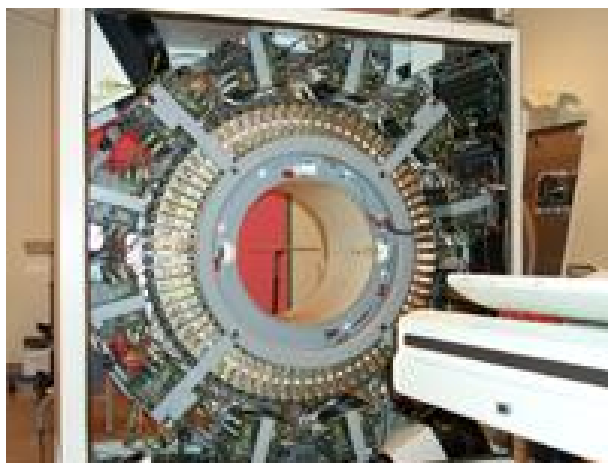


Figure 5: Statif de la caméra TEP ouvert

L'ensemble des détecteurs est organisé en anneau complet autour du patient (**Figure 5**), produisant simultanément 35 à 63 coupes.

Des collimateurs amovibles permettent, en se rétractant, de multiplier le nombre de lignes de réponses acquises, ce qui a pour effet d'accroître la sensibilité de détection. Ce type d'acquisition est appelé "acquisition 3D".

2.2.3.4 Les limites de la technique : les sources de bruit

L'inconvénient majeur de ce mode de détection est lié à l'enregistrement de coïncidences fortuites: des photons issus de sources de positons différentes arrivant en même temps sur les détecteurs. Le taux de coïncidences fortuites dépend linéairement de la fenêtre temporelle d'acquisition et croît comme le carré de la radioactivité présente dans le champ de vue du système de détection. Il introduit, au niveau de l'acquisition des données, un niveau de bruit qui doit être pris en compte. Dans certain cas, ce niveau peut être du même ordre que celui du signal utile.

Outre les coïncidences fortuites, les principales sources de bruit proviennent de l'enregistrement de coïncidences diffusées. Dans ce cas un ou les deux photons d'annihilation changent de direction après une ou plusieurs interactions Compton dans le corps humain et la mesure correspondante véhicule une information spatiale incorrecte.

L'ensemble de ces phénomènes de diffusion, auquel s'ajoutent les phénomènes d'absorption totale des photons dans les tissus, contribue à l'atténuation des photons à l'intérieur du corps. Une particularité de l'émission des photons d'annihilation et de la détection en coïncidence est due au fait que pour chaque ligne de mesure élémentaire, l'atténuation (considérée comme le rapport entre le nombre de paires de photons s'échappant du corps suivant la direction de mesure et le nombre de paires de photons émis suivant cette même direction) est indépendante de la position de la source sur la ligne de mesure. La correction est alors possible par la mesure directe de cette atténuation (connue sous le nom d'acquisition de transmission) à l'aide de sources externes de radioactivité (voir chapitre 2.2.4.2).

2.2.4 De la détection du signal à l'image

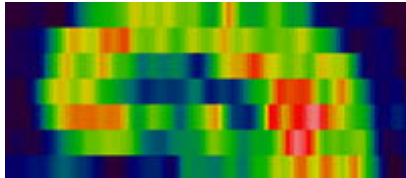
2.2.4.1 L'indispensable outil informatique

Le système de coïncidence est formé par des circuits électroniques qui assurent le couplage des blocs détecteurs par paires, et permet de mesurer la coïncidence de l'arrivée des photons gamma sur une ligne de réponse. Les cartes électroniques convertissent les événements en données digitales et les trient selon différents critères (énergie, délai). Les événements retenus sont ensuite transférés au système informatique pour y être stockés sous forme de fichiers.

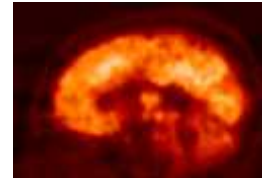
La connaissance des désintégrations sur chaque ligne de réponse revient à connaître les projections de l'image de la radioactivité dans un grand nombre de plans. A partir de ces projections est reconstruite l'image de la distribution spatiale de la radioactivité mesurée.

On passe donc, à l'aide d'algorithmes de reconstruction, des sinogrammes à des coupes jointives décrivant un volume, chaque pixel de ces images représentant la mesure locale de radioactivité sur la durée de l'acquisition.

La recherche sur la nature et la géométrie des détecteurs a permis d'obtenir des améliorations des caractéristiques des caméras (champs de vue, résolution, etc.), imagées par l'exemple ci-dessous, qui compare une coupe cérébrale longitudinale d'ancienne génération avec une image obtenue avec un matériel récent.



Coupe cérébrale longitudinale
Coupe ancienne génération
(7 coupes non jointives)



Coupe cérébrale longitudinale
Caméra Ecat HR+
(63 coupes jointives)

2.2.4.2 Le déroulement de l'examen

Après l'injection de la molécule marquée, et un temps d'attente proportionnel à la durée de diffusion du traceur dans l'organisme, le patient est installé dans le lit de la caméra TEP.

L'acquisition des données se déroule alors en deux phases :

- Acquisition de transmission : pendant une dizaine de minutes, une mesure de l'atténuation par effet Compton des photons gamma au sein des tissus (muscle, os, ...) est effectuée en utilisant une source radioactive en rotation autour du corps du sujet (généralement du ^{137}Cs).
- Acquisition des images : les photons gamma émis par le traceur radioactif dans la partie du corps se situant dans le champ de vue de la caméra TEP sont recueillis. Selon le protocole, l'organe étudié et le traceur utilisé, les données peuvent être acquises de manière *statique* afin d'obtenir la distribution du traceur dans l'organe d'intérêt, de manière *dynamique* pour étudier l'évolution temporelle de la concentration du traceur dans un volume étudié, ou de manière *synchronisée* afin d'obtenir des images décomposant le cycle cardiaque par exemple.

L'augmentation de la puissance des logiciels de calcul permet à présent d'incorporer la phase d'acquisition de transmission au sein de la phase d'acquisition des images. Au cours d'un examen, plusieurs acquisitions peuvent être effectuées à la suite, dans différentes conditions expérimentales, afin de mettre en évidence la variation d'un paramètre physiologique en fonction de stimulations externes (visuelles, auditives, olfactives, ...).

A l'issue de l'examen, le patient doit s'hydrater et uriner régulièrement afin d'éliminer la radioactivité résiduelle.

2.3 Principales applications

L'utilisation d'émetteurs de positons en imagerie médicale remonte à 25 ans. Longtemps, la taille, l'encombrement, la complexité et le prix des cyclotrons ont limité cette technique à de prestigieux instituts de recherche. L'amélioration des systèmes de production de positons et les progrès de l'informatique ont démocratisé cette technologie depuis les années 90, notamment en oncologie nucléaire. Les principaux domaines d'utilisation de la tomographie par émission de positons sont la recherche physiologique, physiopathologique, pharmacothérapeutique, et, dans le domaine médical, l'oncologie.

2.3.1 Les domaines de recherche

2.3.1.1 Physiologie et physiopathologie de la cognition et du comportement

Le fonctionnement normal du cerveau est abordé soit en utilisant le couplage entre l'activation des régions cérébrales et le débit sanguin local, à l'aide d'injections d'eau marquée par ^{15}O , soit en utilisant des traceurs qui permettent de mesurer une activité métabolique, une activité de synthèse ou de dégradation, ou des liaisons de radio-ligands spécifiques. Sont ainsi étudiés:

- l'intentionnalité : les mécanismes neurologiques impliqués dans la perception des actions et des intentions (modifications dans le regard mutuel ou dans les gestes).
- la perception des odeurs : identification des réseaux neuronaux qui participent aux traitements de l'information olfactive.
- la compréhension des troubles pathologiques de la sexualité: par l'étude des bases neurales et neuroendocriniennes de la phase appétitive du comportement sexuel.

2.3.1.2 Physiologie et physiopathologie des ensembles neuronaux

Le fonctionnement pathologique du cerveau peut être abordé avec les mêmes approches soit au niveau du retentissement sur le fonctionnement général des zones cérébrales impliquées (perfusion sanguine, métabolisme), soit au niveau de l'atteinte sélective d'ensembles neuronaux identifiés par le suivi de la synthèse de leur transmetteur, ou l'évolution pathologique de l'occupation de leurs récepteurs.

Quatre axes de recherche principaux sont poursuivis dans ce domaine.

- l'épilepsie : bilan pré-chirurgical des épilepsies partielles chimiorésistantes.
- la douleur : il s'agit d'essayer de comprendre comment le cerveau peut auto-générer une douleur chronique et rebelle aux antalgiques et par quels mécanismes cette douleur peut être combattue par des neurostimulations par électrodes placées sur le cortex cérébral.
- la maladie de Parkinson : l'imagerie par la TEP permet d'évaluer à la fois les circuits de neurotransmission directement ou indirectement atteints par la maladie (dopamine...) et les circuits fonctionnels qu'elle perturbe au cours de son évolution et de son suivi thérapeutique.
- la psychiatrie : la TEP permet, par exemple, d'explorer l'aspect neurofonctionnel des troubles d'expression et de reconnaissance des émotions dans l'autisme, ou encore l'attribution d'intentions à autrui dans la schizophrénie.

2.3.1.3 Microcirculations et métabolismes

Le fonctionnement cellulaire des organes vitaux dépend de la bonne coordination entre l'apport sanguin et la capacité de l'organe à l'utiliser pour une activité fonctionnelle donnée. Les principaux organes sont étudiés:

- Le cœur: la TEP est la méthode de choix pour l'évaluation du couplage perfusion-métabolisme (Merlet et al). Elle permet d'explorer la viabilité d'un tissu cardiaque pathologique en mesurant localement le débit sanguin, la consommation de glucose ou d'oxygène, le catabolisme des acides gras ou même la densité de certains récepteurs membranaires.
- Le rein : l'évaluation de la perfusion rénale par la TEP permet d'envisager l'exploration non invasive du couplage perfusion-métabolisme au cours de l'ischémie rénale.
- Le poumon : l'étude de la micro circulation et de la ventilation pulmonaire a permis d'envisager l'utilisation diagnostique de la TEP pour l'étude de cette fonction vitale et son suivi pour optimiser les procédures de ventilation assistée en réanimation.

2.3.2 Applications médicales en oncologie

Durant sa transformation cancéreuse, la cellule subit des altérations de son patrimoine génique qui modifient son métabolisme. Dans la plupart des cas la transformation néoplasique induit une augmentation des transporteurs du glucose, comme le GLUT1. L'activation du gène codant pour la synthèse du transporteur de GLUT1 constitue donc un indicateur précoce de la transformation cellulaire maligne. Une augmentation de l'activité des principales enzymes contrôlant la glycolyse, en particulier l'hexokinase II, est également observée au sein des

cellules néoplasiques. Ainsi des récepteurs peuvent être reconnus spécifiquement par des molécules marquées avec des radionucléides convenablement sélectionnés.

Il est possible de suivre des métabolismes précis tels que l'incorporation cellulaire du glucose (par le fluoro-désoxyglucose marqué au ^{18}F ou ^{18}F -FDG), l'introduction des acides aminés dans la synthèse des protéines (méthionine marquée au ^{11}C), ou l'expression de protéines anormales par un tissu pathologique. L'injection des molécules traceuses permet de construire des images de leur distribution dans un organe entier ainsi que leur cinétique locale.

2.3.2.1 Le fluoro-désoxyglucose marqué au Fluor-18, ou ^{18}F -FDG

Le ^{18}F -fluoro-2-désoxy-D-glucose est un analogue du 2-désoxyglucose utilisé pour l'exploration du métabolisme glucidique. Il entre dans les cellules par les transporteurs du glucose (GLUT1), et est ensuite phosphorylé en FDG-6-phosphate par la première enzyme de la chaîne glycolytique, l'hexokinase (Rigo et al, 1996). Du fait de l'altération sur le deuxième carbone, la deuxième enzyme (la glucose-6-phosphate isomérase) ne peut agir sur le FDG-6-phosphate. Le ^{18}F -FDG s'accumule donc dans les cellules, ce qui reflète l'intensité de la consommation de glucose par les cellules concernées, et en particulier les cellules tumorales. L'accumulation de ^{18}F -FDG peut servir à détecter les tumeurs, et son analyse quantitative peut renseigner sur l'évolutivité tumorale et aider à prévoir la réponse au traitement.

L'exploration du corps entier au ^{18}F -FDG permet d'augmenter la sensibilité de la détection des tumeurs cancéreuses et de leurs métastases, et de définir les protocoles thérapeutiques les plus appropriés (chirurgie, radiothérapie ou chimiothérapie). La TEP permet également de suivre l'efficacité du traitement par la détection des récidives précoces (Valk et al. 1996).

2.3.2.2 Principales indications médicales

La TEP est maintenant utilisée en France dans certains services de médecine nucléaire comme outils d'aide au diagnostic et à la thérapeutique dans un grand nombre de pathologies tumorales (Lassen et al, 1999).

L'AMM française délivrée en novembre 1998 par l'Agence du Médicament au bénéfice d'une préparation commerciale de ^{18}F -FDG reconnaît les indications suivantes :

- Diagnostic primaire :
 - Diagnostic différentiel du nodule pulmonaire isolé,
 - Bilan d'extension initial des lymphomes hodgkiniens et non hodgkiniens, des cancers pulmonaires non à petites cellules, des cancers du rhinopharynx et des mélanomes malins,
 - Suivi thérapeutique précoce et recherche de maladies résiduelles : dans les lymphomes hodgkiniens et non hodgkiniens.
- Récidives et métastases :
 - cancers colo-rectaux : bilan d'opérabilité,
 - cancers pulmonaires non à petites cellules.

Dans le cancer du poumon, la TEP intervient à différents moments, du dépistage au suivi thérapeutique. Des milliers de patients sont explorés chaque année pour un nodule pulmonaire isolé. L'incidence des cancers parmi ceux-ci est variable dans les différentes séries, généralement proche de 40% (Lowe et al, 1998). De nombreux travaux ont été consacrés à la détermination de la sensibilité et de la spécificité de la TEP dans le bilan de ces nodules isolés (Rigo et al, 2001). Il a été établi une sensibilité de 94% et une spécificité de 73% de la TEP dans cette indication.

La TEP est également devenu un outil diagnostique incontournable en oncologie pour la prise en charge des patients atteints de cancers de la tête et du cou (Safa et al, 1999). Son rôle est important pour la détection d'un primitif méconnu ou pour la mise en évidence d'une

localisation secondaire. Elle aide à guider un geste biopsique sur une lésion suspecte. L'indication majeure est la détection et le bilan d'extension des récidives en terrain opéré et/ou irradié. Son rôle dans l'évaluation de l'efficacité thérapeutique (précocement après chimiothérapie ou plus tardivement après radiothérapie) rejoint l'indication pronostique qui doit permettre à l'avenir une réorientation précoce de certains patients à haut risque vers des schémas thérapeutiques mieux adaptés (Vansteenkiste et al, 2001).

L'incidence du mélanome malin a nettement augmenté au cours des dernières années. Pour être efficace, les traitements actuels des mélanomes nécessitent un diagnostique précoce et des moyens permettant un bilan d'extension initial et un suivi thérapeutique aussi précis que possible. La TEP au ^{18}F -FDG permet d'examiner, par un examen unique, l'ensemble du corps, d'où l'intérêt particulier pour cette maladie qui présente souvent des métastases précoces avec une distribution quasi aléatoire dans le corps entier (Gritters et al, 1993). Grâce à l'activité métabolique glucidique élevée des mélanomes malins, la TEP permet une bonne discrimination entre tissu tumoral et tissus normaux, ainsi qu'une résolution spatiale satisfaisante de 5 à 7 mm en utilisant une caméra dédiée. La TEP est aussi capable d'identifier des petites métastases insoupçonnées, des adénopathies et/ou des métastases au niveau des voies lymphatiques, entre la lésion primaire et le ganglion sentinelle. Comme la localisation des métastases du mélanome et la réponse au traitement chimio ou immuno-thérapeutique sont imprévisibles, la détection précoce des métastases occultes est fondamentale pour permettre leur résection chirurgicale: les patients opérables ont un meilleur pronostic que ceux qui ne sont pas traités chirurgicalement.

L'utilisation de la TEP pour la mise en évidence des sites de lymphomes (maladie de Hodgkin et lymphome non-Hodgkinienn) permet d'obtenir des résultats supérieurs à ceux obtenus grâce au gallium 67 utilisé depuis une trentaine d'année (Bar-Shalom et al, 2001). Son utilisation permet une meilleure détermination du stade de la maladie et par là même une meilleure adaptation du traitement. De plus, le caractère fonctionnel de l'exploration par la TEP permet une évaluation précoce de la réponse à la chimiothérapie, avant modification volumique des lésions cibles (Jerusalem et al, 2001).

L'intérêt de la TEP est également apprécié dans l'évaluation précoce de la réponse tumorale chez des patients souffrant de cancer du sein (Crippa et al, 1998). La fixation du ^{18}F -FDG peut être nettement diminuée ou complètement abolie, après un ou deux cycles de chimiothérapie, et ceci bien avant qu'une diminution de la masse tumorale ne soit détectée par l'imagerie conventionnelle. Certes, l'observation d'une diminution de la fixation du ^{18}F -FDG n'implique pas nécessairement une éradication complète ni même partielle des cellules tumorales, mais elle évoque l'efficacité du traitement. L'absence de réponse indique une résistance thérapeutique. La reconnaissance précoce de celle-ci devrait permettre de limiter les effets toxiques d'un traitement inutile ou de le modifier (Jerusalem et al, 2000).

L'évaluation des patients se présentant avec un carcinome colorectal récidivant ou métastatique est devenue une indication établie pour l'utilisation de la TEP au ^{18}F -FDG. En effet, de nombreuses études ont démontré son utilité pour détecter les récidives de cancers colo-rectaux (Imdahl et al, 2000). La sensibilité et la spécificité de la TEP au ^{18}F -FDG sont respectivement de 97% et 75%. La spécificité est particulièrement élevée chez les patients avec récidive locale au niveau du site post-opératoire ou avec des métastases hépatiques (> 95%). Cet examen est aussi particulièrement utile pour détecter les métastases distantes, incluant les métastases ganglionnaires abdominales, et les métastases pulmonaires (Valk et al, 1999). L'impact sur le traitement est le résultat de deux facteurs primordiaux: une détection précoce de la récidive due à la détection du changement physiologique qui précède la modification anatomique, et le fait que la TEP s'effectue sur le corps entier et détecte des métastases en des sites inattendus.

2.4 TEP et radioprotection

2.4.1 Données élémentaires concernant le ^{18}F

Parmi les différents isotopes radioactifs employés, le ^{18}F présente l'avantage d'être le plus facilement utilisable, compte-tenu de sa demi-vie comparativement plus longue. Les autres radionucléides doivent, pour pouvoir être utilisés, être produits sur les lieux même de leur utilisation, ce qui représente une contrainte pour un centre hospitalier. Les caractéristiques détaillées des principaux radioéléments utilisés en TEP sont rappelés ci-dessous.

Isotope	Période (minute)	Libre parcours moyen (mm)	$E_{\beta\text{max}}$ (keV)	Émission (%)
^{11}C	21	4,1	960	100
^{13}N	10	5,4	1200	100
^{15}O	2	8,2	1740	100
^{18}F	110	2,6	640	97

Tableau 3: Caractéristiques de principaux radioéléments utilisés en TEP

Malgré son émission β^+ , le ^{18}F fait partie d'un groupe de faible radiotoxicité (groupe IV), en raison de sa période courte comparativement aux radionucléides plus couramment utilisés en médecine nucléaire. Le tableau ci dessous compare le ^{18}F à certains d'entre eux.

Radio nucléide	Energie du rayonnement	Période radioactive	LAI ingestion (Bq)	Groupe de radiotoxicité
^{18}F	γ 511 keV	110 minutes	$2 \cdot 10^9$	4 faible
^{131}I	γ 365 keV β_{max} 606 keV	8 jours	$1 \cdot 10^6$	2 forte
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	γ 141 keV	6 heures	$3 \cdot 10^9$	4 faible

Tableau 4: Radiotoxicités comparées de différents isotopes

Le ^{18}F est un radioélément instable, présentant un excès de proton. Il se désexcite en émettant une particule β^+ et un neutrino, afin de se stabiliser sous la forme de ^{18}O . Le spectre de l'émission β^+ est continu, les caractéristiques d'émission du ^{18}F sont rappelés ci-dessous.

Type d'émission	Energie (keV)	%
e-	\forall 0,5	2,9
β^+	max 633,5 moy 249,3	96,8
γ	511	194

Tableau 5: Caractéristiques d'émission du ^{18}F

Après émission, le positon est ralenti dans la matière. En fin de parcours, il s'annihile avec un électron pour donner naissance à deux photons de 511 keV émis à 180° l'un de l'autre.

La protection doit essentiellement porter sur ces photons de dématérialisation. En effet, le rayonnement β^+ donne par freinage des photons d'énergie maximale voisine de celle des photons γ . Ainsi, l'intérêt d'utiliser des émetteurs de positons est de se retrouver confronté finalement à une énergie parfaitement connue, de 511 keV, quelque soit l'émetteur choisi.

Les règles classiques de radioprotection étant respectées (augmentation de la distance source-opérateur et limitation de la durée auprès de la source), il faut choisir le matériau qui constitue l'écran le plus efficace et déterminer l'épaisseur nécessaire pour atténuer suffisamment le rayonnement. Le tableau suivant donne les valeurs de CDA (Couche de Demi Absorption) en mm de différents matériaux pour le ^{18}F .

Radio nucléide	Energie	CDA (mm)			
		Béton	Acier	Plomb	Tungstène
^{18}F	511 keV	47	15	4,8	1,56

Tableau 6: Exemple de CDA pour le ^{18}F

L'utilisation des protège-seringues en tungstène doit être généralisée pour limiter l'exposition des extrémités des manipulateurs.

2.4.2 Radioprotection du patient

Pour le patient, l'estimation de la dose distribuée à l'organisme après l'administration de radio pharmaceutique est un nouvel enjeu pour la médecine nucléaire. En effet, les pays de la communauté européenne sont tenus de transposer dans leur droit national la directive 97/43 Euratom du 30 juin 1997, relative à la protection sanitaire des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants lors de l'exposition à des fins médicales. Cette directive découle elle-même des recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR). La CIPR retient comme hypothèse que le risque induit par les rayonnements ionisants augmente avec la dose reçue, et que toute exposition même faible peut induire des effets négatifs sur la santé à plus ou moins long terme.

L'esprit de la directive résulte des observations suivantes :

- l'irradiation médicale est la première source d'exposition artificielle aux rayonnements ionisants (1,1 mSv/an en moyenne pour 2,4 mSv d'exposition naturelle tellurique et cosmique). Elle est surtout due aux explorations diagnostiques, à la médecine nucléaire, la radiologie dentaire et aux actes thérapeutiques (radiothérapie, curiethérapie),
- la fréquence des examens irradiants a augmenté depuis quelques années,
- et des variations considérables dans les niveaux de doses délivrées pour un même type d'examen ont été relevées.

Par rapport aux investigations radiologiques anatomiques comme le scanner, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou encore l'échographie, la TEP fournit une information fonctionnelle du corps entier avec une dose d'irradiation acceptable pour le patient. D'après les recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR 53, p. 76), la dose d'irradiation pour un examen au ^{18}F -FDG correspond à une dose efficace de 15 à 20 μSv par MBq injecté (0,5 mSv/mCi), soit 2,5 à 5 mSv par examen hors transmission. Parmi les organes exposés, la vessie reçoit la plus grande part de la dose (0,16 mGy/MBq). La dose absorbée par le patient par unité d'activité administrée est indiquée dans le tableau suivant, extrait de la CIPR 80.

Organe	Adulte	15 ans	10 ans	5 ans	1 an
Paroi vésicale	160	210	280	320	590
Myocarde	62	81	120	200	350
Cerveau	28	28	30	34	48
Ovaires	15	20	30	44	82
Testicules	12	16	26	38	73
Utérus	21	26	39	55	100
Dose efficace (μSv/MBq)	19	25	37	51	95

Tableau 7: ^{18}F -FDG, dose absorbée par activité administrée (μGy/MBq)

Enfin le tableau ci-dessous compare les doses efficaces délivrées en radiologie et en médecine nucléaire pour l'adulte. Par rapport aux examens conventionnels, la dose efficace distribuée au patient est acceptable : l'importance de l'énergie manipulée (511 keV) est atténuée par la courte demi-vie du radionucléide et sa faible période biologique.

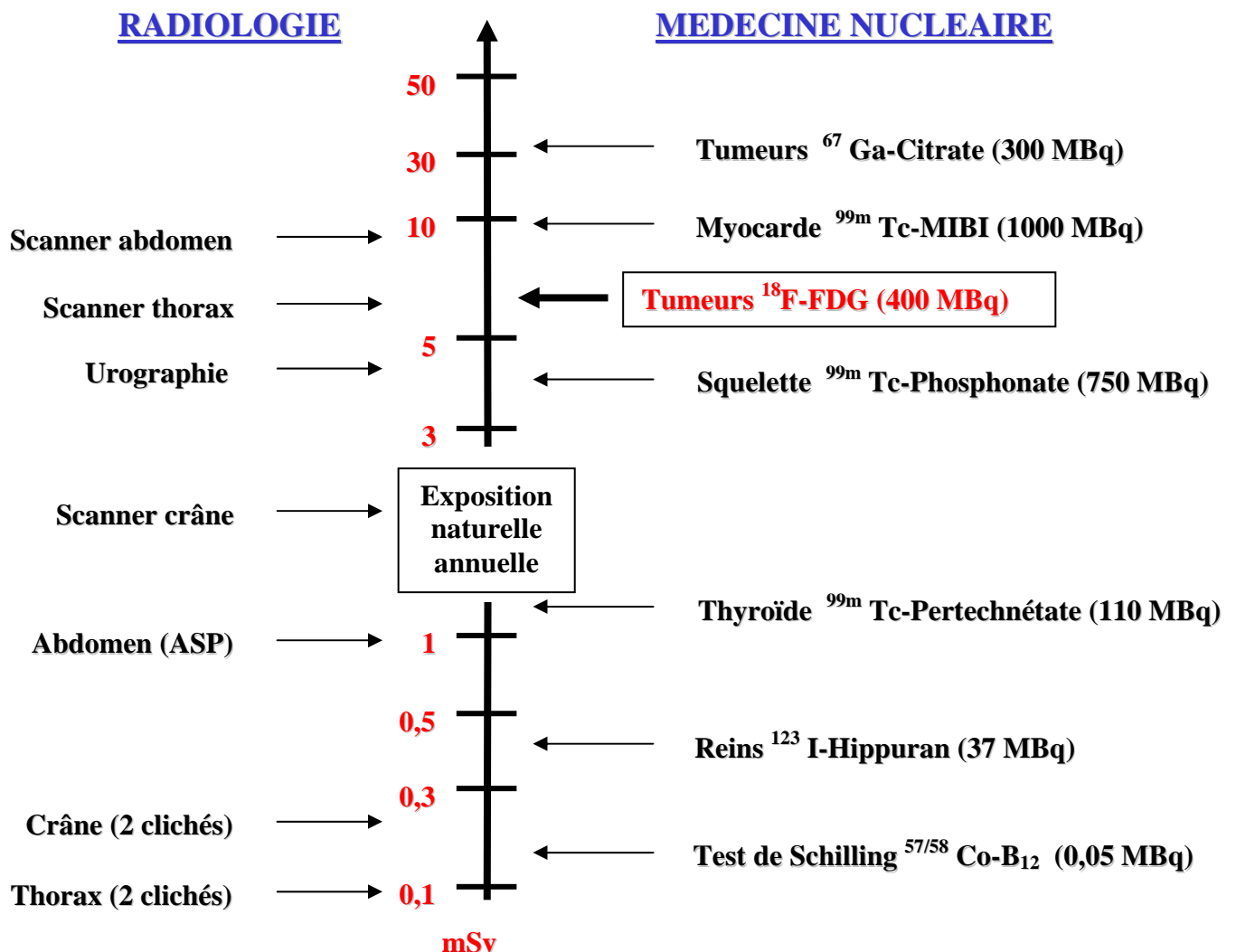


Tableau 8: Comparaison des doses délivrées en radiologie et médecine nucléaire

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 Présentation de l'étude de poste

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire du Diplôme d'Etudes Spécialisées en Médecine du Travail concerne une étude de poste dans un cadre particulier : l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en milieu médical. En effet, depuis quelques années, la surveillance du personnel exposé aux rayonnements ionisants a fait l'objet d'évolutions réglementaires importantes, imposant notamment l'enregistrement, en temps réel, de la dose susceptible d'être reçue par tout travailleur en zone contrôlée.

Le but de l'expérimentation était d'évaluer l'importance, pour le personnel, des expositions liées aux différentes techniques de radiodiagnostic, et d'apprécier les doses efficaces reçues par le personnel à l'aide de dosimètres opérationnels. La Tomographie par Emission de Positons (TEP) a particulièrement été étudiée, compte-tenu de son installation récente dans le service et du peu de données disponibles dans ce domaine. Enfin l'efficacité des mesures d'aménagement du poste de travail des techniciens et manipulateurs (et surtout celui d'une manipulatrice enceinte) a pu être appréciée.

Le tomographe à émission de positon du service est constitué d'un ensemble de six détecteurs rectangulaires curvilignes de NaI(Tl) positionnés en anneau autour du patient. L'épaisseur des cristaux de 2,5 cm permet d'optimiser l'efficacité de détection. Les événements provenant de l'extérieur sont atténués par deux disques de plomb à chaque extrémité de la couronne de détection. Les acquisitions de transmission sont réalisées au moyen d'une source ponctuelle de ^{37}Cs qui tourne autour du patient pendant les phases d'acquisitions de données.

Rappelons que pour cette étude, les nouvelles limites d'exposition suivantes ont été retenues:

- 20 mSv par an pour le personnel de catégorie A concernant l'organisme entier,
- 6 mSv par an pour le personnel de catégorie B,
- dans le cas de la femme enceinte, 1 mSv pour l'enfant à naître, dose reçue entre la déclaration de la grossesse et l'accouchement.

3.2 Matériel d'instrumentation

Des dosimètres électroniques individuels DMC 2000-S fabriqués par la société *MGP Instruments* ont été utilisés pour cette étude. Ils répondent à toutes les exigences de la dosimétrie active, fixées par l'arrêté du 23 mars 1999.

L'élément détecteur est une diode silicium, l'électronique intégrée est de type ASIC. Les valeurs de la dose peuvent être relevées soit directement, soit avec un lecteur associé ; l'historique est enregistré sur un logiciel dédié *EEPROM*.

La grandeur mesurée est l'équivalent de dose en profondeur $H_{p(10)}$, estimateur de la dose efficace organisme entier. La réponse en énergie des photons gamma de 50 keV à 6 MeV est adaptée aux énergies des radionucléides utilisés dans un service de médecine nucléaire. La gamme de dose enregistrable s'étale de 1 μSv à 10 Sv. La précision de la mesure est de +/- 10% en dessous de 1 Sv/h. Le débit de dose est également disponible avec une sensibilité de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$.

Le port de cet appareil au niveau de la poitrine est facilité par ses dimensions réduites (84 x 84 x 17,5 mm) et sa faible masse (70 g), quel que soit le poste de travail envisagé. Le dosimètre ne gêne pas le personnel dans l'exécution de son travail.

Chaque membre du service surveillé dans le cadre de l'étude portait, durant les heures de travail:

- le film dosimètre classique dans le cadre de la surveillance passive de l'exposition aux rayonnements ionisants,
- le dosimètre électronique DMC 2000-S intégrant et cumulant les doses reçues au fur et à mesure du déroulement des examens radiologiques. Les doses enregistrées étaient relevées quotidiennement.

3.3 *Déroulement de l'expérimentation*

L'étude visait à préciser le niveau de l'exposition pour plusieurs catégories de personnel et dans divers postes de travail.

3.3.1 Personnel surveillé

- Les manipulateurs pour l'ensemble des étapes techniques : préparation des produits radio-pharmaceutiques, mise en place des patients, injection des molécules et des produits marqués, surveillance du bon déroulement de l'examen, gestion des déchets radioactifs. Deux manipulateurs ont été suivis, respectivement sur une période de deux et cinq mois. Les doses quotidiennes ont été enregistrées ainsi que les débits de dose relatifs à des manipulations particulières sur le poste TEP.
- Une manipulatrice enceinte: afin de réduire au maximum son exposition, son travail s'est limité à la surveillance des examens dans les salles techniques équipées de paravents plombés. Elle a été surveillée pendant deux mois.
- L'infirmier qui effectue l'ensemble des injections pratiquées pour la réalisation des scintigraphies myocardiques a été surveillé pendant 17 jours.
- Un médecin qui participe aux examens a été surveillé durant 11 jours.
- Le personnel du secrétariat a également été surveillé. Bien que ne participant pas directement aux gestes techniques réalisés dans le service, ce personnel, composé de deux jeunes femmes, est fréquemment au contact des patients après l'injection du radio-pharmaceutique : la salle d'attente après injection est à proximité immédiate du secrétariat.

3.3.2 Postes de travail étudiés

- Injection (**Pi**) : à ce poste sont préparés (sauf pour la TEP) et injectés (sauf pour la TEP et la scintigraphie myocardique) les radio-pharmaceutiques : ^{99m}Tc (activité de 220 à 1110 MBq par examen), ^{131}I (110 à 185 MBq par examen thyroïdien) et ^{201}Tl (185 MBq par scintigraphie cérébrale).
- Scintigraphies myocardiques (**P1**) : à ce poste un infirmier effectue l'injection lors des examens d'effort et de repos.
- Poste de positionnement et de surveillance des examens réalisés sur la caméra à double tête ou sur la caméra à simple tête (**P2**).
- Poste d'aide à l'injection (**P3**) pour l'aide du manipulateur Pi.
- Poste de positionnement et de surveillance des scintigraphies myocardiques (**P4**).
- Tomographie par émission de positons (**TEP**): à ce poste sont réalisés l'injection de ^{18}F -fluoro-désoxy-D-glucose (^{18}F -FDG), le positionnement du patient et la surveillance de l'examen. Les activités manipulées pendant l'étude sont de l'ordre de 150 MBq (4 mCi). Ce poste de travail revêt un intérêt particulier du fait de l'énergie des photons émis (511 keV) qui leur donne un caractère plus pénétrant que ceux du ^{99m}Tc (140 keV), plus couramment utilisé dans un service de médecine nucléaire. Lors de l'installation de la caméra TEP, en 1999, de nombreux aménagements ont été effectués : acquisition d'une cellule blindée avec 5 cm de plomb pour la préparation avant injection, d'un protège seringue en tungstène, et blindage du poste de pilotage par 5 mm de plomb.

4 RESULTATS

4.1 Distribution de la dose par catégorie de personnel

Les doses distribuées aux différentes catégories de personnel du service de médecine nucléaire, enregistrées par les dosimètres opérationnels, sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Personnel surveillé	Durée de surveillance	Dose cumulée (μSv)	Dose efficace/ mois ($\mu\text{Sv}/\text{mois}$)
Manipulateur 1	100 jours	1000	200
Manipulateur 2	40 jours	490	245
Manipulatrice enceinte	40 jours	30	15
Infirmier	17 jours	80	94
Médecin	11 jours	20	36
Secrétaire	100 jours	30	6

Tableau 9: Résultats de la dosimétrie opérationnelle individuelle

Lorsque la surveillance a duré moins d'un mois, la moyenne mensuelle a été extrapolée pour un mois comprenant 20 jours de travail.

4.2 Distribution de la dose par poste de travail

Les résultats mesurés pour chaque poste de travail sont représentés dans le graphique ci-dessous. Ils expriment la dose moyenne quotidienne en μSv .

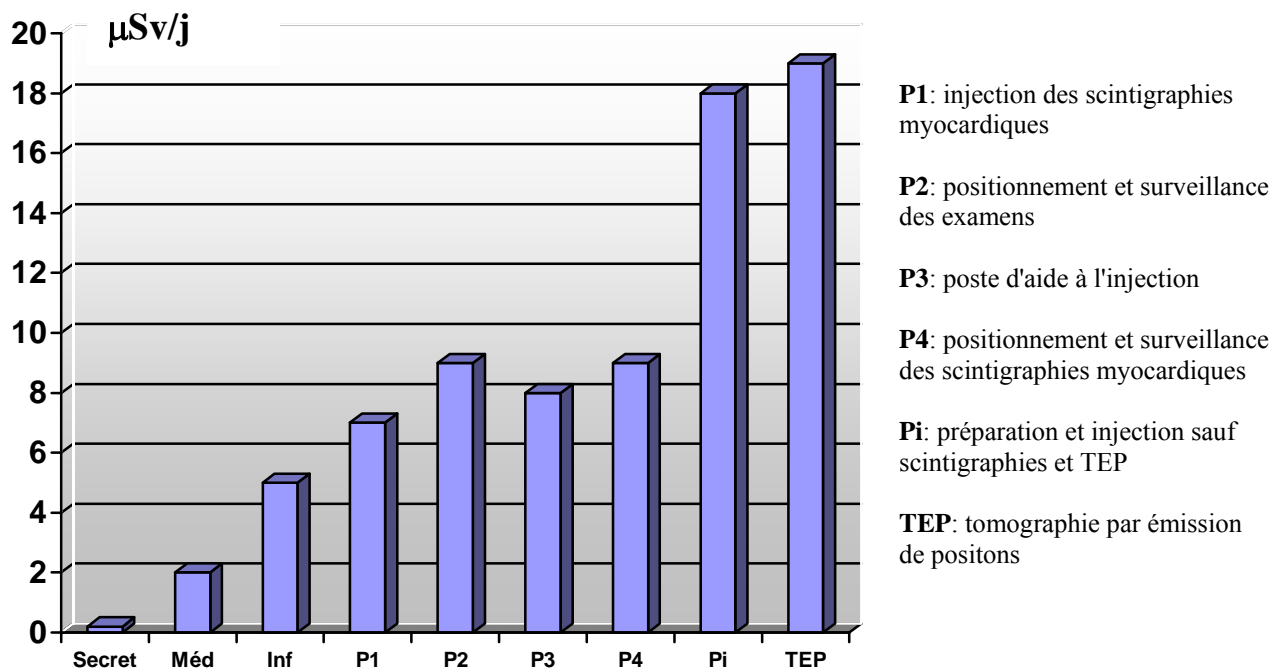


Figure 6: Résultats de la dosimétrie par poste de travail ($\mu\text{Sv}/\text{j}$)

5 Analyse et discussion

5.1 Distribution de la dose par catégorie de personnel

Le seuil de mesure des films dosimètres (200 μSv) ne leur a pas permis d'être contributifs dans cette étude. Toutes les doses affichées sont celles relevées par les dosimètres opérationnels.

La surveillance par catégorie de personnel met en évidence une exposition non négligeable du personnel manipulateur, respectivement de 200 et 245 $\mu\text{Sv}/\text{mois}$. Les manipulateurs ont ici été étudiés sans discriminer leur activité au profit de tel ou tel poste de travail. Les doses enregistrées reflètent la moyenne reçue au cours de leur activité au sein du service. Compte-tenu de leurs tâches, ce résultat n'est pas surprenant.

L'aménagement du poste de travail de la manipulatrice enceinte se révèle efficace car la moyenne mensuelle de l'exposition, établie sur 2 mois, n'est que de 15 μSv . L'infirmier qui pratique les injections lors des scintigraphies myocardiques est, lui aussi, l'objet d'une exposition significative: 94 $\mu\text{Sv}/\text{mois}$. Les expositions concernant les autres catégories de personnel sont nettement plus faibles : 36 $\mu\text{Sv}/\text{mois}$ pour le médecin du service et 6 $\mu\text{Sv}/\text{mois}$ pour la secrétaire, valeur de l'ordre de grandeur du bruit de fond dû à la radioactivité naturelle.

5.2 Distribution de la dose par poste de travail

L'analyse des résultats par poste de travail permet de distinguer deux postes significativement plus irradiants :

- le poste de préparation et d'injection des traceurs radioactifs **Pi**, pour lequel les niveaux de dose élevés n'ont rien de surprenant compte-tenu de l'importance des activités manipulées,
- le poste du technicien affecté à l'utilisation et à la mise en œuvre du tomographe par émission de positons **TEP**. Il reçoit une dose journalière relativement importante compte tenu du faible nombre d'examens pratiqués quotidiennement (en moyenne quatre par jour).

Depuis la réalisation de cette étude, la fréquence quotidienne des examens TEP dans le service a été doublée, et la caméra TEP a été remplacée. Les nouvelles activités utilisées (300 à 400 MBq) sont deux fois plus importantes qu'au moment de la réalisation de cette étude. Une vigilance particulière s'impose donc quant à la surveillance du personnel exposé.

5.3 Doses mesurées et limites d'exposition professionnelle annuelle

5.3.1 Comparaison par catégorie de personnel

Les résultats mensuels produits dans le tableau 9 peuvent être rapportés à l'année de manière à comparer les expositions de chaque catégorie de personnel aux nouvelles limites réglementaires annuelles autorisées des personnels classés en catégorie A.

Personnel surveillé	Dose moyenne sur 12 mois (mSv)	Fraction de la limite annuelle catégorie A (20 mSv)
Manipulateur 1	2.4	12 %
Manipulateur 2	2.94	14.7 %
Infirmier	1.13	5.65 %
Médecin	0.43	2.15 %
Secrétaire	0.07	0.36 %

Tableau 10 : Doses annuelles et limites réglementaires d'exposition

Les niveaux d'exposition sont systématiquement inférieurs aux limites annuelles d'exposition de la catégorie A (20 mSv), mais également de la catégorie B (6 mSv). Les manipulateurs sont les plus exposés en recevant en moyenne, pour 12 mois d'exposition, 13% de la limite annuelle de la catégorie A, et 43% de la dose limite en catégorie B.

Cependant, compte tenu de la réalisation de certaines procédures irradiantes (injection et TEP), la classement en catégorie A des manipulateurs et de l'infirmier affecté aux scintigraphies myocardiques se justifie pleinement. Le reste du service peut être classé en catégorie B.

La mise en place de la dosimétrie opérationnelle est conditionnée par le zonage radiologique au sein du service : elle est obligatoire pour tout travail en zone contrôlée et s'impose à tout individu, quelle que soit son exposition mensuelle potentielle. Pour ne pas abuser de la surveillance dosimétrique opérationnelle, le zonage devra être scrupuleusement défini en fonction du risque radiologique au plus près de l'origine des rayonnements.

Pour le cas de la manipulatrice enceinte, la comparaison est plus délicate, car la limite envisagée par la nouvelle réglementation concerne l'enfant à naître alors que la dose mesurée concerne sa mère. Il est malaisé de définir précisément un rapport dose enfant/dose mère. Pour le personnel des services de médecine nucléaire, la publication CIPR 84 précise qu'il est "improbable que les doses fœtales dépassent 25% de la dose lue sur le dosimètre individuel". Ce pourcentage surestime les doses calculées puisque l'aménagement du poste de travail a été conduit de manière à exclure la manipulatrice enceinte de la TEP où le rayonnement de 511 keV est le plus pénétrant. Dans cette hypothèse, et pour un calcul établi sur 9 mois d'exposition, l'enfant à naître reçoit 34 μ Sv, soit moins de 3,4 % de la limite qui a été définie à son intention.

5.3.2 Comparaison par poste de travail

Le tableau ci-dessous présente une projection visant à établir la dose qui serait reçue par un manipulateur affecté toute l'année (240 jours ouvrables) au même poste de travail.

Poste	Dose journalière (μ Sv/j)	Dose annuelle (mSv/an)	Fraction de la limite annuelle catégorie A (20 mSv)
P1	7	1.7	8.5 %
P2	9	2.2	11 %
P3	8	1.9	9.5 %
P4	9	2.2	11 %
Pi	18	4.3	21.6 %
TEP x 4/j	19	4.5	22.8 %
TEP x 8/j	38	9	45 %

Tableau 11: Projection des doses annuelles par poste de travail TEP

Les résultats mettent en évidence que le poste TEP est bien potentiellement plus irradiant, bien que la dose annuelle estimée reste significativement inférieure aux limites de doses autorisées. La dose annuelle reçue à ce poste serait en effet de 4,5 mSv dans les conditions où les mesures ont été faites, et de 9 mSv (soit 45% de la limite réglementaire annuelle pour la catégorie A) dans l'hypothèse d'un passage de quatre à huit examens par jour. C'est ce

qu'illustre le graphique suivant, où sont représentées les projections des doses annuelles par poste de travail, comparées à la limite d'exposition de la catégorie A (fraction). Les résultats de l'année 2002 sont calculés avec les nouvelles activités utilisées dans le service depuis l'arrivée d'un nouveau tomographe par émission de positons.

% limite catégorie A

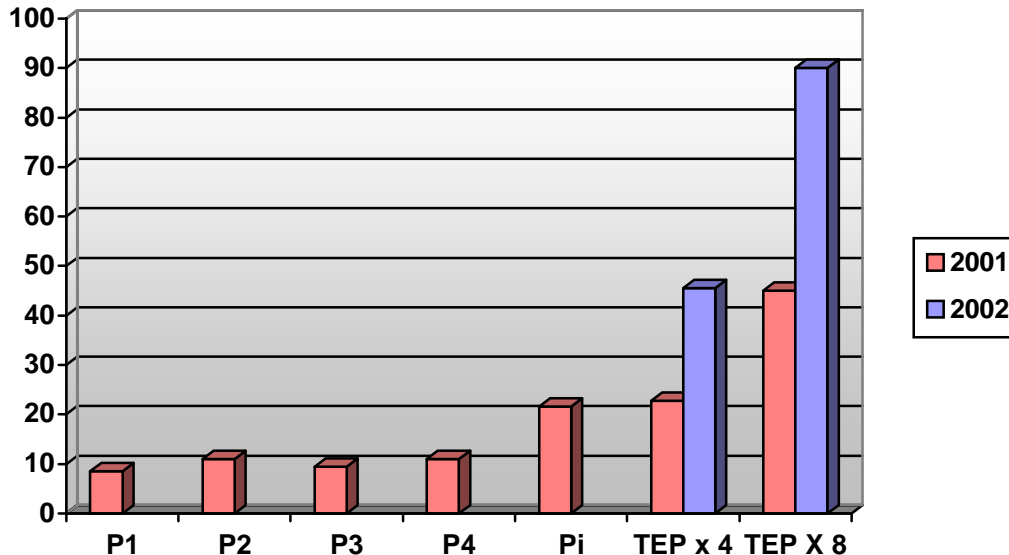


Figure 7: Comparaison des doses annuelles par poste de travail à la limite catégorie A

L'évolution technologique en TEP va permettre, grâce aux nouveaux scintillateurs, de réduire de moitié la durée d'un examen, mais au prix d'une activité injectée plus importante. C'est le cas dans le service actuellement, avec des activités utilisées deux fois plus importantes qu'auparavant. Si l'on multiplie par deux les doses reçues, les valeurs s'approchent de la nouvelle limite réglementaire. Ceci pour UN SEUL technicien réalisant 8 examens par jour, 20 jours par mois, pendant 12 mois: l'enveloppe de dose est donc largement majorée.

En pratique, une organisation judicieuse au sein du service assure la rotation du personnel aux différents postes de travail. Ceci permet de répartir équitablement l'exposition et de maintenir les doses individuelles moyennes en dessous des valeurs théoriques calculées.

A partir de la dose moyenne quotidienne du poste TEP, il est possible de déterminer une dose moyenne par examen. Celle ci est de **4,7 μ Sv** pour le technicien du service qui effectue la préparation de la molécule marquée et son injection au patient, avant de surveiller le bon déroulement de l'examen TEP.

5.4 Comparaison avec les données de la littérature

5.4.1 Exposition du personnel par examen TEP

Chiesa (Chiesa et al, 1997) fournit dans son étude la dosimétrie thorax du personnel lors de la réalisation d'un examen au ^{18}F -FDG. Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un dosimètre Stephen 6000 (*Morgan Nuclear Safety Product*). L'activité moyenne injectée est de 370 MBq. La phase de transmission s'effectue par scanner X. Les résultats obtenus figurent dans le tableau suivant.

Phase de l'examen TEP	Exposition (μSv)
Acquisition de transmission	$2,9 \pm 0,3$
Préparation de la seringue	$0,3 \pm 0,1$
Injection et accompagnement du patient	$2,8 \pm 1,8$
Examen corps entier TEP	$1,7 \pm 1,5$
Départ du patient	$0,8 \pm 0,2$
Dose total par examen	$5,9 \pm 1,2$

Tableau 12: Chiesa, exposition du personnel par examen TEP

Les deux phases critiques sur le plan dosimétrique sont la période d'acquisition de transmission et la phase de réalisation réelle de l'examen (acquisition des données après injection).

Laffont (Laffont et al, 2001) présente également l'étude dosimétrique du manipulateur qui prépare le produit, l'injecte et surveille le bon déroulement de l'examen TEP. Le matériel est une gamma-caméra "Positrace" (*SMVi-GEMS*) dédiée à l'émission de positons. L'activité moyenne injectée est de 300 MBq, la transmission s'effectue par scanner X. La dosimétrie du personnel est réalisée par dosimètre électronique MGP. Les résultats obtenus figurent dans le tableau suivant. La phase d'acquisition de transmission n'est pas détaillée.

Phase de l'examen TEP	Exposition (μSv)
Préparation de la seringue	$2,3 \pm 1,3$
Injection	$5 \pm 3,4$
Installation et examen corps entier TEP	$2,8 \pm 1,5$
Départ du patient	$1,3 \pm 0,8$
Dose total par examen	$12 \pm 3,7$

Tableau 13: Laffont, exposition du personnel par examen TEP

Ici également, les deux phases critiques sur le plan dosimétrique sont la période d'acquisition de transmission et la phase de réalisation réelle de l'examen.

5.4.2 Dosimétrie des extrémités du personnel par examen TEP

Laffont (Laffont et al, 2001) a également réalisé une étude dosimétrique des extrémités du personnel par examen TEP, à l'aide de dosimètres thermoluminescents LiF. Les conditions de travail sont précédemment décrites; les résultats obtenus figurent dans le tableau suivant.

Endroit de la mesure	Exposition (μSv)
Pouce droit	379 ± 207
Pouce gauche	640 ± 195
Index droit	500 ± 177
Index gauche	740 ± 291
Dose thorax	$15,7 \pm 3,9$

Tableau 14: Laffont, dosimétrie des extrémités du personnel TEP

La projection des doses annuelles pour le technicien donne 710 mSv par an à l'index gauche pour 4 examens réalisés quotidiennement, une dose supérieure à la limite annuelle autorisée (500 mSv par an).

Les doses mesurées permettent d'avoir une notion de l'exposition dans les conditions de travail habituelles dans le service, et permettent de déterminer le nombre de manipulateurs nécessaires à ce poste pour ne pas atteindre la limite de dose tolérée pour les extrémités.

Dans la mesure du possible, le personnel infirmier ou manipulateur doit essayer de développer une dextérité équivalente main droite - main gauche de façon à répartir la dose aux extrémités. Enfin ces mesures soulignent l'intérêt de l'utilisation du protège seringue dédié hautes énergies, de préférence en tungstène.

5.4.3 Exposition du personnel par le patient

Laffont (Laffont et al, 2001) a également étudié l'exposition du personnel par un patient pendant les différentes phases de réalisation d'un examen TEP. Les mesures ont été réalisées à 50 cm et 100 cm du patient, centrées sur l'abdomen, à l'aide d'une Babyline 81. Trente sept patients ont été étudiés aux différents temps de l'examen. Les mesures relevées figurent dans le tableau suivant.

Phase de l'examen TEP	Débit de dose à 50 cm ($\mu\text{Sv/h/MBq}$)	Débit de dose à 100 cm ($\mu\text{Sv/h/MBq}$)
Immédiatement après injection	$0,21 \pm 0,04$	$0,10 \pm 0,02$
Installation du patient	$0,13 \pm 0,025$	$0,06 \pm 0,008$
Fin de l'examen TEP	$0,07 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,006$
Départ du patient	$0,06 \pm 0,012$	$0,03 \pm 0,006$

Tableau 15: Laffont, exposition du personnel par le patient

A l'examen de ces résultats, les doses obtenues peuvent être considérées comme négligeables dans le bilan de l'exposition du personnel.

5.5 Récapitulatif

Le tableau suivant récapitule les résultats des principales études sur les doses efficaces reçues par le personnel réalisant les différentes phases d'examen TEP, de la préparation de la seringue contenant la molécule marquée jusqu'à l'accompagnement du patient en salle d'attente avant son départ du service.

Dose efficace au technicien par examen TEP	
Etude SPRA Val-de-Grâce 2001 (¹⁸ F-FDG 150 MBq)	4,7 μSv
Etude Laffont 2000 (¹⁸ F-FDG 300 MBq)	12 \pm 3,7 μSv
Etude Chiesa 1997 (¹⁸ F-FDG 370 MBq)	5,9 \pm 1,2 μSv

Tableau 16: Synthèse des mesures de dose efficace au technicien par examen TEP

Les différents résultats sont comparables. Le principal facteur de variabilité entre les mesures réalisées par les différentes équipes provient certainement du mode d'organisation interne au sein de chaque service. Le facteur temps joue un rôle fondamental dans la protection radiologique du personnel, et le moindre élément majorant la présence du manipulateur à proximité immédiate du patient, une fois la molécule marquée injectée, est péjoratif pour la dose efficace du technicien.

La dose annuelle reçue au poste TEP par un technicien qui y serait affecté toute l'année pourrait varier entre 4,5 et 9 mSv dans les conditions où les mesures ont été réalisées (nombre d'examens réalisés, activité manipulée).

L'augmentation du nombre d'examens de tomographie et l'arrivée de nouvelles machines impliquant l'injection d'activités supérieures à celles utilisées pendant cette étude, devraient se traduire par des niveaux d'exposition encore plus élevés, proches des nouvelles limites d'exposition professionnelles. L'importance de l'utilisation de la dosimétrie opérationnelle dans les services de médecine nucléaire est soulignée, ainsi que celle des études des postes exposés, principalement ceux de la tomographie par émission de positons.

6 SYNTHÈSE ET CONCLUSION

L'utilisation de dosimètres opérationnels au sein d'un service de médecine nucléaire a présenté des intérêts de diverses natures. Elle a permis d'évaluer en temps réel l'exposition relative aux différents postes de travail du service.

Cette surveillance a attiré l'attention sur la TEP, technique très performante mais qui nécessite une vigilance particulière du fait du caractère pénétrant des rayonnements utilisés et des activités injectées, mais aussi à cause du développement prévu de cette technique dans le service (doublement de la fréquence des examens réalisés, et augmentation des activités injectées).

La surveillance dosimétrique a été menée pendant six mois. Les personnels les plus exposés sont les manipulateurs (2,4 et 2,94 mSv/an) et l'infirmier affecté aux scintigraphies myocardiques (1,13 mSv/an). L'exposition des autres catégories professionnelles est plus faible: médecin nucléaire (0,43 mSv/an) et secrétaire (0,07 mSv/an). Les postes de travail les plus irradiants pour les manipulateurs sont la préparation et l'injection des radiopharmaceutiques (18 μ Sv/jour) et la réalisation des examens de tomographie par émission de positons (19 μ Sv/jour). La dose annuelle reçue au poste TEP par un technicien qui y serait affecté toute l'année pourrait varier entre 4,5 et 9 mSv dans les conditions où les mesures ont été réalisées (nombre d'examens réalisés, activité manipulée). **Le classement en catégorie A pour les manipulateurs et l'infirmier se justifie pleinement.** La présentation de cette étude et de ses principales conclusions a fait l'objet d'un article publié en 2003 dans la revue *Médecine et Armées* (De Dreuille et al, 2002).

Les niveaux de dose mesurés au sein du service de Médecine Nucléaire de l'H.I.A. du Val de Grâce sont éloignés des nouvelles limites annuelles professionnelles fixées par la directive européenne 96/29, sans toutefois être négligeables. Sans une organisation rigoureuse au sein du service de médecine nucléaire, et une rotation équilibrée du personnel entre les différents postes de travail, les doses efficaces distribuées pourraient atteindre, dans certaines circonstances, les limites réglementaires autorisées.

Il a été possible de vérifier l'efficacité des mesures adoptées pour aménager le poste de travail de la manipulatrice enceinte, qui a donc pu continuer en toute sérénité à exercer son activité professionnelle.

Ces mesures participent à la démarche d'optimisation des conditions de travail dans un milieu exposant aux rayonnements ionisants. Cette démarche permet de limiter l'exposition du personnel, qui est l'un des principes de base de la radioprotection. Il faut également noter que cette étude dosimétrique opérationnelle a suscité un vif intérêt de la part du personnel, et qu'elle a contribué à le sensibiliser à la protection radiologique.

Les leçons à retenir de cette étude, pour la protection du personnel sont les suivantes:

- Des précautions simples et une sensibilisation du personnel permettent de conserver, parmi les manipulateurs du service, une dosimétrie annuelle en accord avec la nouvelle réglementation au niveau du thorax (20 mSv/an).
- Les règles classiques de radioprotection étant respectées (augmentation de la distance source-opérateur et limitation de la présence auprès du patient après injection), il faut choisir le matériau qui constitue l'écran le plus efficace en fonction de son utilisation et déterminer l'épaisseur nécessaire pour atténuer ou absorber le rayonnement.

- Vis-à-vis du rayonnement β^+ : le positon parcourt 1 à 3 mm dans le corps du patient avant la réaction d'annihilation. Le corps du patient fait écran, et le technicien n'est pas confronté directement au rayonnement. Dans l'air, la particule est totalement arrêtée en quelques mm: 2 mm de plexiglas ou 0,9 mm de verre suffisent.
- Le photon de 511 keV: il représente le danger principal en matière d'exposition radiologique : son énergie importante le rend très pénétrant. Heureusement, la faible demi-vie du radionucléide utilisé (110 minutes) réduit considérablement sa nocivité. Lors de la préparation de la seringue il est impératif de travailler derrière un écran plombé. Un paravent plombé mobile peut être utilisé lors de l'injection du produit.
- L'optimisation des moyens de protection (temps / distance / écran) conduit, compte-tenu des conditions d'examen et du caractère pénétrant des rayonnements, à privilégier la réduction du temps d'exposition plutôt que l'utilisation du tablier de plomb, lourd et encombrant. Après l'injection, le patient représente une source de rayonnements: il faut donc l'installer confortablement avant l'injection pour ne plus avoir à intervenir par la suite pour son confort.
- Le local le plus difficile à anticiper d'un point de vue radioprotection est la salle des patients injectés en attente ou en fin d'examen. En fonction de la fréquence des examens réalisés et de l'importance des activités injectées, le nombre de patients présents en même temps dans la salle peut engendrer un débit de dose non négligeable.
- La période d'acquisition de transmission est significative en terme de dose, il faut donc éviter de stationner dans la salle durant cette phase, tant que possible.
- Il faut rester vigilant au niveau de la dosimétrie des extrémités et utiliser absolument des protège-seringues dédiés haute énergie en tungstène.

Cette expérimentation limitée est le prélude à une mise en place en grandeur réelle d'une dosimétrie opérationnelle dans le service de médecine nucléaire de l'HIA du Val de Grâce.

Enfin, cette étude n'aborde pas l'évaluation des doses reçues par les extrémités, notamment les doigts des manipulateurs, doses qui ne sont qu'imparfaitement prises en compte par la dosimétrie photographique par bracelets. Il est donc envisagé de compléter ce travail par une surveillance des extrémités des manipulateurs, au plus près possible de la dernière phalange, grâce à l'usage de dosimètres thermoluminescents.

7 REMERCIEMENTS

L'auteur remercie chaleureusement pour leur participation active à cette étude l'équipe du service de médecine nucléaire de l'Hôpital d'Instruction des Armées du Val-de-Grâce, dirigée par le professeur Foerenbach, avec le concours précieux du physicien des hôpitaux Olivier de Dreuille, ainsi que l'équipe technique du Service de Protection Radiologique des Armées emmenée par madame Briand-Champlong.

8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Directive 96/29 EURATOM du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.

Directive 97/43 EURATOM du 30 juin 1997 relative à la protection sanitaire des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants lors d'expositions à des fins médicales.

Décret 1998-1186 du 24 décembre 1998 modifiant le décret 86-1103 du 2 octobre 1986 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.

Arrêté du 23 mars 1999 précisant les règles de la dosimétrie externe des travailleurs exposés à des travaux sous rayonnements ionisants.

Décret 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.

Décret 2003-270 du 24 mars 2003 relatif à la protection des personnes exposées à des rayonnements ionisants à des fins médicales et médico légales et modifiant le code de la santé publique.

Décret 2003-295 du 31 mars 2003 relatif aux interventions en situation d'urgence radiologique et en cas d'exposition durable et modifiant le code de la santé publique.

Décret 2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.

Bar-Shalom R, Mor M, Yefremov N, Goldsmith SJ. The value of Ga-67 scintigraphy and F-18 fluorodeoxyglucose positron emission tomography in staging and monitoring the response of lymphoma to treatment. *Semin Nucl Med* 2001 ; 31 : 177-190

Bendriem B, de Dreuille O. Détection de positons : principes et instrumentation. *RBM* 1998 ; 20 :114-122

Chiesa C, de Sanctis V, Crippa F, Schiavini M, Fraigola CE, Bogni A, Pascali C, Decise D, Marchesini R, Bombardieri E. Radiation dose to technicians per nuclear medicine procedure: comparison between technetium-99m, gallium-67, iodine-131 radiotracers and fluorine-18 fluorodeoxyglucose. *Eur J Nucl Med* 1997 ; 24 : 1380-1389

Cho ZH, Faruhki MR. Bismuth germanath as a potential scintillation detector in positron cameras. *J Nuc Med* 1997; 18:840-844

Crippa F, Agresti R, Seregni E, Greco M, Pascali C, Bogni A et al. Prospective evaluation of fluorine-18F-FDG PET in presurgical staging of the axilla in breast cancer. *J Nucl Med* 1998 ; 39:4-8

De Dreuille O, de Carbonières H, Briand-Champlong J et al. Expérience de dosimétrie opérationnelles un service de médecine nucléaire. *Médecine et Armées* 2002 ; 30:213-218

Gritters LS, Francis IR, Zasadny KR, Wahl RL. initial assessment of PET using 2-fluorine-18-fluoro-2-deoxy-D-glucose in the imaging of malignant melanoma. *J Nucl Med* 1993 ; 34 : 1420-1427

- Jerusalem G, Beguin Y, Fassotte MF et al. Evaluation thérapeutique précoce par TEP. *Med Hyg* 2000 ; 58 : 1629-1632
- Jerusalem G, Beguin Y, Fassotte MF, Najjar F, Paulus P, Rigo P and Fillet G. Whole-body positron emission tomography using ^{18}F -FDG compared to standard procedures for staging patients with Hodgkin's disease. *Haematologica* 2001; 86: 266-273
- Imdahl A, Reinhardt MJ, Nitzsche EU et al. Impact of ^{18}F -FDG positron emission tomography for decision making in colorectal cancer recurrences. *Arch Surg* 2000 ; 385 (2) : 129-134
- Lassen U, Daugaard G, Eigtved A et al. ^{18}F -FDG whole body positron emission tomography in patient with unknown primary tumors. *Eur J Cancer* 1999 ; 35 : 1076-1082
- Laffont S, Devillers A, Garin E, Chaori E, Defain P, Huitorel JM, Herry JY, Bourguet P. Contraintes de radioprotection et dosimétrie patient et personnel d'une unité de TEP. *Médecine nucléaire- Imagerie fonctionnelle et métabolique* 2001 ; 25: 395-400
- Lowe VJ, Naunheim KS. Positron Emission Tomography in lung cancer. *Ann Thorac Surg* 1998; 65: 821-829
- Merlet P, N'Guyen Ch, Elbaz N, Le Guludec D, Delforge J, Frouin V, Syrota A. Tomographie par émission de positons au ^{18}F -FDG en cardiologie. *Médecine nucléaire- Imagerie fonctionnelle et métabolique* 2001 ; 25: 715-722
- Rigo P, Bury Th. Rôle de la TEP au ^{18}F -FDG dans la prise en charge du cancer pulmonaire non à petite cellules : analyse coût-efficacité. *Médecine nucléaire- Imagerie fonctionnelle et métabolique* 2001 ; 25: 361-366
- Rigo P, Paulus P, Kaschten BJ, Hustinx R, Bury T, Foidart-Willems J. Oncological applications of positron emission tomography with fluorine- ^{18}F -fluoro-deoxy-D-glucose. *Eur J Nucl Med* 1996 ; 23 : 1641-1674
- Safa AA, Tran LM, Rege S et al. The role of positron emission tomography in occult primary head and neck cancers. *Can J Sci Am* 1999 ; 5 : 214-218
- Valk PE, Ponds TR, Tesar RD, Hopkins DM, Haseman MK. Cost-effectiveness of PET imaging in clinical oncology. *Nucl Med Biol* 1996; 23:737-747
- Valk PE, Abella-Columna E, Haseman MK et al. Whole-body PET imaging with with ^{18}F -fluoro-2-desoxy-D-glucose in management of recurrent colorectal cancer. *Arch Surg* 1999; 134: 503-511
- Vansteenkiste JF, Stroobants SG. The role of positron emission tomography with ^{18}F -fluoro-2-desoxy-D-glucose in respiratory oncology. *Eur Resp J* 2001; 17:802-820

RESUME:

Depuis trois ans, la surveillance du personnel exposé aux rayonnements ionisants a fait l'objet d'évolutions réglementaires importantes, imposant notamment l'enregistrement individuel, en temps réel, de la dose. Dans le cadre de la mise en place de la dosimétrie opérationnelle en milieu médical, une étude a été menée en collaboration entre le Service de Protection Radiologique des Armées et le Service de Médecine Nucléaire du Val-de-Grâce. Le but de l'expérimentation était d'évaluer, pour le personnel du service, l'importance des expositions liées aux différentes techniques de radiodiagnostic et d'apprécier l'efficacité des mesures d'aménagement du poste de travail des techniciens et manipulateurs.

La Tomographie par Emission de Positons (TEP) a particulièrement été étudiée. Cette technique très performante nécessite une vigilance particulière du fait du caractère pénétrant des rayonnements utilisés et des activités injectées. La TEP est une technique d'imagerie basée sur l'utilisation de molécules biologiques marquées par des radio-éléments émetteurs β^+ , qui permet d'explorer le fonctionnement et le métabolisme du corps humain. Elle est particulièrement utile en cancérologie pour compléter le bilan primaire d'un cancer ou évaluer l'extension tumorale à distance du foyer primaire. La technique de la TEP est basée sur la détection des rayonnements gamma d'annihilation, consécutifs de la désexcitation d'émetteurs de positons introduits dans des ligands naturels. L'énergie des photons est de 511 keV, nettement supérieure aux énergies classiques rencontrées habituellement en médecine nucléaire. Le fluoro-désoxyglucose marqué au Fluor-18, ou ^{18}F -FDG, est actuellement le traceur émetteur de positons le plus utilisé.

La surveillance dosimétrique a été menée pendant six mois (dosimètres électroniques individuels DMC 2000-S). Les personnels les plus exposés sont les manipulateurs (2,4 et 2,94 mSv/an) et l'infirmier (1,13 mSv/an). L'exposition des autres catégories professionnelles est plus faible: médecin nucléaire (0,43 mSv/an) et secrétaire (0,07 mSv/an). Les postes de travail les plus irradiants pour les manipulateurs sont la préparation et l'injection des radio pharmaceutiques (18 $\mu\text{Sv}/\text{jour}$) et la réalisation des examens de tomographie par émission de positons (19 $\mu\text{Sv}/\text{jour}$). La dose annuelle reçue au poste TEP par un technicien qui y serait affecté toute l'année pourrait varier entre 4,5 et 9 mSv dans les conditions où les mesures ont été réalisées (nombre d'examens réalisés, activités manipulées).

Cette expérience de dosimétrie opérationnelle a permis d'évaluer en temps réel l'exposition relative aux différents postes de travail du service de médecine nucléaire. Elle a mis en évidence des niveaux d'exposition inférieurs aux limites légales, sans toutefois être négligeables pour certains postes de travail bien identifiés. Le classement en catégorie A pour les manipulateurs et l'infirmier se justifie pleinement. Sans une organisation rigoureuse au sein du service de médecine nucléaire, et une rotation équilibrée du personnel entre les différents postes de travail, les doses efficaces mesurées pourraient flirter, dans certaines circonstances, avec les futures limites d'exposition professionnelle (20 mSv sur 12 mois consécutifs). Ceci souligne l'intérêt de la dosimétrie opérationnelle dans les services de médecine nucléaire.

MOTS-CLES:

Dosimétrie opérationnelle, Radioprotection, Médecine nucléaire, ^{18}F -FDG, Tomographie par Emission de Positons (TEP).
