



ELSEVIER
MASSON



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com

Médecine Nucléaire 37 (2013) 561–566

Médecine
Nucléaire
Imagerie Fonctionnelle et Métabolique

Mise au point

TEP/IRM hybride en neuro-imagerie

Hybrid PET/MRI in neuro-imaging

V. Garibotto^{a,*}, C. Tabouret-Viaud^a, O. Rager^a, S. Vulliemoz^b, B. Delattre^c,
S. Haller^a, M. Wissmeyer^a, M. Seeck^b, K.O. Lovblad^a, H. Zaidi^a, G. Gold^d,
O. Ratib^a, D. Zekry^d, M.I. Vargas^a

^a Service de médecine nucléaire et imagerie moléculaire, département d'imagerie et des sciences de l'information médicale, hôpitaux universitaires de Genève, rue Gabrielle-Perret-Gentil 4, 1211 Genève, Suisse

^b Unité d'EEG et d'exploration de l'épilepsie, département de neurosciences cliniques, hôpitaux universitaires de Genève, Suisse
^c Philips healthcare AG, Zurich, Suisse

^d Département de médecine interne, de réhabilitation et de gériatrie, hôpitaux universitaires de Genève, Suisse

Reçu le 3 septembre 2013 ; accepté le 12 septembre 2013

Disponible sur Internet le 23 octobre 2013

Résumé

L'imagerie hybride par tomographie par émission de positons/imagerie par résonance magnétique (TEP/IRM) est une nouvelle modalité qui combine les informations moléculaires et métaboliques fournies par la TEP avec les données morphologiques et fonctionnelles fournies par l'IRM. Les tomographes TEP/IRM ont été conçus en analogie avec la technologie de TEP/tomodensitométrie (TEP/TDM) couramment utilisée, avec toutefois des caractéristiques spécifiques liées aux différences intrinsèques de l'imagerie IRM et TDM. Dans le domaine de la neuro-imagerie, l'IRM fournit un panel d'informations beaucoup plus vaste que la TDM. De plus, l'IRM est déjà systématiquement réalisée en neuro-imagerie et fusionnée à l'imagerie TEP, à l'aide de logiciels spécifiques, à des fins diagnostiques et de recherche. Nous résumons ici notre expérience avec le premier tomographe intégré TEP/IRM installé en Suisse, principalement dans trois domaines d'application : la caractérisation des tumeurs cérébrales, le diagnostic précoce et différentiel des démences neurodégénératives et le bilan préopératoire de l'épilepsie pharmaco-résistante. Avec ce tomographe séquentiel, nous avons pu combiner les séquences diagnostiques IRM (y compris l'imagerie du tenseur de diffusion, la tractographie, la spectroscopie et l'IRM fonctionnelle) avec l'imagerie TEP du métabolisme glucidique (par ¹⁸F-Fluorodéoxyglucose–¹⁸F-FDG) ou du transport des acides aminés (par ¹⁸F-Fluoroéthyltyrosine–¹⁸F-FET). Nous résumons ici les principaux résultats obtenus dans le domaine de la neuro-imagerie par les différentes équipes travaillant avec ces nouveaux tomographes intégrés. L'ensemble de ces données montre que la TEP/IRM, réalisée en une session unique, peut représenter la modalité de choix pour la neuro-imagerie.

© 2013 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : TEP/IRM ; Neuro-imagerie ; Épilepsie ; Oncologie ; Maladies neurodégénératives ; Démence

Abstract

The hybrid Positron Emission Tomography/Magnetic Resonance Imaging (PET/MRI) is a newly available imaging modality combining the molecular and metabolic PET information with the morphological and functional data provided by MRI. Integrated PET/MRI tomographs were conceived in analogy to the current PET/Computed Tomography (PET/CT) technology, with specific properties linked to the intrinsic differences of MRI and CT imaging. In the field of neuro-imaging, in particular, MRI provides a larger panel of information, as compared with CT, and is already systematically fused and used as a support for PET images for diagnostic and research purposes. We summarize here our current experience with the first integrated PET/MRI tomograph installed in Switzerland, concerning specifically three clinical applications: brain tumors characterization, the diagnosis of neurodegenerative dementias and the presurgical evaluation of pharmaco-resistant epilepsy. With this sequential tomograph, we could combine the full range of diagnostic MR sequences (including diffusion tensor imaging, tractography, spectroscopy, functional MR) with PET imaging of brain glucose metabolism (by ¹⁸F-Fluorodeoxyglucose–FDG) and of amino acid transport (by ¹⁸F-Fluoroethyltyrosine–FET). We also summarize the main results obtained in neuro-imaging by the different groups working with these new hybrid

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : valentina.garibotto@hcuge.ch (V. Garibotto).

tomographs. These data show that PET/MRI, acquired in a single imaging session, may represent the modality of choice for neuro-imaging. © 2013 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Keywords: PET/MRI; Neuro-imaging; Epilepsy; Oncology; Neurodegenerative disorders; Dementias

1. Introduction

La tomographie par émission de positons/imagerie par résonance magnétique (TEP/IRM) est une technologie récente, qui suscite un intérêt croissant de la part de la communauté médicale en raison de ses applications cliniques potentielles [1].

En neuro-imagerie, la TEP et l'IRM représentent les deux méthodes de choix pour la plupart des indications cliniques et de recherche, permettant de combiner l'information métabolique et moléculaire (métabolisme du glucose pour diverses explorations fonctionnelles, métabolisme d'acides aminés pour la détection des tumeurs, traceurs spécifiques pour la neurotransmission) fournie par l'imagerie TEP, avec les différents paramètres morphologiques et fonctionnels de l'IRM. Pour cette raison, plusieurs applications cliniques potentielles de la TEP/IRM pour l'imagerie cérébrale ont été proposées et récemment résumées [2,3]. Les premiers prototypes de tomographe hybride TEP/IRM étaient des tomographes dédiés à l'imagerie cérébrale [4]. Naturellement, l'application clinique de ces systèmes dédiés reste limitée, en raison de la disponibilité confinée principalement à des centres de recherche. Plus récemment, des tomographes hybrides TEP/IRM « corps entier » ont été développés et ont eu une diffusion plus large, pouvant réaliser aussi bien l'imagerie cérébrale que le bilan thoraco-abdomino-pelvien [5–7].

2. Neuro-imagerie en TEP/IRM : l'expérience genevoise

Un tomographe hybride intégré TEP/IRM corps entier (Philips Ingenuity TF) a été installé à Genève en avril 2010. Il est constitué par une TEP (GEMINI Time-of-Flight) et une IRM 3 Tesla (Achieva 3 T TX-series). En janvier 2011, il a obtenu la certification Conformité européenne (CE) pour l'utilisation clinique. Les deux modalités sont regroupées dans un même dispositif, connectées par une table pivotante de 180 degrés permettant de réaliser les deux acquisitions dans le même système de référence sans mobiliser le patient. La TEP est équipée d'éléments permettant d'isoler l'électronique de la chaîne de détection TEP des effets du champ magnétique de l'IRM et d'autres modifications ont également été appliquées pour éviter des artefacts sur les images IRM induits par la composante TEP. Ce modèle a permis de minimiser les modifications apportées aux deux composantes, tout en garantissant des performances de l'une et de l'autre modalité équivalentes à celles connues pour des systèmes indépendants [8]. Les caractéristiques techniques détaillées de ce tomographe ont été précédemment publiées par Zaidi et al. [5]. Plusieurs publications récentes de notre équipe ou d'autres utilisateurs de

ce tomographe ont décrit son intérêt pour des investigations oncologiques [6,9–11].

Le but de cette revue est de résumer, d'une part, notre expérience dans l'utilisation de cette modalité hybride en neuro-imagerie et, d'autre part, les développements et progrès attendus dans ce domaine. Nous allons définir les protocoles d'acquisition ciblés et adaptés à cette modalité d'imagerie et les trois domaines principaux d'application clinique en neurologie : la caractérisation des tumeurs cérébrales, le diagnostic différentiel des démences neurodégénératives et le bilan préopératoire de l'épilepsie pharmaco-résistante.

3. Les protocoles d'acquisition

Comme toute nouvelle modalité d'imagerie, l'utilisation des tomographes hybrides TEP/IRM a posé une variété de défis techniques, qui ont été affrontés singulièrement par les différentes équipes en fonction du modèle de leur prototype, simultané ou séquentiel [12,13].

Nous avons précédemment décrit en détails les protocoles adoptés pour les différentes indications cliniques en neuro-imagerie [13], qui sont aussi schématisées dans la Fig. 1.

Concernant l'évaluation du métabolisme glucidique cérébral au ^{18}F -Fluorodéoxyglucose (^{18}F -FDG), par exemple, nous nous sommes assurés de l'absence de toute stimulation auditive pendant la phase de fixation du traceur, qui avait donc lieu en dehors de toute acquisition IRM. En effet, les résultats d'une étude récente réalisée sur un tomographe à acquisition simultanée documentent une activation du cortex auditif primaire induite par les acquisitions IRM concomitantes [14].

En comparaison avec la tomomodensitométrie (TDM), l'IRM est une modalité nécessitant des acquisitions beaucoup plus longues, qui se rajoutent au temps nécessaire à l'acquisition TEP : indépendamment du fait que l'acquisition soit simultanée ou séquentielle, la durée de l'examen est supérieure par rapport à la durée d'un examen TEP/TDM, ce qui peut s'associer à des artefacts de mouvement dégradant la qualité des images et à des modifications physiologiques de la distribution du traceur TEP.

De plus, la nature intrinsèquement multiparamétrique de l'IRM implique de choisir préalablement les séquences les plus utiles selon l'organe à investiguer, tout en incluant les séquences morphologiques nécessaires à la fusion de l'imagerie TEP (et en repérant les séquences qui pourrait être redondantes à l'information TEP). Cet effort de sélection est non seulement spécifique à l'organe investigué, mais aussi à l'indication clinique. Il est aussi important de souligner qu'une formation du personnel médical et technique est nécessaire, intégrant le personnel des services de médecine nucléaire et de radiologie, en raison de la complexité des protocoles d'acquisition des examens hybrides.

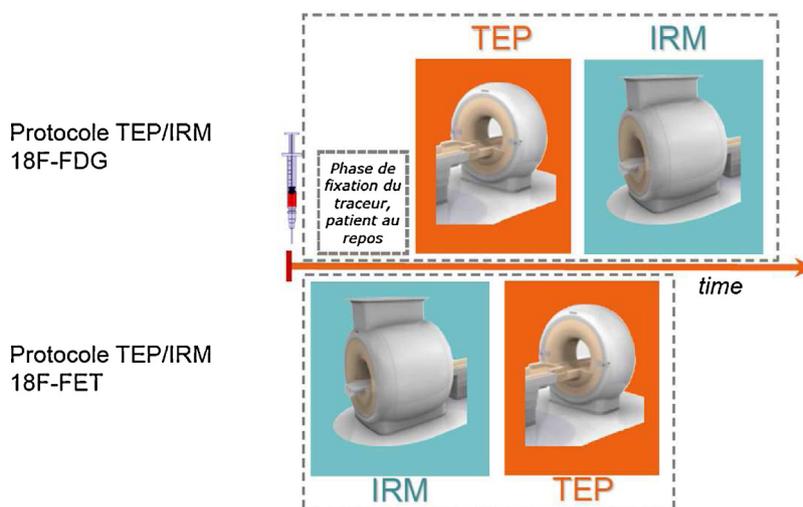


Fig. 1. Représentation schématique des protocoles d'acquisition pour les études TEP/IRM de neuro-imagerie avec ^{18}F -FDG et ^{18}F -FET réalisés dans notre institution : pour le premier, la phase de fixation du traceur est réalisée en dehors du scanner, pour éviter une stimulation auditive qui modifierait la distribution du traceur ; pour le deuxième, au contraire, la stimulation auditive ne modifiant pas, vraisemblablement, la distribution du radiotracer, l'acquisition des images IRM peut se faire pendant la phase de fixation.

Schematic representation of the acquisition protocols adopted in our institution for the PET/MRI neuro-imaging studies, using ^{18}F -FDG et ^{18}F -FET: for the first, the uptake phase is realized outside the scanner, in order to avoid an auditory stimulation which would change the tracer distribution; for the second, on the contrary, given that the auditory stimulation has presumably no influence on tracer distribution, MRI can be acquired during the uptake phase.

4. Les applications cliniques : la caractérisation des tumeurs cérébrales

L'IRM est la méthode de choix pour l'évaluation des tumeurs cérébrales. Bien que cette technique permette une excellente visualisation de ces tumeurs, il y a encore des limitations pour définir précisément les limites de la lésion, en particulier des composantes infiltratives de bas grade, pour identifier les remaniements post-thérapeutiques et pour évaluer la réponse aux traitements.

L'information moléculaire de la TEP, en particulier avec des traceurs spécifiques, tels que ^{11}C -méthionine et ^{18}F -Fluoro-oéthyltyrosine (^{18}F -FET) est aujourd'hui un outil établi dans le diagnostic et le suivi des tumeurs primaires cérébrales, principalement dans les gliomes [15].

Dans l'évaluation diagnostique et dans le *staging*, cette modalité peut être utilisée pour guider la biopsie des tumeurs hétérogènes. Elle peut aider à déterminer l'étendue des tumeurs et à les différencier de l'œdème périlésionnel. Elle peut également être utile pour le choix du traitement. L'imagerie TEP avec des analogues d'acides aminés peut aider à différencier les modifications post-thérapeutiques des récives tumorales ou encore évaluer de façon précoce la réponse aux traitements [16]. Ainsi, l'association de la TEP et de l'IRM est susceptible d'améliorer la sensibilité diagnostique des gliomes et peut permettre d'étudier plus en détail les rapports entre l'absorption du traceur et les modifications de perfusion et d'intégrité de la barrière hémato-encéphalique, conduisant à une meilleure caractérisation des tissus tumoraux. Les expériences qui ont été réalisées par tomographe hybride dans ce domaine utilisent principalement 3 différents traceurs : les résultats sont résumés ci-dessous.

4.1. ^{18}F -FET

Une petite série de patients a été étudiée par TEP/IRM avec le ^{18}F -FET incluant des patients adultes et pédiatriques atteints de tumeurs cérébrales de haut grade. Dans cette étude, la qualité des images était satisfaisante dans les deux modalités chez tous les sujets [17]. Des images TEP/IRM de bonne qualité ont également été acquises avec un tomographe dédié dans une petite série de patients atteints de gliome [18,19].

4.2. ^{11}C -méthionine

Deux articles ont comparé les résultats TEP/IRM avec la TEP/TDM chez des patients porteurs d'un gliome, comprenant des lésions de haut et de bas grade, avec le ^{11}C -méthionine [20,21]. Dans les deux études, réalisées par la même équipe, les sujets étaient étudiés par TEP/TDM puis par TEP/IRM (en utilisant un tomographe dédié à la neuro-imagerie) : les résultats ne montrent pas de différence significative dans la classification visuelle des lésions (positives vs. négatives) et dans l'évaluation quantitative par rapport à des tissus de référence. En outre, la qualité des images IRM était globalement bonne, hormis un faible pourcentage de cas (environ 10 % des sujets) montrant des artéfacts sur certaines séquences IRM [21]. Globalement, ces études ont montré que les tomographes hybrides TEP/IRM peuvent être utilisés dans la pratique clinique pour l'investigation des tumeurs cérébrales en obtenant toutes les informations diagnostiques fournies par chacune des deux modalités.

Un travail récent a utilisé un tomographe TEP/IRM hybride pour évaluer l'association entre les paramètres métaboliques mesurés par spectroscopie par résonance magnétique et la

fixation de la ^{11}C -méthionine [22]. Les auteurs ont comparé les régions d'hyperfixation de la ^{11}C -méthionine et les régions comportant une augmentation du rapport choline/N-acétylaspartate (qui est associé à une prolifération des membranes cellulaires). La discordance partielle de ces deux distributions suggère une complémentarité des informations fournies par les deux méthodes : la TEP/IRM pourrait donc trouver sa place dans la phase de planification d'une biopsie chirurgicale.

4.3. ^{68}Ga -DOTA-D-Phe1-Tyr3-octreotide (^{68}Ga -DOTATOC)

Les deux articles mentionnés ci-dessus ont également comparé les résultats obtenus chez les patients atteints de méningiome avec TEP/TDM et TEP/IRM, en utilisant comme traceur le ^{68}Ga -DOTATOC : ils ont démontré que la qualité des images et des données quantitatives obtenues avec les deux modalités étaient comparables [20,21]. Chez deux patients sur huit investigués, les auteurs ont identifié une lésion supplémentaire en analysant les images TEP/IRM, qui n'avait pas été identifiée sur les images TEP/TDM [21]. L'utilisation de cette nouvelle modalité dans la planification d'une radiothérapie a également été testée chez un patient montrant une récurrence post-chirurgicale de méningiome [23]. L'analyse TEP/IRM (système cérébral dédié) a identifié une région pathologique supplémentaire, par rapport à la TEP/TDM. Il faut toutefois considérer qu'il y a des différences entre les deux ensembles de données, telles que la meilleure résolution spatiale du système dédié, le délai entre l'administration et l'acquisition, la taille des voxels et la procédure de correction

d'atténuation, qui peuvent aussi avoir influencé ces premiers résultats [23].

5. Les applications cliniques : les démences neurodégénératives

Les techniques TEP et IRM font partie des biomarqueurs les plus sensibles et les plus spécifiques pour le diagnostic des pathologies neurodégénératives. En particulier, l'imagerie TEP avec le ^{18}F -FDG est une méthode validée pour l'évaluation de la fonction neuronale régionale, notamment pour le diagnostic de la maladie d'Alzheimer y compris dans les phases précoces et précliniques [24].

Nous avons pu montrer, dans un petit collectif de patients porteurs d'une pathologie neurodégénérative, l'apport de l'imagerie hybride TEP/IRM pour le diagnostic différentiel des démences [17]. Nous avons ainsi mis en place un protocole d'acquisition TEP/IRM pour l'investigation des pathologies neurodégénératives, qui associe plusieurs biomarqueurs clés, tels que le métabolisme glucidique cérébral, la perfusion cérébrale et la réserve vasculaire [25]. Ces données, actuellement en cours d'acquisition, permettront d'évaluer la contribution clinique de l'imagerie hybride dans ce domaine. Un cas représentatif acquis chez un patient avec déficit cognitif léger est montré en Fig. 2.

L'étude de Schwenzer et al., mentionnée précédemment, a évalué également 11 patients atteints d'une pathologie neurodégénérative par TEP/TDM au ^{18}F -FDG, suivie d'une TEP/IRM [21]. Les résultats confirment une bonne correspondance qualitative entre les données TEP obtenues et leur

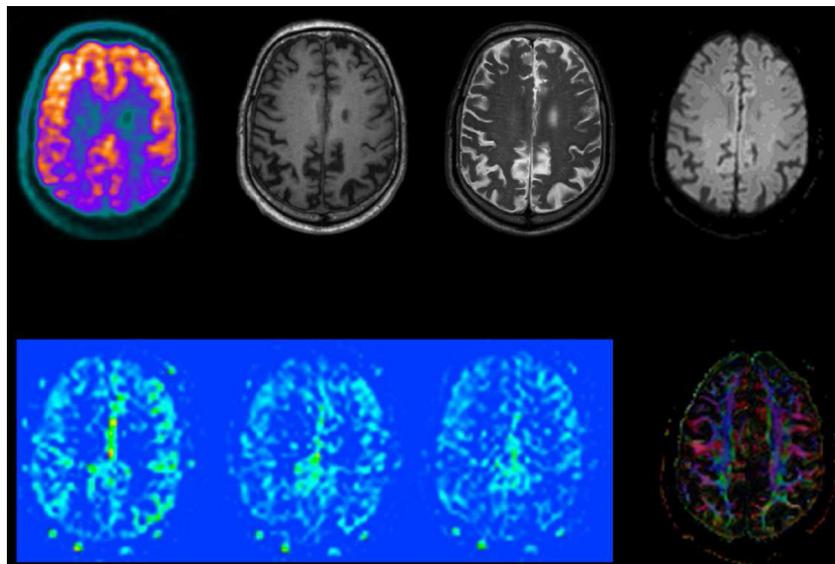


Fig. 2. Imagerie TEP/IRM au ^{18}F -FDG pour un patient avec déficit cognitif léger incluant, de haut en bas et de gauche à droite : des images TEP de distribution du ^{18}F -FDG, une image IRM pondérée T1, une image IRM pondérée T2, une image IRM de diffusion (b1000), trois phases successives de *arterial spin labeling* et une image du tenseur de diffusion.

Les images TEP montrent une diminution de métabolisme dans les régions pariétales et au niveau du précuneus, avec un pattern évocateur d'une maladie d'Alzheimer débutante ; les images IRM montrent une atrophie et une hypoperfusion relative prédominant au niveau des régions postérieures, sans autre anomalie notable. *PET/MRI imaging for a patient with Mild Cognitive Impairment, including, from top to bottom and from left to right: PET images of ^{18}F -FDG distribution, a T1-weighted MRI image, a T2-weighted MRI image, a diffusion MRI image (b1000), three successive phases of arterial spin labeling and a diffusion tensor image. PET images show a reduced metabolism in parietal regions and in the precuneus, with a pattern suggesting a prodromal Alzheimer's disease; MRI shows atrophy and relative hypoperfusion, predominant in the posterior areas, without any other relevant abnormality.*

interprétation sur les deux modalités hybrides. Par contre, aucune mesure strictement quantitative ne peut être comparée de façon rigoureuse, aussi en raison d'un intervalle différent entre injection du traceur et acquisition pour les deux séries d'images. Un autre domaine d'application de la TEP/IRM hybride est la réalisation d'images avec des traceurs TEP des plaques amyloïdes, comme illustré récemment par deux cas cliniques [26].

6. Les applications cliniques : bilan préchirurgical des épilepsies

L'imagerie TEP joue un rôle très important dans le diagnostic préchirurgical des épilepsies. En pratique clinique, le ^{18}F -FDG est le traceur le plus utilisé : le but est d'identifier un hypométabolisme focal (diminution de captation du glucose) correspondant à la zone dysfonctionnelle à l'origine des crises épileptiques. L'intérêt principal réside dans l'étude des cas négatifs à l'IRM ou dans l'identification de la lésion épileptogène parmi plusieurs visibles à l'IRM [27]. Le ^{11}C -flumazenil, un ligand pour les récepteurs GABA, se fixe également de façon moindre au niveau du cortex épileptogène par rapport au cortex sain [27].

L'imagerie TEP est toujours interprétée en association avec l'imagerie morphologique et fonctionnelle fournie par l'IRM, indispensable dans le domaine du bilan préchirurgical de l'épilepsie. Pour le diagnostic des dysplasies corticales, par exemple, la fusion des images TEP et IRM permet un gain diagnostique significatif [28,29]. Dans le domaine de l'épilepsie, ces nouvelles modalités permettent de réaliser, dans une même session d'imagerie, un bilan complet, en évaluant les altérations structurelles et fonctionnelles grâce à l'IRM et la distribution du ^{18}F -FDG ou d'autres traceurs TEP, le tout associé avec un monitoring EEG de l'activité critique et intercritique avant et durant l'examen [30]. Des crises même sous-cliniques avant ou durant la captation du traceur peuvent faussement normaliser un hypométabolisme focal ; l'examen simultané EEG-fMRI montre les changements hémodynamiques focaux (IRM fonctionnelle) corrélés à l'activité interictale (EEG) [31]. Ce domaine est en plein développement et dans la littérature scientifique il n'y a que deux publications qui décrivent l'utilisation des tomographes hybrides TEP/IRM dans l'imagerie de l'épilepsie avec ^{18}F -FDG et ^{11}C -Flumazenil [17,18]. Les résultats préliminaires obtenus sont très prometteurs et les projets actuellement en cours permettront d'évaluer le rôle de cette nouvelle modalité dans la pratique clinique et dans la recherche.

7. Autres applications

7.1. Maladies vasculaires

L'utilisation de l'imagerie hybride TEP/IRM permet l'évaluation du réseau vasculaire, des atteintes parenchymateuses ainsi que des altérations fonctionnelles et dégénératives locales et à distance, comme par exemple le phénomène de diaschisis [32].

L'IRM a énormément évolué pour fournir des mesures de plus en plus précises de la perfusion cérébrale avec des séquences avec et sans l'utilisation du produit de contraste, ce dernier atout semble prometteur surtout chez les patients avec une insuffisance rénale et chez les enfants. La TEP/IRM représente l'outil idéal pour comparer ces mesures avec le *gold standard* représenté par la TEP avec ^{15}O - H_2O dans des conditions strictement identiques pour les deux modalités : cela a été récemment réalisé en utilisant un tomographe dédié et les résultats préliminaires suggèrent des différences systématiques entre les deux modalités, dont l'origine doit encore être investiguée [33].

7.2. Tumeurs des nerfs périphériques

L'IRM est l'examen de choix pour l'étude des nerfs périphériques. Récemment, la neurographie par IRM a été intégrée en routine clinique. La TEP, rarement réalisée pour cette indication, peut toutefois apporter des informations métaboliques utiles pour l'analyse des lésions suspectes [34]. Par exemple, l'analyse postopératoire par IRM seule reste difficile et la TEP peut améliorer nettement la délimitation exacte de la tumeur résiduelle métaboliquement active, comme récemment démontré [32].

8. Discussion et perspectives

En ce qui concerne les trois indications cliniques principales, le tomographe hybride permet d'obtenir des images de qualité satisfaisante et dans le même système de référence, en une seule session, ce qui représente le principal avantage de cette modalité. En pratique, pour ces indications, une TEP/TDM et une IRM séparées sont déjà réalisées systématiquement dans le bilan clinique standard. Bien qu'une étude TEP/IRM soit plus longue qu'une étude TEP/TDM standard, elle reste plus courte que la durée totale de deux acquisitions indépendantes effectuées sur deux caméras distinctes. Ceci constitue un avantage pour les patients les moins collaborants, particulièrement appréciable pour les patients nécessitant une anesthésie/sédation, les patients ayant des troubles du comportement et les patients pédiatriques. L'acquisition hybride garantit des conditions identiques pour les deux études : cela n'est pas nécessairement le cas pour une TEP et une IRM réalisées séparément, souvent à quelques jours voire quelque semaines d'intervalle et peut avoir une importance pour des situations rapidement évolutives.

On peut aussi s'attendre à une valeur ajoutée en raison de la co-interprétation systématique des deux signaux : l'interprétation multidisciplinaire des résultats constitue, dans notre expérience, un apport indéniable de l'imagerie hybride. Ceci a déjà été suggéré par des études réalisées en utilisant une fusion *a posteriori* d'images TEP et IRM dans plusieurs domaines diagnostiques [28,29,35].

Des travaux sont actuellement en cours afin d'améliorer encore la technique TEP/IRM. Une question centrale est l'évaluation de l'impact de la correction d'atténuation guidée par IRM sur la quantification des données TEP [36]. Alors que les données TEP sont tout à fait adéquates pour une

interprétation visuelle, la quantification absolue reste discutable pour les études concernant les neurorécepteurs où les différences entre les sujets sains et les populations de patients sont souvent subtiles. Pour cette raison, nous avons concentré notre pratique dans des domaines cliniques pour lesquels il n'y a pas de nécessité de quantification absolue.

9. Conclusion

En conclusion, la possibilité de combiner l'information moléculaire fournie par la TEP avec une grande variété de séquences IRM ouvre de nouveaux horizons pour la neuro-imagerie. L'acquisition de la TEP et de l'IRM en une seule session sur un tomographe hybride minimise les désagréments pour le patient, tout en maximisant l'information clinique et en optimisant la fusion des deux modalités. Les études actuellement en cours dans différentes équipes permettront de confirmer que la TEP/IRM, réalisée en une session unique, pourra devenir une modalité de choix dans le domaine de la neuro-imagerie.

Remerciements

Ces études ont été financés en partie par AETAS - Swiss foundation for ageing research.

Références

- [1] Ratib O, Beyer T. Whole-body hybrid PET/MRI: ready for clinical use? *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2011;38:992–5.
- [2] Garibotto V, Forster S, Haller S, Vargas MI, Drzezga A. Molecular Neuro-imaging with PET/MRI. *Clin Transl Imaging* 2013;1:53–63.
- [3] Catana C, Drzezga A, Heiss WD, Rosen BR. PET/MRI for Neurologic Applications. *J Nucl Med* 2012;53:1916–25.
- [4] Schlemmer HP, Pichler BJ, Schmand M, Burbar Z, Michel C, Ladebeck R, et al. Simultaneous MR/PET imaging of the human brain: feasibility study. *Radiology* 2008;248:1028–35.
- [5] Zaidi H, Ojha N, Morich M, Griesmer J, Hu Z, Maniawski P, et al. Design and performance evaluation of a whole-body Ingenuity TF PET-MRI system. *Phys Med Biol* 2011;56:3091–106.
- [6] Ratib O, Lord M, Becker M, Viallon M, Vallée JP, Loubeyre P, et al. Clinical applications of hybrid PET-MR. *Med Nucl* 2012;36:605–14.
- [7] Delso G, Furst S, Jakoby B, Ladebeck R, Ganter C, Nekolla SG, et al. Performance measurements of the siemens mMR integrated whole-body PET/MR scanner. *J Nucl Med* 2011;52:1914–22.
- [8] Kalemis A, Delattre BM, Heinzer S. Sequential whole-body PET/MR scanner: concept, clinical use, and optimisation after two years in the clinic. The manufacturer's perspective. *MAGMA* 2013;26:5–23.
- [9] Wissmeyer M, Heinzer S, Majno P, Buchegger F, Zaidi H, Garibotto V, et al. Y Time-of-flight PET/MR on a hybrid scanner following liver radioembolisation (SIRT). *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2011;38:1744–5.
- [10] Lord M, Ratib O, Vallee JP. ¹⁸F-Fluorocholine integrated PET/MRI for the initial staging of prostate cancer. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2011;38:2288.
- [11] Platzeck I, Beuthien-Baumann B, Langner J, Popp M, Schramm G, Ordemann R, et al. PET/MR for therapy response evaluation in malignant lymphoma: initial experience. *MAGMA* 2013;26:49–55.
- [12] Martinez-Moller A, Eiber M, Nekolla SG, Souvatzoglou M, Drzezga A, Ziegler S, et al. Workflow and scan protocol considerations for integrated whole-body PET/MRI in oncology. *J Nucl Med* 2012;53:1415–26.
- [13] Vargas MI, Becker M, Garibotto V, Heinzer S, Loubeyre P, Gariani J, et al. Approaches for the optimization of MR protocols in clinical hybrid PET/MRI studies. *MAGMA* 2013;26:57–69.
- [14] Chonde DB, Abolmaali N, Arabasz G, Guimaraes AR, Catana C. Effect of MRI acoustic noise on cerebral fludeoxyglucose uptake in simultaneous MR-PET imaging. *Invest Radiol* 2013;48:302–12.
- [15] Dunet V, Rossier C, Buck A, Stupp R, Prior JO. Performance of 18F-fluoro-ethyl-tyrosine (18F-FET) PET for the differential diagnosis of primary brain tumor: a systematic review and meta-analysis. *J Nucl Med* 2012;53:207–14.
- [16] Herholz K, Langen KJ, Schiepers C, Mountz JM. Brain tumors. *Semin Nucl Med* 2012;42:356–70.
- [17] Garibotto V, Heinzer S, Vulliemoz S, Guignard R, Wissmeyer M, Seeck M, et al. Clinical applications of hybrid PET/MRI in neuro-imaging. *Clin Nucl Med* 2013;38:e13–8.
- [18] Herzog H, Langen KJ, Weirich C, Rota Kops E, Kaffanke J, Tellmann L, et al. High resolution BrainPET combined with simultaneous MRI. *Nuklearmedizin* 2011;50:74–82.
- [19] Neuner I, Kaffanke JB, Langen KJ, Kops ER, Tellmann L, Stoffels G, et al. Multimodal imaging utilising integrated MR-PET for human brain tumour assessment. *Eur Radiol* 2012;22:2568–80.
- [20] Boss A, Bisdas S, Kolb A, Hofmann M, Ernemann U, Claussen CD, et al. Hybrid PET/MRI of intracranial masses: initial experiences and comparison to PET/CT. *J Nucl Med* 2010;51:198–205.
- [21] Schwenzler NF, Stegger L, Bisdas S, Schraml C, Kolb A, Boss A, et al. Simultaneous PET/MR imaging in a human brain PET/MR system in 50 patients—current state of image quality. *Eur J Radiol* 2012;81:3472–8.
- [22] Bisdas S, Ritz R, Bender B, Braun C, Pfannenbergl C, Reimold M, et al. Metabolic mapping of gliomas using hybrid MR-PET imaging: feasibility of the method and spatial distribution of metabolic changes. *Invest Radiol* 2013;48:295–301.
- [23] Thorwarth D, Henke G, Muller AC, Reimold M, Beyer T, Boss A, et al. Simultaneous 68Ga-DOTATOC-PET/MRI for IMRT treatment planning for meningioma: first experience. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2011;81:277–83.
- [24] Drzezga A. Diagnosis of Alzheimer's disease with [18F]PET in mild and asymptomatic stages. *Behav Neurol* 2009;21:101–15.
- [25] Garibotto V, Haller S, Zekry D, Heinzer S, Lovblad KO, Zaidi H, et al. In: 12th international Stockholm/Springfield symposium on advances in Alzheimer therapy; Stockholm; 2012.
- [26] Vercher-Conejero JL, Rubbert C, Kohan AA, Partovi S, O'Donnell JK. Amyloid PET/MRI in the differential diagnosis of dementia. *Clin Nucl Med* 2013.
- [27] Kumar A, Semah F, Chugani HT, Theodore WH. Epilepsy diagnosis: positron emission tomography. *Handb Clin Neurol* 2012;107:409–24.
- [28] Salamon N, Kung J, Shaw SJ, Koo J, Koh S, Wu JY, et al. FDG-PET/MRI coregistration improves detection of cortical dysplasia in patients with epilepsy. *Neurology* 2008;71:1594–601.
- [29] Chassoux F, Rodrigo S, Semah F, Beuvon F, Landre E, Devaux B, et al. FDG-PET improves surgical outcome in negative MRI Taylor-type focal cortical dysplasias. *Neurology* 2010;75:2168–75.
- [30] Shah NJ, Oros-Peusquens AM, Arrubla J, Zhang K, Warbrick T, Mauler J, et al. Advances in multimodal neuro-imaging: hybrid MR-PET and MR-PET-EEG at 3 T and 9.4 T. *J Magn Reson* 2013;229:101–15.
- [31] Grouiller F, Heinzer S, Delattre B, Lazeyras F, Seeck M, Ratib O, et al. In: International conference on basic and clinical multimodal imaging; Geneva; 2013.
- [32] Vargas MI, Garibotto V, Viallon M, Guignard R, Cuvinciu V, Lovblad K, et al. Peripheral nerves, tumors, and hybrid PET-MRI. *Clin Nucl Med* 2013;38:e40–2.
- [33] Herzog H, Zhang K, Mauler J, Filss C, Rota Kops E, Tellmann L, et al. In: BrainPET; Shanghai, China: International society for cerebral blood flow and metabolism; 2013.
- [34] Bronstein Y, Tummala S, Rohren E. F-18 FDG PET/CT for detection of malignant involvement of peripheral nerves: case series and literature review. *Clin Nucl Med* 2011;36:96–100.
- [35] Pirotte BJ, Lubansu A, Massager N, Wikler D, Van Bogaert P, Levivier M, et al. Clinical impact of integrating positron emission tomography during surgery in 85 children with brain tumors. *J Neurosurg Pediatr* 2010;5:486–99.
- [36] Larsson A, Johansson A, Axelsson J, Nyholm T, Asklund T, Riklund K, et al. Evaluation of an attenuation correction method for PET/MR imaging of the head based on substitute CT images. *MAGMA* 2013;26:127–36.