

La médecine nucléaire et la révolution de l'électronique

par R.A. Dudley*

En médecine nucléaire, diagnostic et recherche s'effectuent à l'aide de radionucléides. C'est l'un des premiers usages qu'on en ait faits et c'est probablement aujourd'hui encore le plus fréquent. Trois facteurs sont à l'origine des rapides progrès réalisés dans ce domaine depuis qu'il a fait son apparition, il y a un demi-siècle: des inventions ingénieuses comme celles de l'analyse radio-immunologique et de la reconstitution par ordinateur des images de rayonnement, pour lesquelles des spécialistes de la physique médicale ont reçu le prix Nobel dans les années 70; l'emploi, inauguré pendant les années 60, de radionucléides plus efficaces (par exemple ^{99m}Tc et ^{125}I); enfin, le déferlement incessant des progrès de l'électronique, qui a transformé presque toutes les techniques. Ce dont il est question ici, c'est son impact sur la médecine nucléaire et plus particulièrement sur le programme de l'Agence dans ce domaine.

Les transformations qu'ont subies depuis 25 ans les instruments de transmission d'images illustrent l'impact de la révolution de l'électronique sur la médecine nucléaire. On administre au patient le radionucléide approprié qui émet des rayons gamma: le rôle du dispositif de transmission de l'image sera ensuite de déterminer de quel point du corps il y a émission de rayons gamma et par conséquent comment le radionucléide s'est réparti dans l'organisme. L'image de cette répartition peut révéler l'emplacement d'une tumeur ou la région du poumon qui n'est plus irriguée ou encore (si l'on en suit l'évolution un certain temps) l'état du cycle de pompage du cœur.

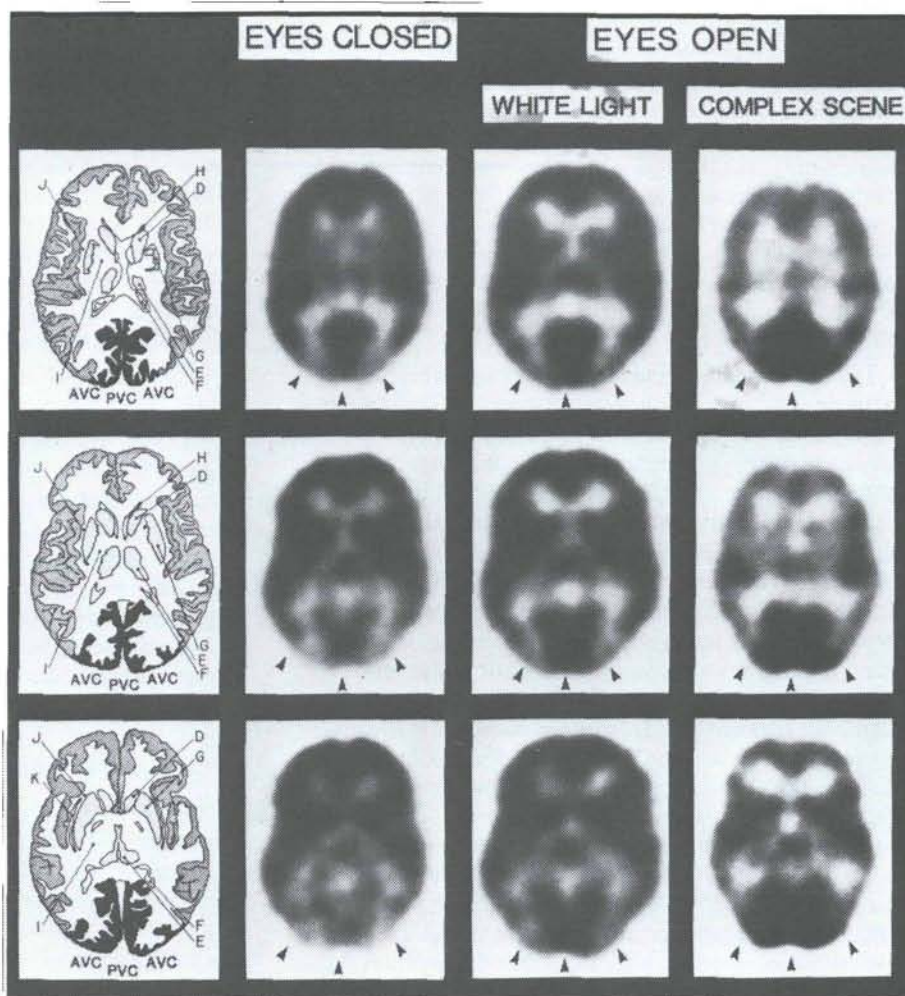
Le premier appareil automatique de transmission d'images a été le «scanner rectiligne», commercialisé au milieu des années 50. On a suspendu au-dessus de la région du corps à examiner un petit détecteur à scintillation (cristal d'iodure de sodium de 2,5 cm de diamètre relié à un tube photomultiplicateur) muni à l'avant d'un collimateur en plomb pour empêcher tout rayonnement orienté autrement que le long de son axe d'atteindre le détecteur. On a imprimé à ce dernier un mouvement lent de va-et-vient au-dessus du corps de manière à explorer successivement tous les points d'un champ rectangulaire. Les impulsions électroniques produites par les rayons gamma qui venaient frapper le détecteur, quand on estimait qu'elles avaient l'amplitude voulue, actionnaient une plume fixée au détecteur, qui inscrivait des points sur une bande de papier. A la fin de l'opération de mesure, le papier était parsemé de points qui représentaient, sur deux dimensions, la répartition du radionucléide dans le corps. La représentation

obtenue était très approximative pour plusieurs raisons: collimation incomplète; rayons gamma détectés en nombre insuffisant pour définir la configuration de la répartition; absence de renseignements sur la troisième dimension. Elle pouvait toutefois être utile sur le plan médical à condition que la configuration de la répartition ne change pas sensiblement pendant les 15 à 30 minutes que durait l'opération de mesure. L'appareillage était simple — quelques dizaines de tubes à vide — et les fonctions aussi: amplification des impulsions, sélection de l'amplitude, comptage et alimentation électrique.

Au début des années 60, un nouvel appareil de transmission d'images fait son apparition: la caméra gamma. Vingt ans plus tard et après de nombreux perfectionnements, elle reste le premier instrument de transmission de l'image dans les pays développés, alors que les scanners rectilignes sont toujours en majorité dans les pays en développement. La caméra gamma est aussi munie d'un détecteur qui est en cristal d'iodure de sodium, mais d'un plus grand diamètre (atteignant aujourd'hui 50 cm); il est fixe et relié à un grand nombre de photomultiplicateurs. Il a lui aussi un collimateur en plomb comportant de multiples orifices adjacents qui permettent à chaque point de la face du détecteur de «voir» uniquement la partie du corps qui se trouve exactement en face de lui. Tout comme dans le scanner, chaque rayon gamma qui vient frapper le détecteur engendre une impulsion électrique. Le dispositif électronique doit toutefois examiner l'impulsion non seulement pour déterminer si son amplitude est acceptable, mais aussi à *quel endroit précis* le rayon gamma a frappé le détecteur. En d'autres termes, le décodage de la répartition dans l'espace se fait électroniquement et non par déplacement mécanique, comme avec le scanner. Enfin, la position, qui avait auparavant la forme d'un point flottant à la surface d'un écran de télévision, est maintenant d'ordinaire inscrite sur une carte dans une mémoire électronique. Le décodage électronique de la position offre de nombreux avantages. La totalité de l'organe (le cœur par exemple) se trouve immédiatement dans le champ de vision, de sorte qu'en enregistrant une succession rapide de cadres (par exemple, un par dixième de seconde) on obtient le répartition dans le temps aussi bien que dans l'espace du traceur dans le cœur en train de battre. En reliant la caméra à un ordinateur, on peut traiter électroniquement la totalité de l'image: comparer le comptage relevé dans une sous-région avec celui constaté dans une autre, ou avec celui de la même région dans le cadre précédent; à partir de là, on peut déduire automatiquement le tracé des contours et l'utiliser pour choisir les sous-régions intéressantes. Mais le décodage électronique a aussi présenté à l'origine quelques inconvénients: par exemple, les imperfections du détecteur ont entraîné une distorsion de l'image dans

* M. Dudley dirige la Section des applications médicales de la Division des sciences biologiques de l'Agence.

Sections du cerveau humain obtenues à l'aide de la caméra à positons et sur lesquelles on voit le cortex visuel lorsque les yeux sont fermés et ses modifications lorsqu'ils sont stimulés par une lumière blanche et lorsqu'ils sont exposés à une scène complexe dans un parc [extrait de M.E. Phelps et al, *Positron Computed Tomography*, dans *Medical Radionuclide Imaging* 1980, Vol.1, page 199, AIEA, Vienne (1980)].



l'espace. Ce sont cependant précisément les défauts auxquels l'électronique moderne peut remédier: on peut stocker une carte de la distorsion et l'utiliser pour corriger la position décodée de chaque rayon gamma enregistré.

Enfin, on a pu depuis 1975 environ déterminer au moyen d'autres modèles de détecteurs et de procédés informatiques supplémentaires la répartition tridimensionnelle des radionucléides dans le corps. (Le prix Nobel de médecine a, en 1979, récompensé la méthode informatique; les notions fondamentales étaient connues dès le début du siècle, mais leur application n'était pas possible sans l'ordinateur.) Si le radionucléide peut émettre des positons, il devient possible de construire des images à trois dimensions particulièrement bonnes. Le dernier perfectionnement réalisé dans ce domaine est probablement la «caméra à positons». Avec une résolution spatiale d'environ 10 mm, on a pu obtenir une image à trois dimensions du taux du métabolisme du glucose dans diverses régions du cerveau ainsi que le rapport de ce taux avec ce à quoi pense le sujet au moment de l'observation.

Les instruments de transmission d'images mentionnés ci-dessus couvrent une large gamme technologique. On notera par exemple qu'un scanner, une caméra gamma reliée à un ordinateur et une caméra à positons coûtent environ 25 000, 200 000 et 1 million de dollars respectivement.

Vingt-cinq années d'évolution

Ce sont avant tout les progrès de l'électronique qui ont permis de mettre à profit la plus grande capacité des instruments de transmission d'images. A l'époque des premiers scanners, l'élément électronique essentiel était le tube à vide, qui coûtait quelques dollars, mesurait quelques centimètres, consommait quelques watts et durait entre quelques mois et un an ou deux. Il a été remplacé vers la fin des années 50 par le transistor, qui coûtait quelques dollars, mesurait quelques millimètres, consommait quelques dixièmes de milliwatts et durait des années. Au début des années 60, le transistor discret a été remplacé à son tour par le «circuit intégré», plusieurs composants de base — transistors, résistors, capacitors — étant façonnés ensemble et reliés entre eux sur un fragment de silicium. Il n'était plus nécessaire de relier à la main chacun des composants. Ce processus d'«intégration» se poursuit sans relâche. Depuis 1960, le nombre des composants d'un seul circuit intégré double presque chaque année, et il est aujourd'hui de l'ordre du million. Chose remarquable, le prix, la dimension, la consommation de courant et la probabilité de panne d'un circuit intégré sont restés à peu près les mêmes que pour les premiers transistors, ce qui signifie que, pour chaque transistor ou fonction logique, ils sont des milliers de fois inférieurs à ceux de 1960. Par ailleurs, la vitesse de fonctionnement du circuit a considérablement augmenté.

Non seulement les circuits sont devenus de plus en plus compacts, avec les avantages qu'on vient d'indiquer, mais leur organisation logique s'est transformée, en particulier depuis l'apparition du microprocesseur vers 1970. Un microprocesseur correspond à l'unité centrale de traitement (UCT) d'un ordinateur logée sur une seule plaquette de silicium. A l'origine, il a fallu ajouter beaucoup de circuits intégrés supplémentaires (minuterie, mémoire, interface, etc.) pour obtenir un ordinateur complet, mais aujourd'hui tout le système peut être fabriqué sur une seule plaquette de silicium de quelques millimètres de côté.

Les instruments de médecine nucléaire fabriqués à partir de ces composants remarquablement perfectionnés ont répondu à la demande du marché dans les pays développés. On peut noter trois grandes tendances. Premièrement, quelle que soit la catégorie d'instruments, le jeu du marché a eu pour effet, non pas une performance constante à des prix très réduits, mais une performance bien meilleure à des prix à peu près constants. La réduction de la fréquence des pannes est particulièrement importante pour les pays en développement. Deuxièmement, le progrès technique permet périodiquement l'apparition de nouvelles catégories d'instruments (par exemple: scanner, caméra gamma, caméra à positons) qui peuvent être mis sur le marché à des prix beaucoup plus élevés. Troisièmement, presque tous les instruments sont conçus aujourd'hui autour du microprocesseur, de sorte que la conception de l'instrument n'est plus dominée par l'aspect matériel (l'appareillage) mais par le logiciel (les programmes d'ordinateur). S'il est probable que ces tendances se maintiendront un certain temps, la révolution sous-jacente, elle, a des chances de durer des années; les usagers des instruments et leurs servants doivent donc dresser leurs plans en tenant compte des transformations rapides qui vont se poursuivre.

La médecine nucléaire et le programme de l'Agence

Devant cette révolution de l'électronique et son impact sur la médecine nucléaire, quelle attitude constructive peuvent adopter les pays en développement et l'Agence qui a pour rôle de répondre à leurs besoins? Cela revient à peu près à vouloir boire à même une lance d'incendie. Mais avant de se laisser décourager par les difficultés, il faut se rendre compte que l'impact essentiel est très favorable et l'on peut espérer qu'on pourra le rendre plus favorable encore.

En 1975, la Section des applications médicales de l'Agence a expressément fait figurer les instruments dans son programme. Elle a notamment entrepris de se rendre dans quelque 200 laboratoires d'Asie, d'Amérique latine et d'Afrique afin de savoir quels instruments ils utilisaient, quels étaient leurs problèmes d'entretien au cours d'une période de six mois et comment ils étaient résolus. L'Agence fournit chaque année, dans le cadre de ses contrats de coopération et de recherche techniques, pour plusieurs centaines de milliers de dollars de matériel de médecine nucléaire. Elle a entrepris des projets de coopération technique et passé des contrats de recherche portant directement sur les instruments de médecine nucléaire, et spécialement sur le contrôle de leur qualité et leur entretien. L'Agence s'occupe de former des spécialistes de l'entretien. Enfin, son laboratoire peut faire l'essai d'idées et d'appareils nouveaux.

Une des conséquences qu'entraîne inévitablement dans les pays en développement la révolution par l'électronique des instruments de médecine nucléaire est que ces instruments prennent du retard sur ceux des pays plus développés. Ceci, pour des raisons purement financières parce qu'ils ne peuvent être réformés aussi fréquemment, mais aussi — ce qui est plus important — parce que les nouveaux instruments qui sont mis sur le marché sont souvent chers et que ces pays n'ont pas les moyens de les acheter. Les scanners coûtant cinq fois moins que les caméras gamma, les laboratoires des pays en développement ont continué à en acheter alors que ces appareils sont pratiquement abandonnés dans les pays développés.

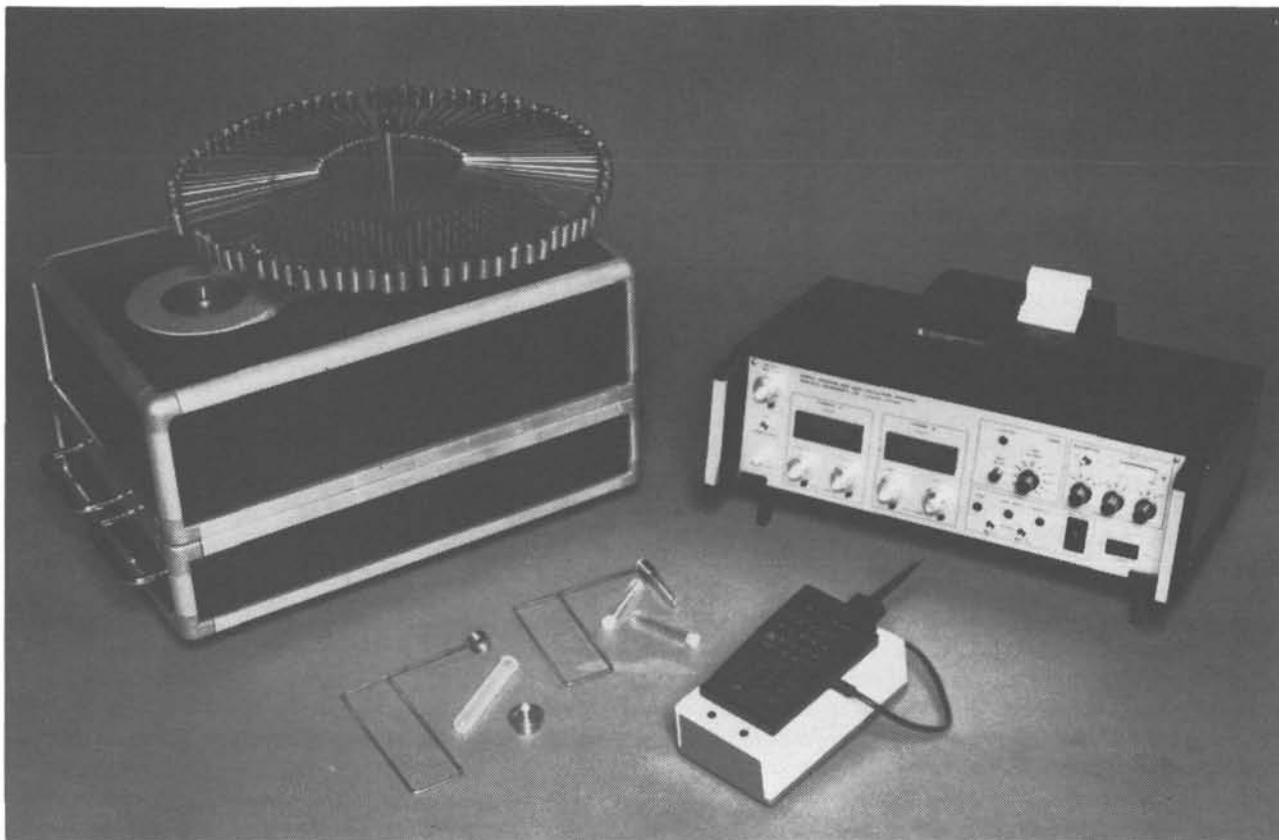
Le retard pris par l'équipement se répercute sur la formation. Un boursier d'un pays en développement formé aujourd'hui dans un pays développé à la transmission de l'image n'a guère de chances de voir un scanner, alors que c'est probablement le seul instrument dont il disposera quand il rentrera dans son pays. De plus, le matériel existant dans un laboratoire trouve probablement son application dans toute une gamme de techniques qui vont du microprocesseur aux premiers circuits intégrés, ce qui complique considérablement le problème des pièces de rechange et de l'apprentissage de l'entretien.

L'entretien préventif

Malgré la fiabilité accrue des appareils modernes, le problème de l'entretien conserve toute son importance. Il ressort d'une enquête réalisée par l'Agence qu'il y a en permanence de 15 à 20% d'instruments hors d'usage et ces chiffres sont probablement inférieurs à la réalité. Il est utile à ce propos d'examiner séparément l'entretien préventif et la réparation.

L'environnement dans lequel les instruments sont utilisés dans les pays en développement est moins favorable que celui pour lequel ils ont été conçus. Les températures élevées sont plus nuisibles au fonctionnement des circuits intégrés qu'à celui des tubes à vide, et les sautes brusques de température (par exemple l'élévation provoquée par une panne de climatiseur) peuvent détériorer le détecteur d'une caméra gamma. Une forte humidité, soit naturelle soit provoquée par un refroidissement de l'air non accompagné d'une déshumidification, peut avoir des conséquences plus graves encore. Le sable, les insectes et les rongeurs peuvent également jouer un rôle. Le problème le plus sérieux est probablement celui du courant électrique. Les circuits intégrés sont beaucoup plus facilement endommagés par des surtensions que ne l'étaient les instruments à tubes à vide et ces incidents sont beaucoup plus fréquents dans les pays en développement que dans les pays développés.

L'Agence applique actuellement un projet de coopération technique interrégionale et a signé une série de contrats de recherche pour l'amélioration de l'entretien. Dans une vingtaine de pays, un coordonnateur national a été chargé de surveiller l'exécution du programme et deux ou trois laboratoires pilotes ont été désignés pour étudier les possibilités d'amélioration. L'accent est mis en particulier sur les problèmes d'environnement, car on pense qu'il y a là des risques qui peuvent en grande partie être éliminés. On encourage les laboratoires à surveiller les températures, les degrés d'humidité et les tensions, et on leur fournit au besoin les instruments de mesure.



Version commerciale du compteur automatique pour la mesure de la radioactivité des échantillons émetteurs gamma, mis au point au Laboratoire de l'Agence à Seibersdorf à partir d'éléments simples et peu coûteux.

Le niveau hygrométrique est particulièrement surveillé. On fournit aussi des appareils de contrôle de l'alimentation en courant électrique, dont l'emploi est encouragé: il s'agit entre autres des régulateurs de tension, des dispositifs d'antisurvolage et des rupteurs qui mettent les instruments hors circuit en cas de panne de courant, ce qui les protège contre les survoltages qui accompagnent généralement le rétablissement du courant. En prenant soigneusement ces précautions, de nombreuses défaillances peuvent être évitées.

Au stade actuel de la révolution électronique, les réparations, dans les pays développés, sont d'ordinaire exécutées par l'agent du constructeur chargé de l'entretien, qui est souvent seul à posséder les qualifications, les appareils de contrôle et les pièces de rechange nécessaires. Ce service fait souvent l'objet d'un contrat d'entretien, qui constitue une manière d'assurance et qui coûte par an entre 5 et 10% du prix de l'appareil. Le prix est d'ordinaire plus élevé dans les pays en développement en raison des frais de voyage occasionnés par leur éloignement. Pour cette raison et aussi parce qu'ils sont obligés d'économiser l'argent et qu'il leur est difficile d'engager des dépenses pour plusieurs années, ces pays passent peu de contrats d'entretien et l'on trouve rarement sur place un agent du fournisseur quand on en a besoin.

Il est souvent difficile de réparer en ayant recours aux seules ressources locales. La réparation des pièces principales des appareils modernes est souvent impossible et il faut remplacer le composant ou le tableau défectueux. Cela dit, il faut tout de même pouvoir disposer de

personnes sachant localiser la pièce défectueuse, et certain éléments mécaniques ou électroniques peuvent toujours être réparés sur place par des personnes qui savent le faire et à qui l'expérience a donné confiance en elles-mêmes.

Chercher à se procurer des pièces de rechange est l'un des aspects les plus décevants de l'entretien. Vu la grande diversité de l'électronique moderne et le groupement des fonctions dans des circuits intégrés invisibles ou sur des plaquettes de circuits imprimés, il n'est plus guère possible de trouver les pièces sur place. Alors que la commande au constructeur peut être transmise à la vitesse de la lumière et la pièce expédiée à la vitesse du son, les lenteurs de la bureaucratie douanière et du contrôle des changes peuvent entraîner des mois de retard, même lorsqu'il s'agit d'une somme insignifiante. Stocker des pièces ne servirait à rien car la majeure partie du stock restera inutilisée. De très rares laboratoires se font ouvrir un compte chez leurs fournisseurs, dans une banque étrangère ou dans une institution sœur et s'arrangent pour faire accélérer les procédures douanières; leur exemple mériterait d'être suivi. L'Agence s'efforce d'organiser la fourniture de pièces de rechange aux laboratoires qui participent au programme d'entretien. Les commandes sont adressées à un fournisseur central situé dans un emplacement stratégiquement favorable et travaillant avec des capitaux mis à sa disposition par l'Agence. Chaque laboratoire peut continuer à participer à condition de rembourser ces fonds. Il s'agit de mettre cette méthode à l'essai et de faire savoir aux laboratoires qu'ils peuvent se procurer facilement des pièces, en espérant qu'ils finiront par en prendre l'habitude.

L'Agence favorise la formation d'ingénieurs et de techniciens de l'électronique par plusieurs moyens et notamment par l'octroi de bourses et par des stages. Le programme des cours doit être constamment actualisé pour tenir compte de la révolution électronique qui, en un peu plus de dix ans, a fait succéder l'ère du logiciel à celle du matériel. Mais les techniciens qualifiés de l'électronique sont à ce point recherchés en raison de la pénétration de cette discipline dans tous les domaines d'activité que beaucoup de stagiaires de l'Agence ne tardent pas à être enlevés à leurs premiers employeurs (du moins lorsqu'il s'agit d'établissements médicaux). Pour remédier à cette situation sans issue, l'Agence a entrepris de faire figurer dans son programme relatif à la médecine nucléaire des stages de formation des formateurs. Si le personnel électronique compétent des centres nationaux parvient à s'agrandir en formant des collègues sur place, on pourra assurer de façon plus rentable la formation d'un plus grand nombre de spécialistes à l'étranger.

En dernière analyse, l'entretien pose des problèmes qui relèvent peut-être moins de la technologie que de la psychologie (la volonté de disposer d'un instrument qui fonctionne) et de l'organisation (la mise en œuvre des moyens disponibles). On encourage chaque laboratoire pilote à élaborer un plan d'entretien, à inventorier ses propres besoins ainsi que les ressources existant dans le laboratoire lui-même ou au sein de la collectivité, à prévoir des crédits pour l'achat de pièces de rechange et à former son personnel aux tâches essentielles. Peut-être l'Agence devrait-elle procéder de même de son côté. Lorsqu'elle fournit du matériel, s'assure-t-elle par exemple qu'il sera couvert par un contrat d'entretien passé par le destinataire ou par l'Agence, ou du moins que des fonds auront été déposés pour permettre à l'utilisateur de se procurer rapidement des pièces? Elle ne le fait que rarement.

L'auto-assistance

Très rares sont aussi les pays en développement où des appareils importants peuvent être construits dans les principaux laboratoires, et encore moins fabriqués dans l'industrie et disponibles dans le commerce. Face à l'évolution rapide de la technique, il est difficile et coûteux d'actualiser constamment les connaissances, les composants et les appareils d'essais et il n'y a guère intérêt à construire des instruments qui sont déjà périmés. On est cependant tenté de penser que la phase actuelle de la révolution électronique pourrait ouvrir des horizons nouveaux à la construction. On a évalué à 80% du coût d'un instrument la part que représente aujourd'hui non pas le matériel, mais le logiciel (qui nécessite avant tout de la matière grise). L'impossibilité de se procurer le matériel ou les devises nécessaires pour l'acheter devrait donc, dans les pays en développement, être aujourd'hui un obstacle moins grand que dans le passé.

Le Laboratoire de l'Agence a entrepris à ce propos un projet destiné à la fois à fournir un instrument utile et à mettre à l'épreuve le principe de l'auto-assistance. S'il est impossible de concevoir et de construire à partir de zéro un système d'instruments hautement performant et si l'achat à l'étranger de pièces détachées soulève des

difficultés administratives insurmontables, peut-on assembler un instrument adapté aux conditions locales à partir de produits de consommation de haute technologie qu'on trouve sur le marché? Beaucoup de laboratoires de médecine nucléaire ont besoin avant tout d'un compteur automatique qui sert à mesurer la radio-activité d'échantillons émetteurs de rayons gamma, par exemple ceux qui sont produits par milliers chaque année dans les procédures de radioimmunologie. Le Laboratoire de l'Agence a conçu, construit et distribué plusieurs de ces compteurs à des laboratoires de pays en développement. Le compteur proprement dit ne se trouve pas sur le marché, mais nombre de laboratoires des commissions nationales de l'énergie atomique peuvent le construire. Dans sa configuration actuelle, il comporte un détecteur-puits à scintillation, deux analyseurs de hauteur d'impulsion à canal unique, deux échelles de comptage, un débitmètre et un microprocesseur. Le changeur automatique d'échantillons est, lui, un article courant: c'est un de ces projecteurs de diapositives Kodak à carrousel qui coûtent 250 dollars et dont on use et abuse largement dans le monde entier.* Le dispositif de traitement des données et de contrôle se trouve lui aussi dans le commerce: c'est un calculateur programmable HP-41CV Hewlett-Packard qui, avec ses accessoires, coûte 1 000 dollars. Lorsque tout cela est assemblé, le microprocesseur actionne intérieurement le compteur tandis que le calculateur commande le changement d'échantillons et effectue le traitement des données. De l'avis personnel de l'auteur, le traitement des données est meilleur qu'avec tout autre système orthodoxe de comptage qu'on trouve aujourd'hui dans le commerce. En cas de panne du changeur d'échantillons et du calculateur, on peut actionner le compteur manuellement. Si le changeur d'échantillons seul tombe en panne, le traitement des données peut toujours se faire automatiquement sur des échantillons changés à la main. Le compteur et le calculateur sont alimentés par des piles rechargeables, ce qui les met pratiquement à l'abri des perturbations du courant et, notamment, des coupures qui se prolongent pendant quelques heures. Si le courant vient à manquer pendant une passe automatique, ce qui interrompt le changement d'échantillons, le microprocesseur garde la mesure en attente, sans erreur, jusqu'à ce que le changement d'échantillons puisse reprendre. La version commerciale de cet instrument coûte à peu près moitié moins cher qu'un compteur d'échantillons automatique normal.

La révolution continue

La révolution électronique a apporté et continuera d'apporter de rapides transformations aux instruments de médecine nucléaire, qui ont beaucoup gagné en capacité et en fiabilité. Les avantages se sont accompagnés de quelques inconvénients dans les pays en développement, qui constituent un marché relativement petit, pour lequel les instruments n'ont pas été optimisés. L'adoption de plusieurs mesures permet de remédier à ces inconvénients dans le domaine de la technique et dans celui de l'organisation, et l'Agence s'emploie à l'encourager.

* L'emploi du projecteur de diapositives a été proposé par W.J. Palenscar.