



La visualisation nucléaire, aujourd'hui et demain

Les progrès dans plusieurs domaines orientent l'avenir

par Gerard van Herk

«Une image en dit plus que tout un discours».

Cette maxime, chère au monde de la publicité, ne vaut pas que pour lui, mais peut aussi s'appliquer en médecine où l'image joue un rôle capital quand il s'agit de faire un diagnostic. Pour prévoir l'évolution des appareils de visualisation, il faut d'abord considérer l'ensemble des moyens dont la médecine nucléaire dispose aujourd'hui. Dans cet article, nous nous occuperons plus spécialement des appareils qui semblent présenter le plus d'intérêt pour les spécialistes de la médecine nucléaire des pays en développement.

Le scintigraphe à balayage linéaire, ou scanner, est le premier appareil qui ait permis d'obtenir une image de la distribution de la radioactivité présente dans un organisme. C'est un appareil fiable toujours communément utilisé dans de nombreux centres de médecine nucléaire du Tiers monde.

Il consiste en un détecteur muni d'un collimateur en plomb qui focalise l'émission radioactive de chaque point du champ. Le détecteur balaie la région de l'organe à étudier, où le radioindicateur s'est réparti et dont on veut obtenir l'image. Le signal détecté en chaque point est immédiatement transmis à un inscripteur connecté à la sortie du détecteur. Lorsque toute l'aire d'intérêt a été balayée, l'ensemble de tous les traits et points imprimés, qui constitue le scintigramme, donne une représentation grandeur nature de la distribution de l'indicateur.

Quant à la caméra gamma, le type le plus couramment utilisé est celui qu'a mis au point Hal Anger en 1959. Avec cet appareil, toute la zone de distribution du

radioindicateur se projette par l'intermédiaire d'un collimateur à canaux parallèles sur un mince cristal scintillateur; le diamètre du champ de vision peut aller de 18 à 50 cm. Chaque scintillation dans ce cristal est captée par une série de tubes photomultiplicateurs généralement au nombre de 19 à 75. Les intensités relatives des signaux émis par ces tubes photomultiplicateurs sont analysées par un circuit électronique de positionnement qui émet deux signaux par photon capté. Lorsqu'elle parvient à l'unité d'affichage, la scintillation initiale se transforme en un point lumineux sur l'écran. L'accumulation de plusieurs milliers de ces points sur une plaque sensible permet d'obtenir une photographie qui représente l'organe étudié.

Bien qu'il soit jugé démodé par rapport à la caméra gamma, l'appareil à balayage présente sur elle un certain nombre d'avantages. De par son principe même, sa réponse est uniforme et sans distorsion sur toute la surface de la région représentée; il donne des résultats satisfaisants avec les radionucléides de haute énergie, dont quelques-uns sont plus faciles à obtenir que le technétium 99m, d'usage courant. Le scanner donne en outre une image plus contrastée des structures profondes. Enfin, il est généralement moins sensible aux conditions ambiantes défavorables, à l'instabilité de l'alimentation et au défaut d'entretien que l'on constate bien souvent dans de nombreux pays en développement.

En revanche, il présente un certain nombre d'inconvénients: on ne peut pas l'utiliser pour des études dynamiques, c'est-à-dire dans les cas où la distribution de l'indicateur évolue au cours de l'examen; en outre, la résolution de l'image du scanner est inférieure à celle de l'image de la caméra gamma, ce qui lui donne une moins bonne apparence. En fait, la caméra gamma, plus éla-

M. van Herk est membre de la Section des applications médicales de la Division des sciences biologiques.

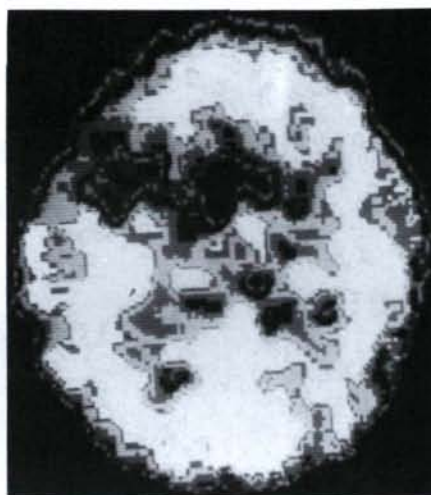
Les principes de la visualisation nucléaire

A l'origine, la médecine nucléaire ne cherchait pas à obtenir des images, mais à mesurer la quantité d'un produit biomédical présente à un moment et en un point déterminés. Dans son principe, le marquage cinétique consiste à «marquer» un composé biomédical avec un «radioisotope» et à suivre le cheminement et l'évolution de cet «indicateur». Etant donné que ce produit marqué est utilisé en faible quantité et que son comportement est identique à celui de la substance que l'on veut étudier, il n'y a pas d'interférence avec les processus physiologiques normaux. Ces indicateurs sont communément appelés «produits radiopharmaceutiques».

Les biochimistes, les physiologues et les pharmacologues, travaillant en étroite collaboration, ont produit un large choix de produits radiopharmaceutiques. Pour la plupart des organes et plusieurs de leurs fonctions, il existe un indicateur spécifique qui joue un rôle particulier dans le métabolisme ou dans les mécanismes de transport. Comme radio-indicateur, c'est le technétium 99m que l'on utilise le plus volontiers à cause de ses intéressantes propriétés physiques et chimiques. C'est un radionucléide de courte période, ce qui permet de limiter la dose de rayonnements reçue par le patient et d'éviter les problèmes éventuels de gestion des déchets.

Le grand avantage de la médecine nucléaire est que les radio-indicateurs se comportent comme des marqueurs de fonction. Les autres modes de visualisation diagnostique, tels la radiologie et les examens aux ultrasons, donnent une image statique des propriétés d'un tissu, par exemple de sa densité. En revanche, la visualisation nucléaire rend compte des processus biochimiques dynamiques. La distribution apparemment stationnaire d'un indicateur représente l'absorption du composé marqué à un moment donné; c'est en somme une image instantanée d'un phénomène par ailleurs très dynamique.

La plupart des techniques de visualisation exploitent un rayonnement, photonique ou autre, dont l'intensité peut être mesurée en flux total, tandis que le rayonnement gamma utilisé en médecine nucléaire est exploité au niveau de son plus petit composant indivisible, le «photon».



Scintigramme du cerveau.
(Photo: CEA)

Pour détecter le rayonnement gamma, on utilise généralement un détecteur à scintillation dont la cellule sensible est un cristal qui a la propriété de produire un petit éclat lumineux lorsqu'il est atteint par un photon. Un tube photomultiplicateur associé à ce cristal transforme cette étincelle en une impulsion électrique dont l'amplitude est proportionnelle à l'énergie du rayonnement (et inversement proportionnelle à sa longueur d'onde). Le nombre total de photons détectés pendant un intervalle de temps donné, ou taux de comptage, est la mesure de la radioactivité présente dans le champ du détecteur. C'est cette faculté de compter le nombre de photons individuels qui fait que la médecine nucléaire permet d'obtenir des résultats quantitatifs.

Etant donné le nombre limité de photons captés et le caractère aléatoire de la désintégration radioactive, la mesure se complique d'une certaine imprécision statistique. Il s'ensuit que les signaux «parasites» de la mesure de l'intensité du rayonnement se répartissent inégalement et donnent à l'image un aspect peu homogène.

borée, est un bien meilleur outil de travail que le scintigraphe à balayage, compagnon des premières années.

De toute façon, quel que soit l'appareil considéré, il est indispensable de s'assurer périodiquement que chacun de ses composants fonctionne convenablement. Ce souci doit trouver son expression dans un ensemble de procédures de contrôle de la qualité qui doivent être régulièrement appliquées. L'AIEA assiste plusieurs programmes et projets dans ce domaine et a publié un document technique.

Intervention de l'ordinateur

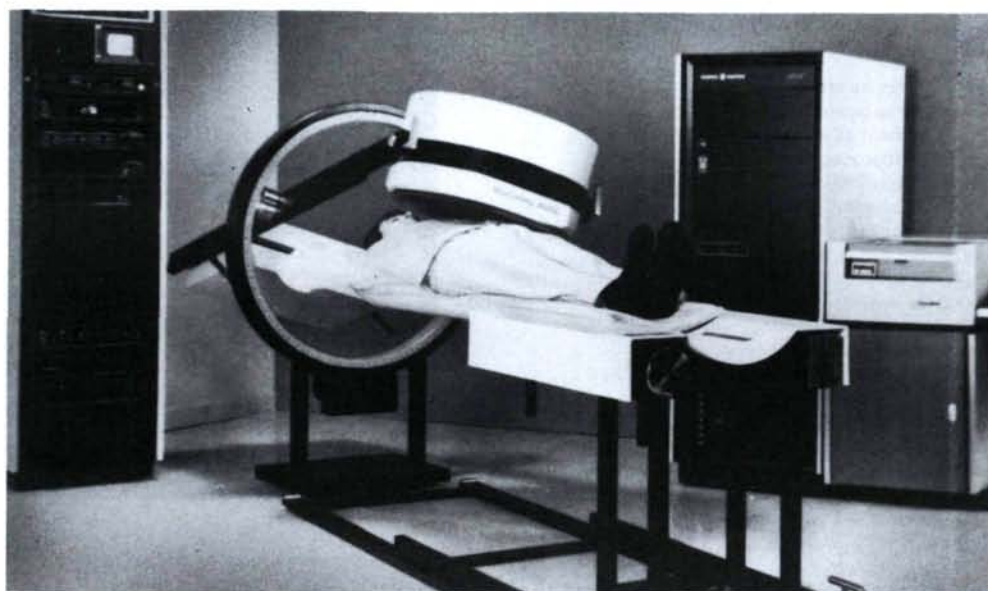
Au début des années 70, des recherches ont été faites un peu partout sur les possibilités d'utiliser les ordinateurs pour mettre en forme les images scintigraphiques. Il en est résulté, au cours de cette décennie, une affluence sur le marché d'ordinateurs destinés à cet usage.

Quand il s'agit d'images statiques, l'ordinateur cherche surtout, en quelque sorte, à faire la toilette du scintigramme. Les contrastes peuvent être accentués par soustraction du bruit de fond ou par augmentation de la densité relative dans les régions de l'image portant une information clinique importante. Les distortions et les artefacts inhérents aux images obtenues avec la caméra gamma peuvent être partiellement corrigés, les défauts

d'uniformité et de linéarité étant les plus communs. Enfin, il existe de nombreux programmes de filtrage permettant d'améliorer le rapport signal/bruit ou le flou des contours des organes représentés.

Outre son utilité pour améliorer les qualités optiques de l'image, l'ordinateur est indispensable pour analyser l'image lors des études dynamiques, c'est-à-dire pour évaluer les variations de la distribution de l'indicateur dans le temps. Dès l'injection de ce dernier, plusieurs images consécutives sont enregistrées dans la mémoire de l'ordinateur. L'activité est détectée dans l'organe ou dans certaines parties d'un intérêt particulier et relevée en fonction du temps. Les courbes qui en résultent sont analysées à l'aide de modèles mathématiques et physiologiques. Les paramètres quantitatifs ainsi déterminés sont représentatifs de la fonction de l'organe. Des méthodes sûres ont été mises au point pour l'analyse dynamique de la fonction de nombreux organes: en particulier le métabolisme cérébral, la fonction rénale, l'évacuation de l'estomac, la circulation sanguine et les contractions cardiaques. Les récents progrès dans ce dernier domaine ont fait de la cardiologie nucléaire une discipline pratiquement indépendante.

La scintigraphie classique donne une image de l'organe en fonctionnement, qui est une projection de toute l'épaisseur du corps. Ainsi, tous les plans parallèles au



Ensemble de tomographie informatisée à émission. (Photo: GE)

détecteur se trouvent superposés sur l'image. Récemment encore, la seule façon d'observer sélectivement un plan déterminé à l'intérieur du corps consistait à pratiquer une tomographie chirurgicale. Au cours des dix dernières années, le nouveau mode de visualisation offert par la tomographie informatisée a pu être mis au point grâce à la combinaison d'un appareil de visualisation très perfectionné et d'un ordinateur de grande capacité. Dans son principe, la tomographie informatisée consiste en une reconstitution mathématique à trois dimensions de l'information graphique recueillie sur plusieurs vues de l'objet prises sous différents angles. La représentation à trois dimensions ainsi obtenue est exploitée à l'aide de plusieurs coupes planes en projection frontale, latérale et aussi transverse choisies dans la mémoire de l'ordinateur. En particulier, la possibilité de représenter des structures en vision transverse, perpendiculaire à l'axe du corps, a beaucoup contribué à élargir l'horizon anatomique.

La tomographie nucléaire informatisée

Le succès rapide de la tomographie informatisée aux rayons X comme instrument courant de diagnostic clinique a encouragé la recherche sur la tomographie nucléaire informatisée dite à émission. Signalons, incidemment, que cette dernière technique a été conçue et étudiée bien avant la tomographie informatisée aux rayons X, mais on a jugé pendant longtemps qu'elle n'était pas utilisable comme méthode courante de visualisation. Il en existe deux variantes en médecine nucléaire, l'une à émission de positons et l'autre à émission d'un photon unique.

Dans la tomographie à positons, l'image est obtenue par le comptage en coïncidence des deux photons simultanés qui accompagnent les positons. Ceux-ci sont émis par certains radionucléides, la plupart de courte période. L'appareil est muni de deux détecteurs, placés de chaque côté du patient, ce qui lui confère une assez bonne sensibilité, en ce sens qu'il peut détecter une grande partie du rayonnement. Cette technique a donné d'excellents résultats, notamment dans la recherche en

physiologie et en microbiologie. Les radioisotopes des éléments formant les composés organiques sont essentiellement des émetteurs de positons. Une information quantitative et graphique extrêmement intéressante a été publiée sur le métabolisme et la consommation d'oxygène du cerveau et du myocarde.

Le succès de cette tomographie à positons a stimulé à son tour l'étude d'un appareil avec lequel on pourrait utiliser des nucléides courants, émetteurs d'un seul photon. Il existe au moins trois types d'appareils de ce genre capables de recueillir des images sous différents angles, munis respectivement d'un collimateur à trous multiples, d'un collimateur conique à un seul trou, et d'une caméra tournante. L'appareil équipé de la caméra tournante semble être le plus intéressant, car il est le moins sensible aux parasites et permet d'obtenir des images dans les plans transverses.

La tomographie informatisée à photon unique a demandé plus d'efforts que la scintigraphie classique, mais le travail supplémentaire a été compensé par une amélioration appréciable de la précision du diagnostic. Les tomogrammes obtenus par ce procédé présentent un meilleur contraste parce que l'image des structures interposées est éliminée, ce qui permet d'obtenir une représentation mieux contrastée des structures profondes.

Ce procédé de tomographie a d'abord suscité l'enthousiasme et ce n'est que par la suite que l'on a remarqué les parasites que comportait l'image, sous forme de points, de traînées ou de cercles. On s'est aperçu qu'ils provenaient de l'activité non négligeable qui subsiste en partie hors du champ de la caméra, ou encore d'une mauvaise mise au point de celle-ci. Les défauts d'uniformité, de linéarité et de positionnement de la caméra tournante, sans importance en scintigraphie classique, sont ici amplifiés lors de la reconstitution de l'image et peuvent apparaître comme de graves anomalies sur le tomogramme final. Un contrôle très strict de la qualité doit être fait lors des essais et de l'étalonnage si l'on veut éviter que les avantages de la tomographie informatisée à émission ne deviennent en fin de compte des inconvénients.

Tendances de l'instrumentation de visualisation

L'évolution du matériel nucléaire médical de visualisation est fonction, tout au moins en partie, du choix des modèles que les fournisseurs décident de fabriquer. La recherche en médecine nucléaire se caractérise par une constante innovation, notamment dans le domaine de l'instrumentation. La mise en œuvre des idées nouvelles semble cependant se ralentir depuis peu, pour un certain nombre de raisons. Tandis que les ingénieurs et les physiciens sont toujours prêts à lancer de nouvelles formules, les milieux médicaux semblent parfois bien moins pressés d'adopter de nouvelles méthodes ou de nouveaux appareils.

Cela explique peut-être le schéma classique en deux stades — conception et acceptation — auquel obéissent les innovations, comme on a pu le constater récemment en cardiologie nucléaire et en tomographie d'émission. Le premier stade est marqué par une vague d'enthousiasme pour les idées nouvelles qui sont publiées et présentées lors de réunions scientifiques annuelles. Cette flambée est suivie d'une accalmie relative qui peut néanmoins durer plusieurs années. Et puis, subitement, c'est l'acceptation généralisée, favorisée par l'apparition sur le marché du matériel mis au point par les fabricants, indice d'une maturation et de l'adoption des nouveaux appareils de visualisation pour les études cliniques.

Du fait de l'expansion rapide d'autres modes de visualisation et d'une tendance générale à réduire les budgets de recherche et développement, la fabrication d'appareils nouveaux a un peu perdu de son élan au cours des dernières années. C'est ainsi qu'un nombre non négligeable de fournisseurs d'ordinateurs pour la médecine nucléaire ont cessé de vendre ce matériel au cours des dernières années. Par ailleurs, le marché, dans les pays en développement, approche de la saturation. On estime à 10 000 le nombre des caméras gamma actuellement en service dans le monde entier et la demande de nouveaux appareils se situe aux environs de 1000 par an.

Les progrès de l'électronique

L'étude et la réalisation de nouveaux instruments sont dues dans une large mesure aux progrès de l'électronique. La tendance récente à la miniaturisation mène à une intégration croissante et généralisée des composants, qui se traduit par une réduction spectaculaire du prix de ces circuits intégrés que l'on appelle les «puces». L'emploi des microprocesseurs, qui viennent se substituer aux grands ensembles, augmente la puissance et l'adaptabilité des appareils, et revient moins cher. L'effort des concepteurs semble désormais se porter davantage sur les logiciels plutôt que sur le matériel informatique. De grandes capacités de traitement peuvent être maintenant incorporées dans des composants de plus en plus compacts.

L'avenir de la caméra gamma et de la tomographie informatisée à photon unique

Le principe de la caméra Anger a ses limitations qui obligent le concepteur à faire un compromis, par exemple entre la sensibilité et le pouvoir de résolution. Contrairement aux autres méthodes de visualisation, telles la

radiographie aux rayons X et la résonance magnétique nucléaire, les techniques de médecine nucléaire doivent se plier à la nécessité de limiter le nombre de photons, car il faut éviter d'exposer le patient à de trop fortes doses de rayonnements.

Toute tentative d'améliorer le pouvoir de résolution (en utilisant un cristal plus fin ou un collimateur plus étroit) se paie par une perte de sensibilité et par une image plus parasitée. On étudie d'autres scintillateurs, tels des cristaux en iodure de césium ou en germanium pur, en remplacement du iodure de sodium généralement utilisé. Mais ces recherches n'ont pas encore donné des résultats satisfaisants. L'augmentation du nombre de photomultiplicateurs associés au cristal n'a permis qu'un modeste progrès du pouvoir de résolution vers sa limite théorique. En revanche, l'instrument devient plus sujet aux pannes, étant donné que la multiplication des composants augmente d'autant la probabilité de défaillances.

Cela dit, vu son prix et sa fiabilité relative, la caméra Anger continuera probablement d'être utilisée dans la pratique comme instrument de visualisation en médecine nucléaire.

Il semble se préciser une tendance à la spécialisation plutôt qu'à une modification substantielle des caméras gamma en tant que telles. Les compromis inévitables à faire dans la conception de la caméra peuvent être adaptés aux exigences d'une application clinique spécifique, ce qui mène à des systèmes plus exclusifs. Il existe par exemple des caméras à champ restreint pour taux de comptage très élevés, que l'on utilise en cardiologie nucléaire; il y en a qui peuvent se déplacer autour du corps à très faible distance afin d'optimiser le tomogramme ou d'autres encore qui sont essentiellement mobiles ou destinées à la scintigraphie du corps entier.

La tomographie informatisée à photon unique semble devoir s'imposer dans un proche avenir grâce aux progrès rapides du matériel informatique et des logiciels, mais aussi parce qu'elle semble bien adaptée à un nombre croissant d'applications cliniques. Tout comme la tomographie à positons, son homologue de plus grande complexité, elle se perfectionne et elle permettra la quantification de la distribution des indicateurs. Une condition essentielle de la fiabilité de cette opération est la faculté d'opérer des corrections précises pour tenir compte de l'atténuation par les tissus que l'on évalue généralement par exploration de la transmission. L'inconvénient de la correction d'images par mesure de la radioactivité est l'augmentation des parasites et des fluctuations statistiques, avec la dégradation de l'image qui en résulte. Un autre moyen consiste à déterminer le profil du corps ou à lui attribuer une forme ellipsoïde pour appliquer ensuite une correction théorique. Dans ce cas, l'image ne perd pas en qualité, mais elle risque d'être moins fidèle à la réalité.

Amélioration de la vision en profondeur

Pour séduisante que soit la possibilité d'obtenir des plans de coupe en profondeur dans l'organisme, l'inconvénient est que l'on se retrouve avec une multitude d'images sélectives. Un tomogramme est surtout intéressant si l'on peut obtenir une image à trois dimensions, compacte et facile à interpréter. Aussi étudie-t-on actuel-



Les nouveaux procédés de visualisation, tels la tomographie informatisée, sont l'avenir de l'imagerie nucléaire médicale. (Photo: Tech-Ops)

lement plusieurs moyens qui permettraient de donner l'impression de profondeur.

Les photographies normales qui ne font que suggérer la troisième dimension présentent l'avantage d'être pratiques et transportables. Elles sont obtenues à partir de l'écran, où des coupes successives de plus en plus profondes sont affichées avec un contraste décroissant ou sans les bords, se présentant en quelque sorte comme les coulisses d'un théâtre. D'autres procédés plus perfectionnés font appel à l'image stéréoscopique, au hologramme et au miroir vibrant, qui permettent à l'observateur assis devant l'écran du processeur de percevoir nettement les trois dimensions. Un moyen plus simple de donner l'impression de la profondeur est d'afficher en succession rapide les vues telles qu'elles ont été prises autour du patient. Cette vue tournante comme peut en donner le cinéma laisse au pouvoir d'intégration de l'observateur le soin de faire abstraction des parasites de l'image et de lui faire percevoir le volume des organes.

Divers types de caméras pour la tomographie à positons sont à l'étude. Certains sont même déjà sur le marché. Toutefois, la technologie de cette tomographie semble s'éloigner de plus en plus de celle de la tomographie à photon unique. En effet, tandis que la première implique la présence d'un cyclotron et d'une équipe de scientifiques hautement spécialisés, la seconde se contente de produits radiopharmaceutiques plus classiques. En outre, les avantages de la tomographie à positons, dans ses applications cliniques, s'estompent quelque peu lorsque l'on considère le coût de l'opération. C'est en soit un instrument très perfectionné mais qui, en fait, s'utilise surtout dans la recherche de pointe en physiologie.

Association de l'ordinateur et de la caméra

La recherche d'un matériel informatique plus compact, plus puissant et moins coûteux, et le besoin d'une correction rapide du signal et de l'image a mené à l'intégration de l'ordinateur et de la caméra. Les signaux analogiques de position émis par les tubes photomultiplicateurs associés au cristal détecteur sont convertis très tôt en données numériques, afin de réduire la distorsion de l'information graphique. Ces caméras «numérisées» ont une plus grande stabilité de fonctionnement, car elles sont moins sensibles aux perturbations ou à la dérive progressive des signaux analogiques. En revanche, comme elles sont dépendantes d'une électronique numérique, toute défaillance de l'ordinateur se répercute sur l'ensemble du système.

Pour établir les algorithmes de reconstitution, en tomographie informatisée à émission, et pour l'analyse de Fourier, par exemple, en cardiologie nucléaire, il faut procéder à une foule de calculs qui exigent naturellement beaucoup de temps d'ordinateur. Les ordinateurs parallèles, que sont les processeurs vectoriels, par exemple, peuvent accomplir plusieurs opérations simultanément. Vu la baisse des prix du matériel informatique, il est fort possible que ces processeurs vectoriels fassent partie intégrante, dans l'avenir, des ensembles informatisés de visualisation.

D'une façon générale, on peut dire qu'une importante contribution à la médecine nucléaire viendra bientôt de l'évolution des logiciels. A cela vient s'ajouter la tendance à «geler» les programmes d'ordinateur dans les circuits intégrés; il est donc probable que l'incorporation de protocoles d'analyse de l'image aux appareils de visualisation sera bientôt une pratique courante. Pour le moment, on peut se procurer facilement des logiciels adaptables aux besoins particuliers de l'utilisateur, ce qui va à l'encontre de la normalisation des procédures. Il convient de mentionner une possibilité intéressante offerte par l'image «fonctionnelle». Sur cette image, dite aussi «paramétrique», l'intensité ou la couleur de chaque point qui la compose correspond à la valeur d'un paramètre, c'est-à-dire au résultat de l'analyse mathématique de l'exploration dynamique pour ce point particulier de l'image. Les images fonctionnelles de la phase et de l'amplitude de la contraction cardiaque, obtenues après une analyse de Fourier, et de la fonction rénale après une analyse factorielle, sont jugées valables par un nombre croissant de spécialistes.

Evolution des produits radiopharmaceutiques

La médecine nucléaire étant intrinsèquement multidisciplinaire, son avenir ne dépend pas seulement de l'évolution de l'instrumentation, mais aussi de celle de la radiopharmacie. Les radionucléides de très courte période, utilisés avec des caméras gamma conçues pour des taux de comptage élevés, se prêteront à des applications nouvelles pour l'exploration du flux sanguin et l'angiographie nucléaire.

La recherche actuelle sur des indicateurs spécifiques de l'organe ou de la fonction à étudier peut ouvrir un domaine entièrement nouveau à la visualisation fonctionnelle. Il faut mentionner en particulier les anticorps monoclonaux, composés hautement spécifiques du type de tumeur considéré, actuellement utilisés en

radioimmunoanalyse. Si cette application gagnait le domaine des études *in vivo*, un mode tout à fait nouveau de visualisation pourrait en résulter: la radioimmuno-visualisation. Avec le marquage des anticorps monoclonaux au technétium 99m, radioisotope que l'on peut se procurer très facilement, le médecin nucléaire disposerait d'un nouveau et puissant moyen de combattre le cancer.

Les techniques rivales

L'avenir de la médecine nucléaire ne peut manquer d'être influencé par la montée concurrente d'autres techniques de visualisation, telle la radiologie numérique, les ultrasons et la résonance magnétique nucléaire. Cette concurrence est la convergence des besoins de ces diverses techniques en ce qui concerne le traitement de l'image et l'intervention informatique, et mènera peut-être nécessairement à la création de services de visualisation intégrés dans les hôpitaux de l'avenir. Comme c'est le cas pour les laboratoires d'analyse *in vitro*, cette évolution se terminera peut-être par la disparition progressive des services de médecine nucléaire en tant que tels.

Dans les pays en développement, il se peut qu'il faille attendre de cinq à dix ans de plus avant qu'une nouvelle technique de médecine nucléaire soit communément appliquée. Une des raisons en est l'inévitable pénurie de moyens financiers.

Il semble que ce soit parfois les rouages administratifs et les pressions politiques qui déterminent les calendriers de transfert de technologie. Dans bien des cas, la lenteur des procédures administratives retarde considérablement l'acquisition du nouveau matériel. Viennent en plus les difficultés inhérentes aux circonstances peu favorables qui règnent dans de nombreux pays en développement. En particulier, les mesures prises pour atténuer les effets des conditions climatiques et régulariser l'alimentation en électricité sont insuffisantes pour créer l'environnement nécessaire à un matériel de plus en plus compliqué et vulnérable. Une infrastructure déficiente et le manque de devises ne permettent pas d'assurer un approvisionnement régulier en produits radiopharmaceutiques de courte période, ni d'obtenir dans les meilleurs délais les services de réparation et d'entretien nécessaires. Enfin, l'insuffisance de la formation et de la rémunération des ingénieurs, venant aggraver les effets de l'exode de cerveaux, n'est pas de nature à favoriser la motivation, ni l'acquisition de connaissances et d'expérience. Dans l'ensemble, le rythme du développement est beaucoup plus lent dans les pays en développement que dans les pays avancés, si bien que le retard dans l'adoption des technologies établies, telles la médecine nucléaire, ne fait que s'accroître.

Les prévisions pour l'avenir

Il semble que l'avenir de la médecine nucléaire et des appareils de visualisation se présente différemment pour les pays en développement et pour les pays avancés. La

composition de la morbidité et les problèmes cliniques de ces deux mondes diffèrent sensiblement. En outre, les ressources disponibles pour l'installation et l'entretien de services médicaux modernes ne sont pas du même ordre, tant dans l'absolu que relativement. Il est hasardeux et peu réaliste de chercher à prévoir la suite d'une évolution qui, au cours de sa courte histoire, s'est révélée à la fois capricieuse, précipitée et commandée par des événements et des innovations imprévus.

Dans les pays les plus avancés du monde, il se peut fort bien que l'expansion et le perfectionnement de l'équipement nucléaire médical subisse un ralentissement au cours des années à venir. Il est également possible que l'apparition d'autres techniques de visualisation intéressant le diagnostic clinique et un revirement de l'opinion publique quant aux applications nucléaires viennent freiner l'impulsion qui a amené la médecine nucléaire à son degré actuel de perfectionnement.

Il est probable que l'on cherchera à associer la caméra Anger à des ordinateurs encore plus puissants, afin d'optimiser la visualisation en continu, et d'améliorer l'analyse de l'exploration dynamique. Avec l'adjonction des processeurs vectoriels, la tomographie à photon unique permettra peut-être d'obtenir des images plus nettes et s'imposera comme technique de routine. Par ailleurs, la mise au point de produits radiopharmaceutiques de haute spécificité contribuera beaucoup à élargir le champ des études cliniques.

Tandis que le scintigraphe à balayage se voit progressivement remplacé par la caméra gamma dans les pays en développement, on constate une nette tendance à associer des ordinateurs aux caméras gamma en service. Cette combinaison ouvre de nouveaux champs d'application, notamment en cardiologie nucléaire. La tomographie informatisée à photon unique commence tout juste à s'installer dans les centres de médecine nucléaire les plus modernes de ces pays.

L'acquisition de matériel nouveau suscite en général plus d'enthousiasme que l'entretien du matériel existant. Néanmoins, des ateliers de réparation et d'entretien bien organisés seront un atout de toute première importance, tant pour assurer la continuité du développement des services de médecine nucléaire clinique, que pour former les ingénieurs électroniciens. Le relèvement du niveau de compétence local, outre qu'il permettra à coup sûr de réaliser des économies, aidera les pays à mieux assurer leurs propres besoins.

S'il est vrai qu'en médecine nucléaire le progrès appelle le progrès, encore faut-il que les problèmes cliniques à résoudre et la mesure dans laquelle leur solution contribue à l'amélioration de la santé publique en général, viennent justifier les moyens mis en œuvre, qu'il s'agisse de ressources humaines ou d'autres ressources tout aussi précieuses. C'est seulement en veillant soigneusement à maintenir la qualité des examens et en faisant le bilan comparé des dépenses et de leur impact social que la visualisation nucléaire à des fins médicales conservera son utilité et son attrait dans le domaine des applications de l'atome pour la paix.

