

De la mesure à la robotique

Recherches médicales et scientifiques

au Centre Hospitalier Universitaire de Grenoble – 1960 -2000

Le document est disponible dans la collection de l'ACONIT, Association pour un conservatoire de l'informatique et de la télématique, Grenoble. Il a été mis à disposition sur la Base de Données du Patrimoine Scientifique et Technique PSTC-Rhône-Alpes-sud, fiche n°731.

Cette Fiche a été versée sur la Base de Données de la mission nationale PATSTEC du Patrimoine Scientifique et Technique, sous le numéro d'inventaire ACONIT/PSTC n° 731.

Le document est un texte imprimé en couleur de 93 pages, avec de très nombreuses photos.
De couleur orange, il est de format 24 cm, 17 cm, 5 mm.

Ce document est une réalisation de l'association du Musée grenoblois des Sciences Médicales, et a été publié à l'occasion d'une exposition présentée à Grenoble de février à octobre 2007.

Cette exposition visait à susciter de l'intérêt pour les grandes découvertes de la recherche médicale grenobloise dans les domaines des explorations et des thérapeutiques des malades.

L'objectif du document est d'apporter des éléments concrets témoignant de la participation des équipes scientifiques et médicales de Grenoble à cette aventure médicale au service de l'Homme.

Le document présente :

- Les témoignages des décisionnaires qui ont porté cette aventure : Jean Perret, Président de l'Association du Musée grenoblois des sciences médicales ; Jean Debeaupuis, Directeur général du Centre Hospitalier Universitaire de Grenoble (CHU-G) ; Professeur Michel Soutif, Président de l'Université scientifique et médicale Grenoble I, de 1971 à 1976 ; Michel Destot, ancien Maire de Grenoble, Président du Conseil d'administration du CHU de Grenoble ; Jean Therme, Directeur général du CEA de Grenoble ; Corinne Mestais, responsable du programme Technologie pour la santé au CEA de Grenoble.
- Trois grands chapitres : La mesure ; L'imagerie ; L'informatique
 - La mesure : pour le recueil de signaux physiques d'origine physiologique humaine, leur enregistrement, leur mesure et leur analyse.
 - L'imagerie : Après plus d'un demi-siècle de radiographies par rayons-X arrivent les nouvelles possibilités, avec en particulier les « scanners » et l'IRM.
 - L'informatique : DOSTAM (Dossier statistique de l'activité médicale) ; SIHI (Système d'information hospitalier intégré) ; la GMCAO (Gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateurs) ; la modélisation mathématique ; la stimulation cérébrale profonde et la robotique neurochirurgicale ; l'analyse microscopique cellulaire

Le présent PDF fournit, dans les pages suivantes, une copie du chapitre 02 « L'imagerie » :

D'autres fichiers PDF dans la présente fiche documentaire ACONIT/PSTC donnent des extraits d'autres chapitres de ce document, avec pour certains des compléments bibliographiques.

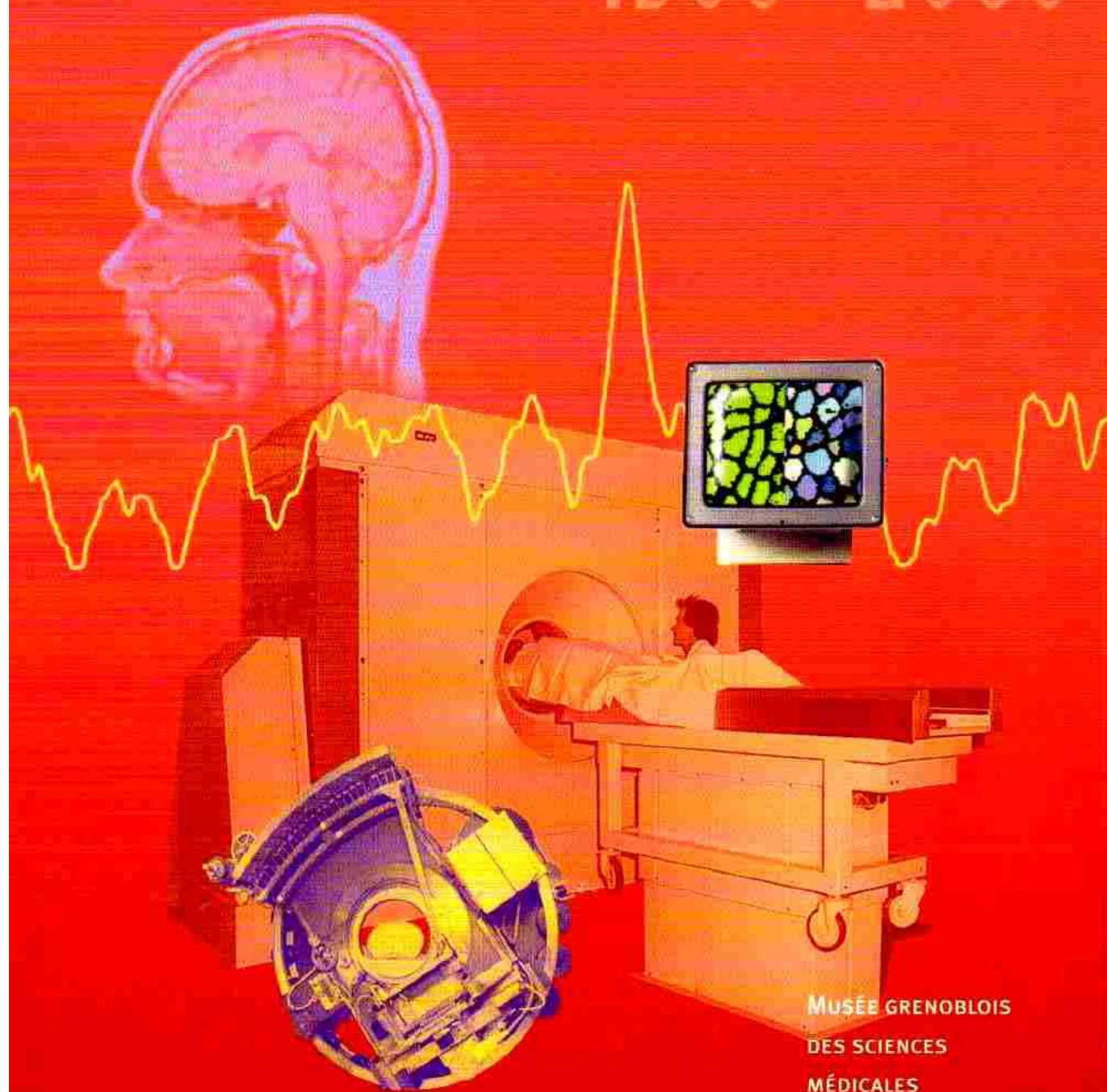
Pour utiliser cet article, mentionnez le Musée grenoblois des sciences médicales, ainsi que la Base de Données Aconit.org, section PSTC n° 731.

Il est rappelé que la loi sur les droits d'auteur n'autorise que les reproductions partielles de documents à titre individuel et pour des motifs de recherche.

De la mesure à la robotique

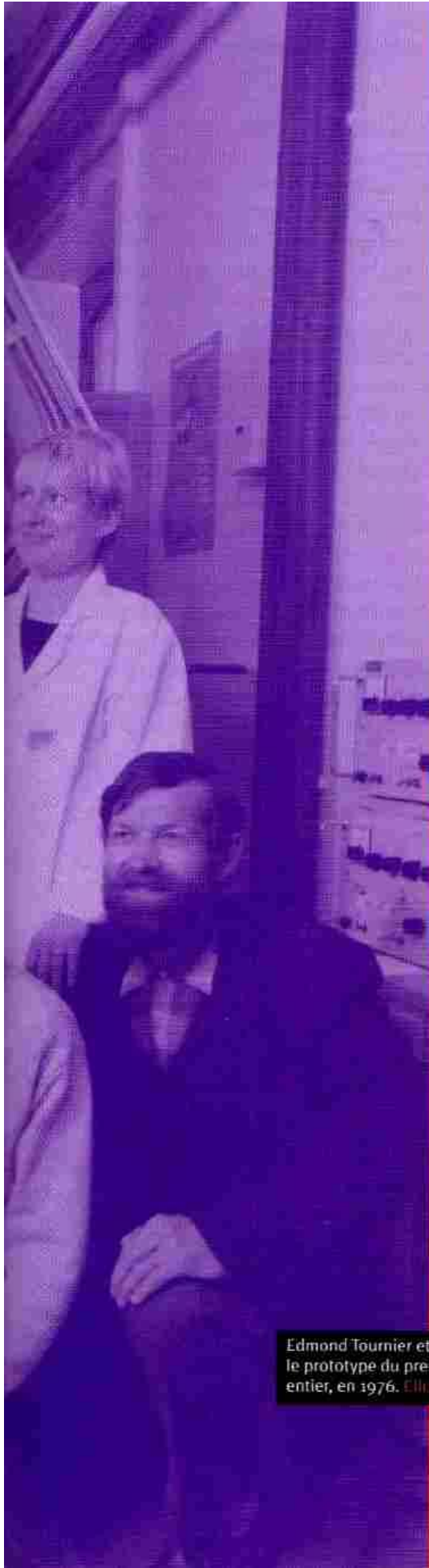
recherches médicales et scientifiques
au Centre Hospitalier Universitaire de Grenoble

1960-2000



MUSÉE GRENOBLOIS
DES SCIENCES
MÉDICALES

9	<i>Éditorial</i> Jean Perret
10	<i>Préface</i> Jean Debeaupuis
13	<i>Avant-propos</i> Michel Soutif
14	<i>Avant-propos</i> Michel Destot
17	<i>Introduction</i> Roger Sarrazin
19	01 LA MESURE
20	La rhéographie : l'exploration des artères
23	La rhéopléthysmographie occlusive : l'exploration de la fonction veineuse
26	La microcirculation et la capillaroscopie
28	La mesure de l'activité électromagnétique du cœur ou magnétocardiographie
30	Les mesures à distance par matériel implanté
33	02 L'IMAGERIE
34	L'histoire du premier scanner français « corps entier » à Grenoble
45	L'histoire du développement de l'IRM au CHU de Grenoble
51	03 L'INFORMATIQUE
52	Le Dostam : l'informatique au service des malades, à Grenoble dès 1969
58	L'informatique au service de la recherche
62	Les GMCAO : des premiers balbutiements à la surgétique
73	Les temps du « Vax »
77	Histoire grenobloise de la découverte de la stimulation cérébrale profonde et du développement de la robotique neurochirurgicale
85	Des cellules sous l'œil des machines : les grenoblois innovent
91	<i>Conclusion</i>
93	<i>Postface</i> Jean Therme et Corinne Mestais



L'imagerie

02

Après avoir travaillé pendant plus d'un demi-siècle sur les radiographies acquises uniquement par rayons X, les médecins disposent de nouvelles possibilités d'imagerie médicale en combinant rayons X et informatique, sous le terme de tomodensitométrie, plus communément appelé scanner.

Dans les années soixante-dix, les premières coupes transversales du corps humain sont réalisées. Dix ans plus tard, grâce au phénomène de la résonance magnétique nucléaire combiné à l'informatique, des coupes plus complexes d'incidences plus variées sont obtenues sans les risques sanitaires liés aux rayons X. Les équipes du CENG-LETI et du CHU de Grenoble ont pris une place privilégiée dans le développement de ces méthodes.

Edmond Tournier et son équipe devant le prototype du premier scanner corps entier, en 1976. [Elle.fr CEA](#)

→ En 1966, quatre ans après la création de la faculté de médecine de Grenoble, Roger Sarrazin, chirurgien au Centre hospitalier régional, désireux de faire progresser ses méthodes de diagnostic, ressent l'intérêt de s'appuyer entre autres sur les avancées scientifiques et surtout technologiques préparées au Centre études nucléaires de Grenoble (CENG). Michel Cordelle dirige, depuis 1958, le service d'élec-

L'histoire du premier scanner français « corps entier » à Grenoble

ROBERT ALLEMAND* • MAX COULOMB

GILBERT FERRETTI • ROGER GARIOD* • JEAN-FRANÇOIS LE BAS

CORINNE MESTAIS* • EDMOND TOURNIER*

tronique de cette institution traditionnellement attachée au développement des coopérations avec les établissements du bassin grenoblois. Les nombreuses actions de ce service, dans le domaine biomédical, sont coordonnées au niveau national. Le centre hospitalier de Grenoble devient alors un partenaire privilégié.

CHU-CEA : le rapprochement de deux institutions

Le Centre hospitalier régional de Grenoble et le service d'électronique du CENG se rapprochent. Une réunion de travail en 1966 entre Roger Sarrazin, Edmond Tournier et Roger Gariod permet de définir un premier sujet qui aboutit à la mise au point de la « rhéopléthysmographie artérielle et veineuse » auxiliaire technologique du diagnostic vasculaire. Jean-François Piquard obtient sur ce sujet le grade de Docteur-ingénieur, et Michel Autones le grade de Docteur en médecine. Alain Franco poursuit la validation médicale de la méthode développée industriellement par la société ELA. En 1967, le service d'électronique du CENG devient le LETI et se voit conforté au niveau national dans ses secteurs de recherche en composants électroniques, matériaux, instrumentation et systèmes.

Après une première mission d'application de l'électronique aux grands programmes nucléaires militaires et civils, le secteur instruments et systèmes conforte son savoir faire en réalisant l'instrumentation des huit expériences de physique de l'Institut Laue Langevin (ILL), incluant les multidétecteurs de rayonnement, conçus par Robert Allemand. Une innovation dont bénéficieront les scanners X quelques années plus tard. Nombre de compétences ainsi acquises seront propices aux applications médicales envisagées :

- métrologie des faibles signaux,
- traitement du signal et des images,
- informatique en temps réel.

Colloque sur les méthodes et technologies appliquées au domaine biomédical, Grenoble, 1971.
De gauche à droite : Louis Néel, M. Benoît, Victor Delcroix, Roger Gariod, Robert Allemand, Michel Cordelle, Jacques de Rougemont, Charles Favier, Edmond Tournier, M. Ripart, Roger Sarrazin.



En 1971, sous l'égide de Guy Cabanel et Michel Geindre respectivement doyen et vice-doyen de la faculté de médecine, selon la loi Edgar Faure, la médecine et les sciences se regroupent dans une même faculté. Cette même année, Roger Sarrazin entame une collaboration concrète avec le LETI. Dans différents domaines médicaux – cardiologie, phlébologie, neurochirurgie, assistance respiratoire – d'autres études se développent alors entre des unités du CHU et du LETI. De jeunes ingénieurs passionnés par ce nouveau domaine biomédical, Jean-François Piquard et Jean-François Le Bas, entament parallèlement à leurs travaux de thèse au LETI, leurs études de médecine. Côté CHU, Louis-Alim Benabid déjà médecin et spécialiste en neurochirurgie complète sa formation de physicien en préparant une thèse scientifique en rapport avec sa spécialité en collaboration avec le LETI. Ce contexte nouveau conforte sur le plan national nos rapports avec de nombreuses unités médicales et comités nationaux de recherche.

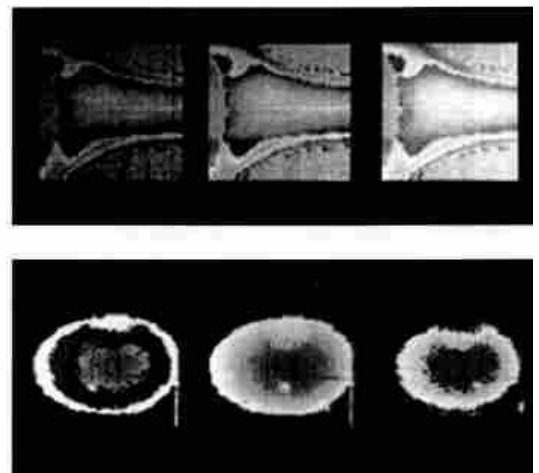
L'aventure du scanner peut commencer

Ou plutôt l'aventure du scanner peut recommencer, car déjà en 1967, l'idée de rendre quantitatives les observations d'une coupe radiologique telle une coupe de dissection, avait été évoquée au LETI. Cette idée n'avait pas fait l'unanimité car aucune des conditions essentielles à sa mise en œuvre n'était maîtrisée : ni les méthodes de reconstruction de l'image, balbutiantes, ni la métrologie numérique des rayonnements X, ni surtout l'encouragement du corps médical qui face à tant d'inconnues restait sceptique devant l'intérêt présenté par cette quantification de l'information radiologique. De plus, M. Terrier, responsable du centre de calcul du CENG de l'époque, estimait que le calcul et la représentation d'une image rustique définie par une matrice d'image de 100 points par 100 points, prendraient plusieurs heures de calcul.

Néanmoins, Victor Delcroix fait procéder à des radiographies numérisées, dans le cadre du travail de troisième cycle de M. Déchaux, *Amélioration du contraste en radiologie par un dispositif de balayage couplé à un détecteur*, soutenu en 1969. Le sujet en reste là, jusqu'au jour où Alim-Louis Benabid, en transit dans un aéroport, est intrigué par une annonce lue sur le napperon jetable de son déjeuner. Parmi les nouvelles brèves, l'annonce par EMI (société anglaise produisant par ailleurs les disques du groupe des Beatles) de la mise au point d'un scanner apte à visualiser des coupes tomographiques du crâne. Au courant des préoccupations du LETI, Alim-Louis Benabid, neurochirurgien, attire notre attention sur ces résultats scientifiques. Immédiatement, Edmond Tournier, accompagné d'Alim-Louis Benabid et de M. Lévy, stagiaire au LETI bien documenté sur la reconstruction des images, se rendent à Londres entre le 19 et le 22 mars 1973. Ils ont le privilège d'assister à la sortie des toutes premières images d'une coupe de cerveau sur un patient du Atkinson Morley's Hospital de Londres.

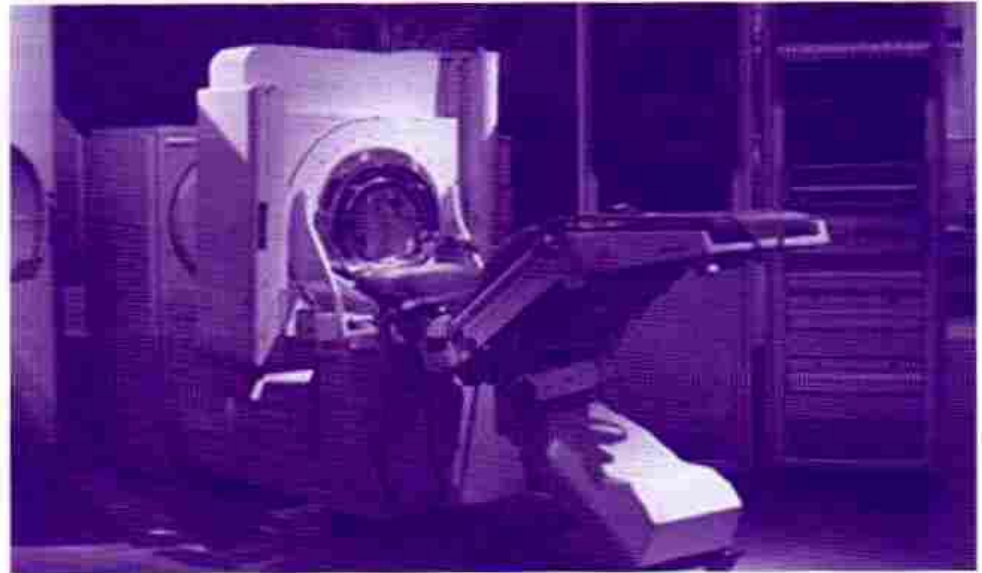
Admiratif devant cette innovation, Alim-Louis Benabid en confirme l'intérêt et Edmond Tournier en voit les limitations et surtout les améliorations possibles. Autour d'Edmond Tournier et de Robert Allemand, spécialiste de la détection nucléaire, et de quelques autres spécialistes de la reconstruction d'image, une réflexion s'orga-

Radiographies numériques d'un os et d'un œuf.





Le premier scanner
« crâne » et la
première image
d'une coupe de
cerveau.

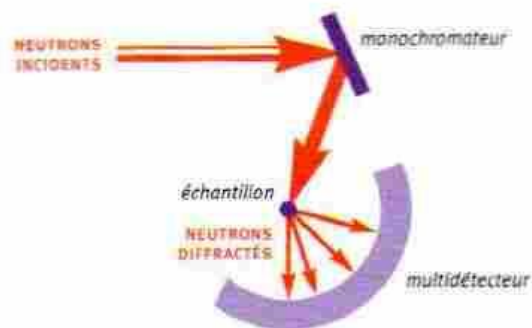


36

nise, plus approfondie que celle de 1967. La première amélioration possible est née de l'expérience acquise avec les physiciens de la recherche fondamentale du CENG puis plus largement avec ceux de l'Institut Laue-Langevin, spécialistes de la physique neutronique.

Dans leurs expériences de diffraction neutronique, un faisceau de neutrons en forme d'éventail est traditionnellement analysé par un détecteur unique que l'on déplace angulairement afin de mesurer, pour chaque angle, l'intensité du faisceau. L'idée nouvelle consiste à étudier un multidétecteur à n cellules remplaçant d'un coup n déplacements, avec l'avantage de disposer des n mesures dans le même temps. Ces multidétecteurs de neutrons sont remplis d'un gaz, le BF_3 sous pression. Celui-ci convertit le flux de neutrons reçus par chaque cellule en un courant mesurable proportionnel à ce flux. Cette technique fut un facteur de progrès important pour la diffraction neutronique.

Le principe
de la diffraction
neutronique
mesurée par
multidétecteur
à neutrons.
À droite, mise
au point du
multidétecteur
à rayons X.



Cette même idée est transposée au cas du scanner en utilisant non plus, comme dans la machine d'EMI, un détecteur et un faisceau unique, mais un faisceau de rayons X en éventail et un multidétecteur adapté à ces rayons. La nouvelle structure interne du multidétecteur contient un gaz sous pression, le xénon, capable de convertir des rayons X en courant mesurable.

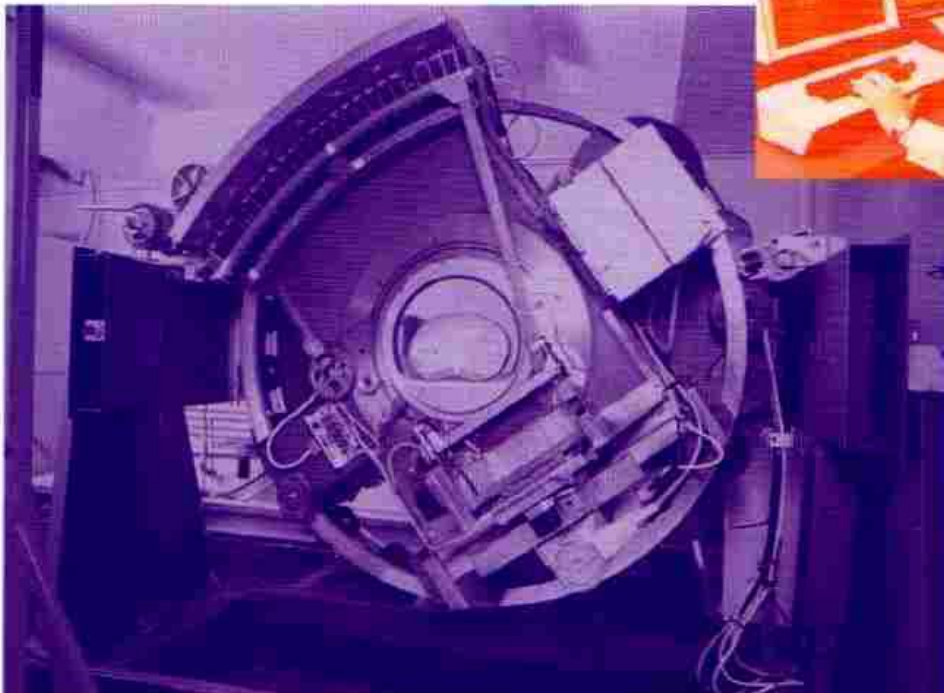
Des simulations numériques confirment les améliorations significatives entrevues :

- un multidétecteur peut avoir une dimension suffisante pour couvrir, sans translation, l'angle d'une coupe du corps entier ;
- des mesures plus précises des courants permettent d'éliminer la poche d'eau entourant le crâne du patient. Des méthodes de reconstruction utilisant des opérateurs de calcul rapides réduisent le temps de reconstruction de l'image donc de l'examen.

Les commissions nationales, non convaincues par cette innovation médicale ni donc, *a fortiori*, par les innovations technologiques que nous leur proposons (1973/1974), ne donnent pas de réponse à notre demande. Nous perdons un temps précieux dans l'avancement de nos études et dans la prise de brevets. Heureusement, Michel Geindre, chef du service de radiologie du CHU, conscient de l'intérêt de cette technique, nous met en contact avec le président de la CGR, M. Roger, lors d'un cocktail inaugural tenu par la CGR à Grenoble (février 1974). En une demi-heure, la décision de supporter une équipe de 15 personnes est prise. En effet, la CGR vient de lancer une série de plusieurs dizaines de scanners « crâne » sur le principe d'EMI. L'effort du LETI trouve rapidement son application industrielle. La CGR arrête sa série de scanners « crâne » lancés à la hâte, et les remplace par le ND 8000, génération de scanners « crâne » à deux mouvements, translation et rotation, mais équipé d'un multidétecteur grâce auquel il est 10 fois plus rapide.

Une coopération exemplaire avec Jean-Pierre d'Haenens, responsable du projet pour la CGR, s'amplifie autour d'un projet commun de scanner « corps entier », à simple rotation, le CE 10000. Michel Geindre est partant pour acquérir au CHU ce prototype mis au point au LETI avec la contribution industrielle de CGR. Il faut faire vite car General Electric (GE) travaille concurremment sur un projet identique. Le LETI rassemble

Prototype du premier scanner « corps entier » et console de commande, en 1976. Clichés CEA.



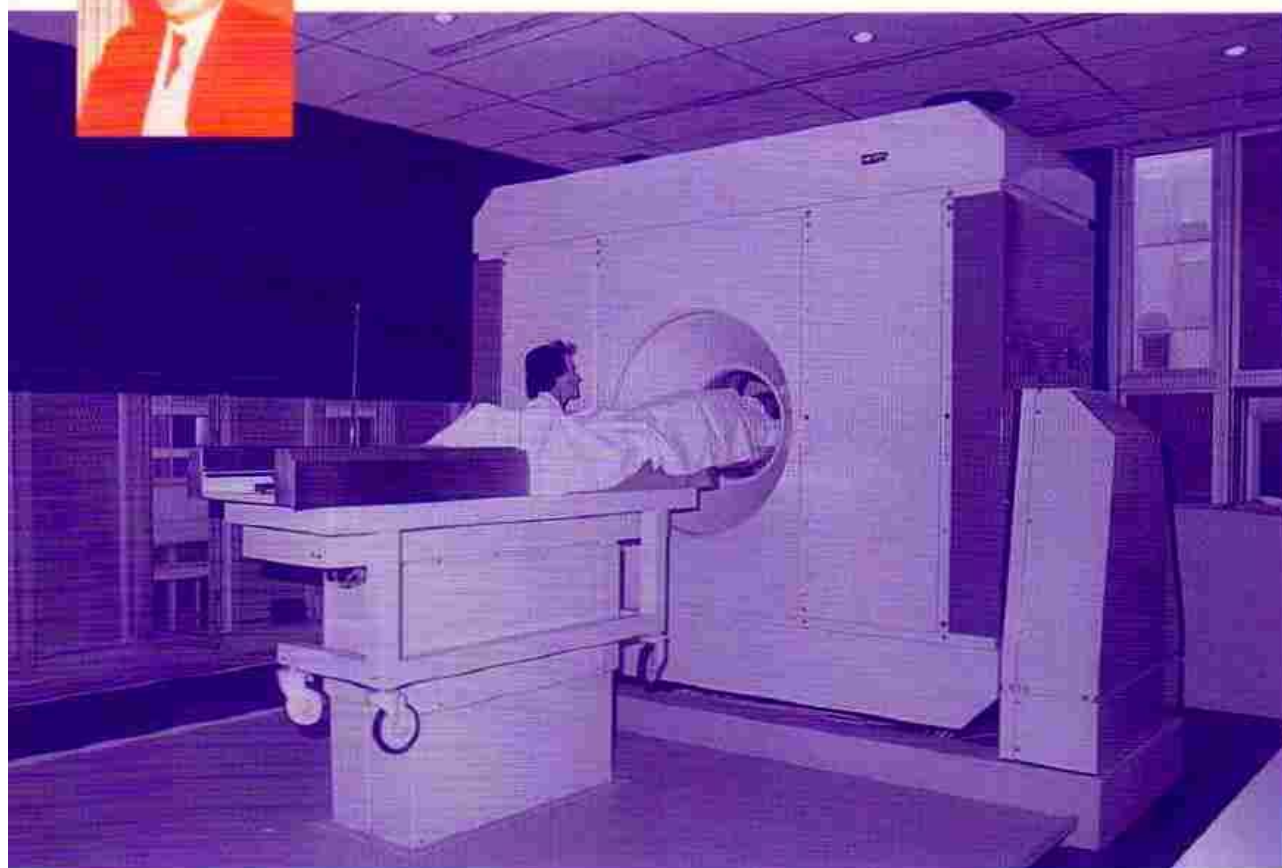
ses ressources technologiques pour résoudre dans la hâte les problèmes posés. Un « incident » survient : le manuscrit complet du projet disparaît au moment d'un repas. Mystère aujourd'hui encore inexpliqué...

- Le mutidétecteur passe rapidement de 200 à 400, puis à 1 000 cellules, car la définition des images doit être de plus en plus grande.
- Les courants fournis par chaque cellule du multidétecteur diminuent et accroissent les difficultés de métrologie.
- Les opérateurs de calcul rapide en structure câblée (transformateurs de Fourier), sont heureusement issus de travaux faits parallèlement avec la société Inter technique, leader en système de traitement du signal, et pallient le manque de puissance des ordinateurs conventionnels.
- Les méthodes mathématiques informatisées de reconstruction des images sont éprouvées par simulation dans le cadre de la thèse de M. Lévy.

Le professeur Michel Geindre, doyen de la faculté de médecine, chef du service de radiologie, et le CE 12 000, premier scanner français « corps entier », installé au CHU de Grenoble, en 1978.

38

Quelques mois plus tard, en 1976, un premier prototype de scanner « corps entier » fonctionne dans les caves du LETI. Il subit avec succès de nombreux tests physiques. Afin de faire bénéficier au plus vite les patients du CHU des possibilités du scanner, la direction du CHU autorise le transport au LETI de patients ne nécessitant pas de préparation médicale, afin qu'ils puissent y être reçus en tant que visiteurs. Messieurs Michel Geindre, Max Coulomb, Jean-François Le Bas, avec leurs patients, et plusieurs autres médecins non-radiologues, s'émerveillent devant ces premières visions anatomiques, dont l'intérêt diagnostique est immédiat.



Le mode de représentation des images, adopté alors par Alain Bouvier, informaticien aux commandes du système lors de ces examens, correspondait aux références des planches conventionnelles anatomiques auxquelles se référaient les médecins. Une inversion gauche-droite des images s'imposera ensuite selon les conventions en radiologie.

La formation bivalente de Jean-François Le Bas, qui a rejoint le CHU, est appréciée. Il réalise des dizaines d'examens, amenant les patients dans sa « 4L » personnelle. Lors d'un de ces examens, l'équipe du LETI est doublement émue. En effet, pour la première fois, on perçoit sans difficulté au milieu de l'image du foie la tâche suspecte redoutée. Le patient, lui-même médecin, veut voir le résultat, et l'opérateur ému coupe l'écran prétextant que les résultats qui nécessitent un temps de calcul ne lui seront remis que plus tard.

Avant son transport au CHU de Grenoble, le second prototype, dont on doit éprouver le fonctionnement, est installé dans un bâtiment provisoire du CENG à proximité du LETI. Conformé et installé par la CGR au CRHU en 1978, ce scanner a réalisé sans défaillance l'examen d'au moins 25 000 patients. Grâce à l'engagement de Michel Geindre, le CHU de Grenoble fut le premier hôpital français doté d'un scanner corps entier.

Suivra ensuite le CE 12 000, aux performances, en résolution spatiale et en vitesse, supérieures à la concurrence, et dont la CGR produira environ 350 exemplaires. Très tôt le service de radiologie du CHU du regretté Michel Geindre a pu se familiariser avec le fonctionnement d'un scanner corps entier. Son successeur, Max Coulomb, a pu très tôt grâce au scanner faire des publications avant-gardistes sur l'exploration pulmonaire.

Le scanner dans l'arsenal des moyens de la radiologie X

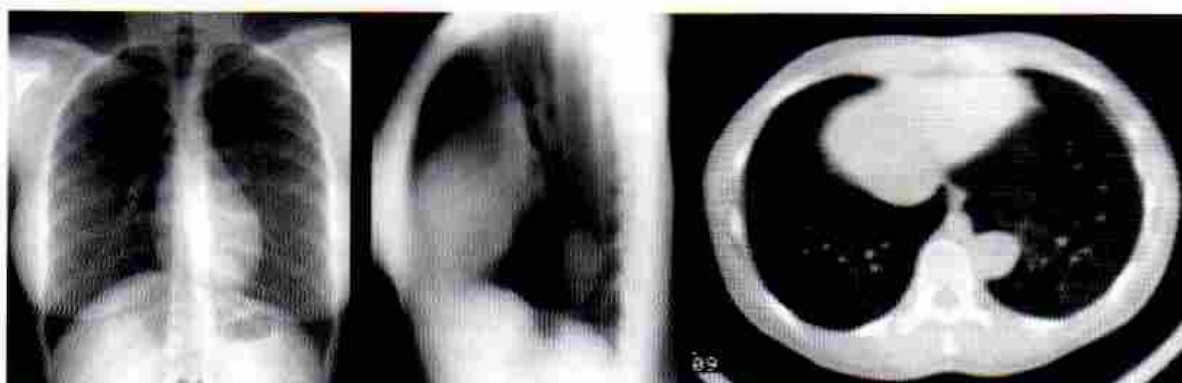
- **La radiologie conventionnelle.** La radiologie conventionnelle permet grâce à la semi-transparence du corps aux rayonnements X d'en projeter l'image sur un écran ou sur un film photographique. L'œil averti du radiologue expérimenté discerne l'anomalie recherchée dans la projection globale de l'image. L'énergie des rayons X est choisie, de 150 kV à 50 kV, selon la nature des zones plus ou moins denses, os ou tissus à observer.

- **La tomographie longitudinale analogique.** Différentes techniques tomographiques anciennes ont utilisé par exemple un glissement simultané et de sens opposés, de la source de rayons X et du film, centré sur la zone choisie. Le rehaussement du contraste dans cette zone, améliore sa vision. En effet, l'épandage des informations issues des parties en deçà et au-delà de la zone choisie, y estompent leur influence. Les scanners ont aujourd'hui largement remplacé la tomographie longitudinale.

- **Le scanner (tomodensitomètre).** Le scanner a permis au corps médical émerveillé de retrouver la coupe des organes tels qu'ils les connaissaient dans les planches anatomiques issues de dissections. L'intérêt premier du scanner est l'analyse morphologique des organes. Mais contrairement à la radiologie conventionnelle ou à



Max Coulomb, chef du service de radiologie du CHU de Grenoble.



De gauche à droite :
radiographie du
poumon, profil en
tomographie
longitudinale,
scanner : coupe
axiale transverse du
poumon.

40

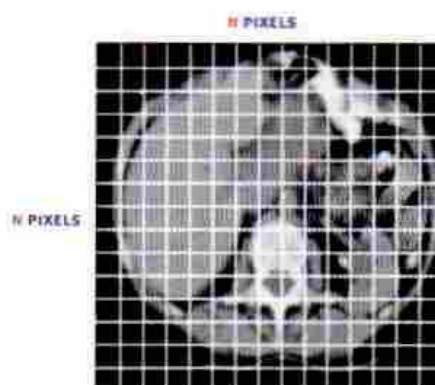
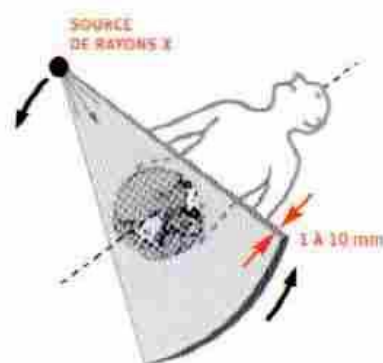
la tomographie longitudinale, le scanner est basé (comme l'ostéodensitométrie) sur une analyse quantitative des rayons X traversant le corps. Une partie des rayons X est absorbée par le corps. Cette absorption est mesurée par le rapport entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant. Elle est la somme des absorptions partielles rencontrées (fig. 1). L'absorption est directement liée à la densité donc à la nature des matières traversées.

Chaque mesure concerne la mise en série de plusieurs éléments, on ne peut donc pas connaître l'absorption d'un élément séparé de matière. Le principe de tout tomodensitomètre est de pouvoir calculer l'absorption de tous les éléments d'une coupe d'organe définie par une matrice de $N \times N$ éléments, appelés pixels dans le monde de l'imagerie. Il faudra définir $N \times N$ valeurs de l'absorption de chacun des pixels, inconnus au départ. Mais ces mesures d'absorption ne sont accessibles que collectivement.

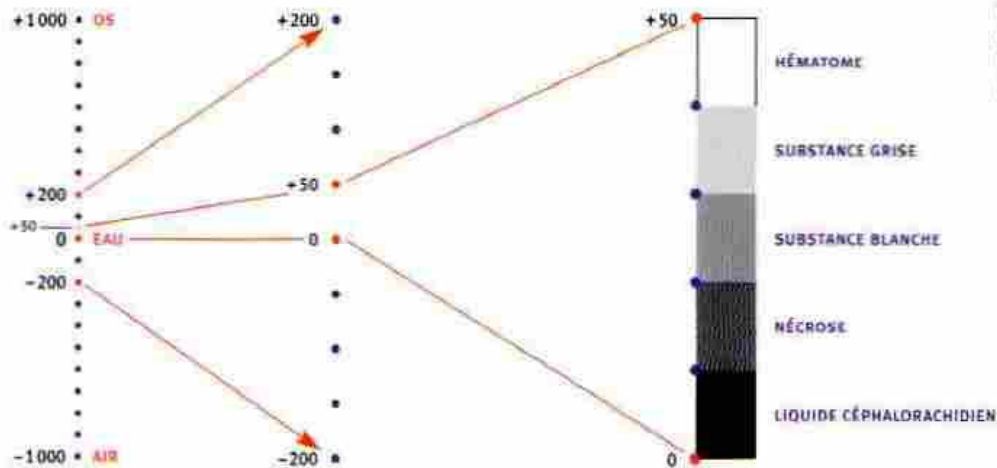
On réalise N^2 différentes associations en série des éléments. Afin d'avoir un nombre suffisant d'éléments en série, on mesure les différentes absorptions sous le nombre d'angles nécessaire. Ce qui revient de façon très simplifiée à calculer N^2 valeurs d'absorptions élémentaires à partir de N^2 équations. C'est le parcours rectiligne des faisceaux de rayons X qui permet d'associer en série les éléments entre eux (fig. 2). Une des difficultés est par exemple la contribution partagée des pixels coupés en oblique.



Fig. 2 Image d'une coupe virtuelle de l'abdomen par un faisceau de rayons X mince, en éventail. À droite, matrice de reconstruction de N^2 pixels.



Outre cette méthode algébrique, des méthodes itératives plus intuitives existent, ainsi que de nombreuses méthodes analytiques plus rapides et bien adaptées aux traitements informatiques (transformations de Fourier ou de Radon, etc.). L'échelle d'Hounsfield permet de codifier de -1000 à $+1000$ les résultats pour passer des mesures d'absorption à la densité, donc à la nature de la matière : air = -1000 ; graisse = -60 à -120 ; eau = 0 ; os = $+1000$.



Échelle d'absorption d'Hounsfield : exemple d'échelle de gris adaptée à l'observation du crâne.

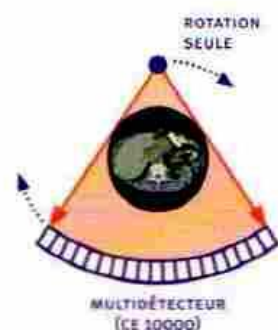
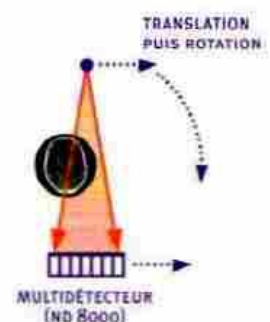
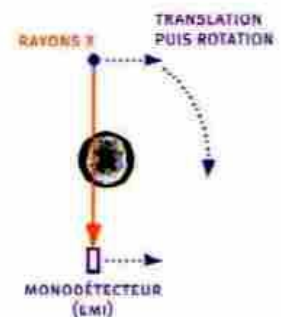
41

Les trois principales générations de scanners

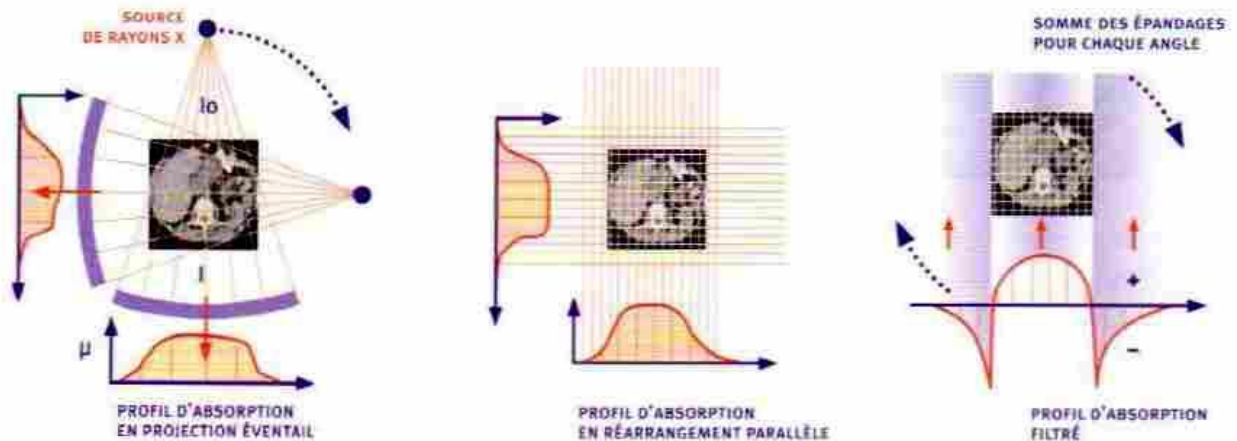
• **Le scanner « crâne » première génération** à monodétecteur et translation-rotation. Le premier scanner d'EMI comportait 2 détecteurs. À chaque position angulaire, l'ensemble tube X et détecteur balayait linéairement tout le champ d'examen. Les mesures duraient environ 20 minutes pour deux images définies en 80×80 pixels.

• **Le scanner « crâne » deuxième génération** à multidétecteur et translation-rotation. Le multidétecteur permet de raccourcir le temps d'examen à une minute environ, chaque rotation étant égale à l'angle couvert par le détecteur. Une nouvelle technique de reconstruction d'image améliore la précision et la vitesse des calculs. La suppression de la poche d'eau autour de la tête du patient améliore le confort de l'examen. Yves Crouzet fut le premier utilisateur du no 8000. Il précéda Jean-François Le Bas aujourd'hui à la tête du service de radio-neurologie du chu de Grenoble.

• **Le scanner « corps entier » troisième génération** à multidétecteur dit « fan beam », c'est-à-dire en éventail. L'ensemble générateur X et multidétecteur tourne autour de l'axe du patient et le rayonnement collimaté traverse une fine tranche du corps. Pour chaque mesure, et en chaque point du détecteur, la mesure permet de calculer la somme des absorptions partielles rencontrées selon une direction du rayonnement. Pour chaque position de l'ensemble générateur-multidétecteur, on a un profil des absorptions globales mesurées avec un faisceau en éventail de rayons X. Un premier réarrangement informatique permet par un tri d'obtenir un profil des absorptions globales à partir des faisceaux parallèles de rayons X. La rétroprojection et l'épandage des valeurs d'absorption épandues et sommées pour chaque angle de rotation, dans la zone à reconstruire, donneraient une image reconstruite entachée d'erreurs. Ces erreurs connues dépendent mathématiquement de cette



procédure de reconstruction. Connaissant ces erreurs, on corrige chaque profil d'absorption en le filtrant de façon adéquate avant son épandage et sa sommation dans la zone de reconstruction. La somme des épandages pour chaque angle donne la valeur de l'absorption dans chacun des pixels, valeurs traduites de +1000 à -1000 sur l'échelle d'Hounsfield.



42

L'évolution parallèle du diagnostic médical et de la technologie des scanners

Le service des professeurs Michel Geindre puis Max Coulomb, qui lui a succédé en 1985, a fait bénéficier ses patients des progrès successifs des scanners.

• Les scanners multicoupes par déplacement séquentiel

Le besoin de disposer pour le diagnostic d'une épaisseur supérieure à celle d'une ou deux coupes (de 1 à 10 mm) a rapidement conduit à déplacer séquentiellement pas à pas le malade selon l'axe de la machine afin de réaliser des « multicoupes ». L'informatique peut commencer à réaliser une représentation tridimensionnelle sommaire.

Scanner à mouvement hélicoïdal



• Les scanners à mouvement hélicoïdal

Ils utilisent un glissement continu du patient dans l'axe du tunnel. De nouvelles méthodes de reconstruction apportent alors une vraie réponse à l'exploration d'un organe pour lequel la résolution et la visualisation deviennent très peu dépendantes de l'orientation du plan de coupe. La capacité thermique du tube X ne permet pas cependant de réaliser rapidement de nombreuses coupes fines.

• Les scanners multibarrettes

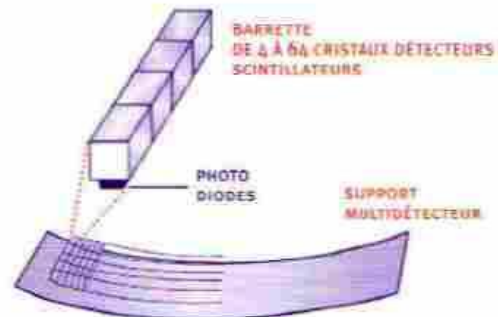
Multicoupes du tronc



Le remplacement des détecteurs à gaz, limités dans la technologie des années quatre-vingt à une seule coupe, par des barrettes de cristaux scintillateurs associés à des photodiodes, a permis la réalisation de détecteurs à 4, 16, 32 et aujourd'hui 64 coupes simultanées. La résolution spatiale identique dans toutes les directions permet une véritable reconstruction 3D et donne lieu à une exploitation diagnostique *a posteriori* révolutionnaire :

- plans de coupes adaptées à la morphologie,
- représentation tridimensionnelle des organes et anomalies.

L'acquisition simultanée de nombreuses coupes fines permet de mieux utiliser le flux produit par le tube et ainsi autorise, malgré les contraintes thermiques, la réalisation de scanners haute résolution 3D rapides.



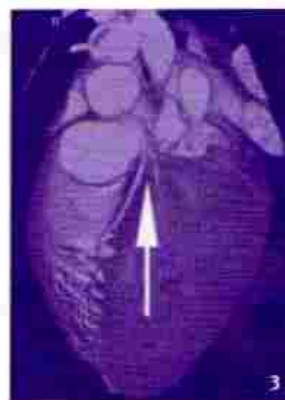
43

• Les scanners rapides

Les résolutions spatiales (inférieures au mm) ont progressé peut-être d'un facteur 2 à 3 (hormis les tout premiers scanners). L'aide à la manipulation des images s'est transformée par la disponibilité des informations en 3D. Mais l'énorme gain en vitesse ouvre encore plus le champ d'application des scanners. Les premiers scanners corps entier mettaient vingt secondes pour acquérir une image. Aujourd'hui, en 1 seconde, ils réalisent vingt images. Gilbert Ferretti, chef du service central de radiologie depuis 2004, se trouve aujourd'hui, outre les examens conventionnels, devant une large ouverture de types d'examens qui pourront remplacer des examens traditionnels car plus précis ou moins invasifs. Ceci grâce à l'évolution inéluctable des scanners dont les performances en précision, en vitesse et en ergonomie d'exploitation des images s'adapteront aux nouveaux besoins, à commencer par ceux induits par les examens à visée cardiaque.



Gilbert Ferretti
devant un scanner
16 détecteurs



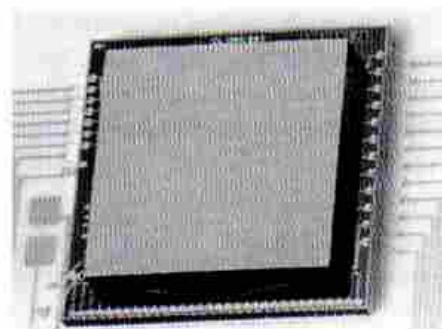
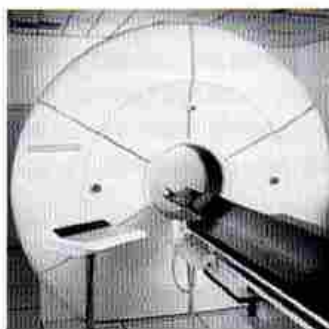
1. Masse calcifiée de la paroi gauche de la trachée, reconstruction frontale.
2. Endoscopie virtuelle.
3. Division coronaire gauche, cœur reconstruit en 3D.

• Les scanners de demain

Robert Allemand, Roger Gariod, Edmond Tournier ne peuvent plus aujourd'hui qu'écrire l'histoire du premier scanner « corps entier » français. Au LETI, Corinne Mestais leur a succédé et a, entre autres responsabilités, celle de l'imagerie médicale en puisant dans les immenses ressources des nanotechnologies.



Corinne Mestais,
du LETI.
À droite, prototype
de matrice
bidimensionnelle et
morphomètre de
détecteurs à semi-
conducteurs.



44

À la fin des années quatre-vingt, un important plan état-régions (Bretagne et Rhône-Alpes), a permis la réalisation de deux « morphomètres » expérimentaux constitués par deux larges détecteurs de 30 cm de diamètre, couplés à deux générateurs X. Le LETI, en collaboration avec General Electric, a jeté les bases des scanners du futur. En effet, la reconstruction tridimensionnelle directe d'un organe, à partir de détecteurs couvrant directement tout le champ à reconstruire, est un espace de progression pour les scanners d'aujourd'hui. Les nanotechnologies autorisent à penser que de très larges détecteurs à semi-conducteurs rendent réaliste l'idée prémonitrice d'un scanner à reconstruction tridimensionnelle directe sur une seule rotation.



IRM et scanner, imageries complémentaires

Parallèlement au scanner une autre imagerie, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) s'est développée. Le LETI y contribua par le biais de l'imagerie spectrométrique. Corinne Mestais, ingénieur à la CGR avant d'arriver au LETI, installa le premier imageur IRM du CHU. Jean-François Le Bas au-delà des scanners a élargi ses compétences à l'imagerie par résonance magnétique dont il apprécie la complémentarité.

L'aventure grenobloise des premiers scanners est terminée

Hors des applications médicales du scanner, Jean-François Piquard, un des premiers acteurs du domaine biomédical, quitte le LETI pour fonder Icap et valoriser les techniques de contrôle industriel par rayons X incluant les scanners. Aujourd'hui, son activité se développe sous la dénomination Icap-Cybernetix. Cette petite aventure du scanner X médical, écrite par quelques-uns de ses acteurs, du CEA, du CHU, et de l'industrie, n'a pu être conduite que grâce à ceux qui, sans compter leurs heures, ont œuvré de tout leur cœur pour qu'elle réussisse. Nous nous excusons de n'avoir pu les citer tous. Laissons le mot de la fin au responsable CGR du projet, Jean-Pierre d'Haenens, appelé ensuite à de hautes fonctions : « *Fondée sur la compétence, la*

Coupes du cerveau
obtenues par neuro-
scanner (en haut) et
par IRM (en bas).
Ci-dessus,
Jean-François Le Bas
devant l'IRM 1,5 T.

confiance, aiguillonnée par la compétition internationale, cette collaboration a été une remarquable réussite, tant sur les plans technique et industriel, qu'humain. Subsistent non seulement des générations de machines, mais aussi des amitiés. »

• Max Coulomb, professeur de radiologie, ancien chef du service de radiologie, Gilbert Ferretti, professeur de radiologie, chef du service central de radiologie, Jean-François Le Bas, ingénieur, professeur de génie biologique et médical, chef du service de neuroradiologie, responsable de l'unité d'IRM au CHU de Grenoble • Robert Allemand, Roger Gariod, Corinne Mestais et Edmond Tournier, ingénieurs au LETI-CENG.

→ C'est en 1952 que Félix Bloch et Edwards Mills Purcell obtiennent un prix Nobel pour avoir décrit le phénomène de la résonance magnétique nucléaire (RMN). Le succès considérable du scanner X ouvre la voie au développement d'autres méthodes de reconstruction d'images en coupes du corps humain à partir de mesures physiques répétées et repérées spatialement. L'échotomographie avec les ultrasons, la gammatomographie avec les isotopes radioactifs, et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) avec la RMN sont mises en œuvre. En 1973, Paul Lauterbur publie dans la revue *Nature* un premier article qui consacre l'idée de réaliser des images par RMN chez l'homme. Dès lors, le phénomène de résonance magnétique nucléaire s'applique surtout à l'imagerie médicale.

L'histoire du développement de l'IRM au CHU de Grenoble

ROBERT ALLEMAND • MAX COULOMB

ROGER GARIOD • JEAN-FRANÇOIS LE BAS • CORINNE MESTAIS

ROGER SARRAZIN • EDMOND TOURNIER

Une image représentative de l'eau de nos tissus

C'est un phénomène physique qui concerne les aimantations des noyaux atomiques. Ces aimantations sont directement liées aux propriétés des protons qui composent pour partie ces noyaux atomiques. Le noyau d'hydrogène est l'un des éléments qui « résonne le mieux ». C'est heureux, car c'est aussi l'un des constituants majeurs de notre organisme (H_2O , CH_2 , CH_3 ...). L'image de RMN à visée médicale est une image représentative de la distribution de l'eau de nos tissus, et les contrastes obtenus dépendent de la quantité d'eau mais surtout de sa qualité – eau libre, eau liée, eau extracellulaire, eau intracellulaire, eau intravasculaire – et des paramètres qui en décrivent les mouvements à l'échelle élémentaire (diffusion, rotation, translation). L'ensemble de ces paramètres s'exprime à travers la mesure des constantes de temps de relaxation.

45

Figures 1 à 3.

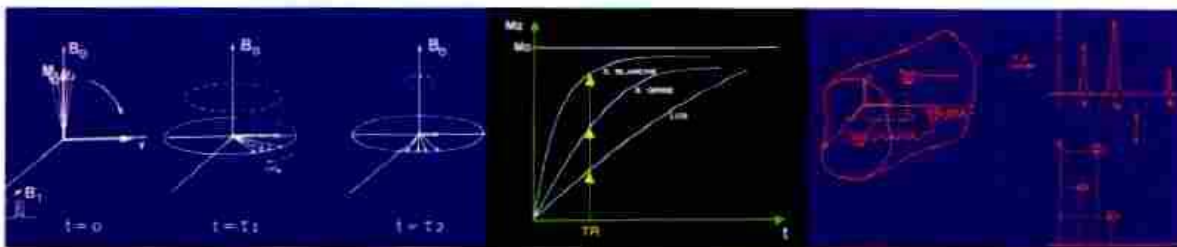


Fig. 1 Au repos, dans un champ magnétique B_0 , les aimantations élémentaires nucléaires précessent autour du champ B_0 à une vitesse angulaire caractéristique τ_0 . Leur résultante M_0 est alignée avec B_0 . Lors d'une excitation radiofréquence $B_1(\tau_0)$ à la fréquence de résonance, l'aimantation M_0 est basculée d'un certain angle (90° sur le schéma par rapport à la direction d'application du champ B_0). Le retour à l'équilibre se

caractérise par une remontée de la composante longitudinale à sa valeur de repos M_0 , et une décroissance de la composante transversale liée au déphasage des aimantations élémentaires entre elles.

Fig. 2 Cette remontée de la composante longitudinale se fait de façon exponentielle avec des constantes de temps différentes pour les différents tissus. On appelle T_1 cette constante de temps. Elle

dépend de l'organisation de l'eau dans le tissu concerné. Plus le tissu est riche en eau, plus T_1 est long. En général, $T_1 = 3$ secondes pour l'eau pure, et 0,5 à 0,8 seconde pour les tissus biologiques.

Fig. 3 Le principe de la construction de l'image RMN repose sur un codage de l'espace par le biais de champs magnétiques additionnels (gradients de champ) qu'on superpose au champ B_0 dans les directions X, Y, et Z. Les fréquences de

résonance du noyau observé (celui d'hydrogène pour l'imagerie RMN) varient alors selon la valeur de ces champs additionnels. On peut ainsi, par le biais de la fréquence repérer la position. Ces temps de relaxation (T_1 et T_2) sont accessibles à la mesure, après une excitation radiofréquence. Celle-ci étant transmise par une antenne qui va créer le phénomène de résonance par l'observation à travers une autre antenne (ou

cette même antenne) du retour à l'équilibre des aimantations (relaxation). Ce qui fait aujourd'hui le succès de cette imagerie, c'est d'abord son extraordinaire capacité d'observer avec des contrastes différents les tissus malades et les tissus sains, et ainsi de détecter des anomalies. Mais c'est aussi le fait que cette technique soit totalement non invasive, ce qui permet de répéter autant que de besoin les examens dans un cadre médical mais aussi dans un cadre de recherche.

Une collaboration entre les physiciens et les médecins

À Grenoble, l'ouverture du CENG en 1954, les travaux de Louis Néel et son attribution d'un prix Nobel en 1970 inaugurent une tradition dans le domaine du magnétisme. Michel Soutif, qui a soutenu sa thèse sur la résonance magnétique en 1950, arrive peu après à Grenoble. L'histoire du développement de l'imagerie par résonance magnétique est le résultat de compétences spécifiques et d'opportunités. Elle repose sur les liens qui existaient alors déjà entre notre établissement et son environnement scientifique, et elle s'est inscrite dans les suites de l'histoire du scanner X. Il est intéressant de noter d'ailleurs que dans les méthodes de reconstructions utilisées en scanner X comme dans les méthodes d'acquisition et de traitement des données utilisées en IRM, l'outil mathématique mis à l'honneur est la transformée de Fourier : fantastique outil que nous devons à Joseph Fourier qui, comme chacun sait, réalisa ces travaux à Grenoble au début du XIX^e siècle.

46

Le développement de la RMN dans le domaine biomédical.

La prise en compte des possibilités de développement de la RMN dans le domaine biomédical débute en France en 1980 : un groupe de travail est réuni au niveau national par Jean-Claude Bisconte, alors responsable du génie biologique et médical à la Direction générale de la recherche scientifique et technique (DGRST). La représentation des Grenoblois est déjà importante avec la présence d'Alim-Louis Benabid, Alain Chibon, Roger Gariod, Pierre Servoz-Gavin, et Michel Soutif. Suite à cette réunion, la DGRST confie à Pierre Servoz-Gavin, responsable de recherche au département de recherche fondamentale du CENG, la présidence d'un « Comité national pour le développement des applications biomédicales de la RMN ». À partir de ce moment-là, à Grenoble, plusieurs équipes se mettent au travail en collaboration avec les physiciens spécialistes de RMN ou des champs magnétiques :

- le Laboratoire de médecine et chirurgie expérimentales et comparées que dirigeait Alim-Louis Benabid avec Michel Decorps, Jean-Louis Leviel, et Jean-François Le Bas,
- le Laboratoire de physiologie animale dirigé par André Rossi avec Noël Lavanchy et Josette Martin,
- le Laboratoire d'électronique de technologie de l'information (LETI) avec Robert Allemand, Roger Gariod, Michel Laval et A. Briguët,
- le Département de recherche fondamentale (DRF) avec Pierre Servoz-Gavin,
- le Service national des champs intenses (SNCI), laboratoire du CNRS, avec G. Aubert et J. Vallier.

Dès 1980, la Compagnie générale de radiologie (CGR) manifeste son intérêt pour cette nouvelle imagerie et décide de s'y engager. Le Comité de coordination nationale de la DGRST envisage de promouvoir l'étude et la réalisation d'un appareil, en collaboration entre la CGR et le laboratoire de l'Institut d'électronique fondamentale d'Orsay. Le SNCI est invité à y collaborer pour la réalisation de l'aimant. Dès lors, le Comité national pour le développement des applications biomédicales de la RMN s'engage à soutenir les actions tant au niveau des chercheurs que des industriels concernés.

En janvier 1982, Roger Sarazin organise une réunion, à Grenoble, avec les différents acteurs et promoteurs du développement de la RMN. Avec M. Cadet, directeur général du CHU, il présente à Hubert Dubedout, Président du conseil d'admi-

nistration de l'hôpital et maire de Grenoble un « programme préliminaire d'évaluation clinique et technique de l'imagerie par RMN au CHU de Grenoble ». Ce dernier propose que la délibération du conseil d'administration appuyant cette demande soit adressée au ministère de la santé accompagnée d'un dossier d'intention d'acquiescer un équipement. Au début du mois de juin, le projet grenoblois est remis à Jean-Claude Bisconte. Des discussions ont lieu au niveau régional, à l'instigation de la mission régionale de la recherche à la Préfecture de la Région Rhône-Alpes pour associer l'ensemble de la région dans cette démarche. À Lyon, Michel Amiel, chef de service de la radiologie de l'hôpital cardiologique, est un interlocuteur privilégié et s'engage lui aussi très activement.

Au mois de novembre, un programme d'installation et d'évolution de l'imagerie RMN dans notre centre hospitalier est adressé au Ministère de la santé. Il prévoit les surfaces, les dotations en personnel et le budget pour cette opération. Trois mois plus tard, le Ministère de la santé notifie l'autorisation d'implantation de quatre imageurs en France, à Bordeaux, Montpellier, Paris et Grenoble.

47

La proximité du cea et des compétences locales justifie ce choix. Suite à l'expérience du scanner X dans le service central de radiologie du centre hospitalier de Grenoble, des contacts sont pris avec Thomson-cgr. Grenoble est alors choisi par la cgr pour être le premier site français équipé d'un imageur 0,5 Tesla. Parallèlement, un certain nombre de travaux relatifs à la spectrométrie RMN biomédicale sont menés dans le laboratoire d'Alim-Louis Benabid. Jean-François Le Bas est désigné pour coordonner ce projet d'implantation d'un imageur RMN au CHU de Grenoble.

Au mois d'octobre 1983, M. Dupuy, architecte du groupe des Six, est consulté pour étudier la construction d'un bâtiment destiné à recevoir cet imageur. À l'époque, les contraintes d'installation liées au champ magnétique créé par l'équipement paraissent très lourdes. Le choix du site est abordé et une décision unanime inter-



Le Magniscan 5000 Gauss Thomson-cgr, premier appareil acquis en 1985 par l'hôpital des Sablons-chu de Grenoble.
Cliché CHU.

Scanner X du Service de neuroradiologie et image de l'encéphale et du crâne acquise en coupe axiale. Sur cet équipement, le liquide céphalorachidien apparaît en noir, la tige cérébrale en gris, l'os en blanc, en rapport avec l'échelle des densités de ces tissus.



vient rapidement pour qu'il soit installé sur le site de l'hôpital Michallon-CHU à proximité du pavillon de neurologie, et qu'il soit en lien direct par un couloir avec le bâtiment central. Ce choix judicieux de la part de notre administration permettra de futures extensions. L'État finance l'acquisition de ce premier matériel à hauteur de 60 % avec l'aide du conseil régional. La construction du bâtiment est à la charge du CHU. Une structure administrative et logistique permet à Jean-François Le Bas d'embaucher quatre manipulateurs et une secrétaire. L'unité IRM ainsi créée, rattachée au secteur radiologique, a pour mission de réaliser une évaluation clinique de cette technique. Le bâtiment est livré dans les délais, et la machine est installée en avril 1985. C'est une jeune ingénieure, Corinne Mestais, travaillant alors à la CGR, qui installe cette machine. Aujourd'hui, elle est responsable du programme Imagerie médicale au LETI.

L'inauguration de l'unité IRM a lieu en septembre 1985. Michel Geindre est des nôtres pour l'inauguration, mais il nous quitte peu après. Nous saluons ici sa mémoire et le remercions de sa confiance. Comme pour l'expérience du scanner X, cette mission d'évaluation d'un premier équipement IRM fut très riche et enthousiasmante. Il était déjà assez facile de prédire que cette imagerie par RMN s'imposerait comme une des techniques majeures de l'imagerie médicale.

IRM et scanner, deux méthodes de diagnostic

L'IRM apporte pour l'exploration des organes pleins et des régions immobiles une sensibilité diagnostique supérieure à celle du scanner X dans l'exploration du cerveau et de la moelle. Une petite lésion ischémique ou inflammatoire sera souvent mieux vue qu'avec le scanner X et le bilan des lésions plus précis. Le signal RMN est modulé par un certain nombre de paramètres biologiques permettant une exploration fonctionnelle et même métabolique dans certains cas. C'est enfin une technique non invasive, c'est-à-dire qui peut être répétée dans le temps sans aucun dommage pour le patient. Ceci autorise son utilisation pour des recherches sur le sujet normal, notamment en ce qui concerne le fonctionnement cérébral. Le scanner X reste un examen de première intention dans la plupart des situations pathologiques et en particulier dans le cadre de l'urgence. Il explore très finement l'os et détecte de petites fractures. Il repère très bien les saignements et les hémorragies. Il est fiable et sa réalisation est très rapide. Il est accessible dans toutes les circonstances, ce qui n'est pas le cas de l'IRM. Ces deux techniques permettent d'explorer le corps entier en coupes et autorisent des reconstructions en trois dimensions. La résolution spatiale est de l'ordre du millimètre cube.

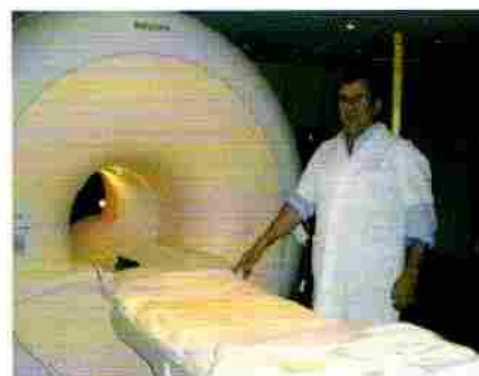
Quelques années plus tard, en 1993, un deuxième équipement est installé, et une extension du bâtiment initial permet d'accueillir un appareil Philips à plus haut champ –1,5 Tesla– dans le cadre d'une collaboration avec le secteur libéral. Celui-ci souhaite logiquement faire bénéficier de cette technique les patients qui lui sont confiés. Le regroupement de ces deux machines et leur co-utilisation est une solution intéressante pour la formation des médecins.

En 2000, dans le cadre d'un programme national, «Projet de soutien technologique à la recherche clinique» (PSTRC), un équipement 3 Tesla corps entier, dédié aux activités de recherche, est installé dans une extension du bâtiment initial. Aujourd'hui, le CHU de Grenoble dispose, sans aucun doute, de la plus belle plate-forme d'imagerie clinique RMN de France.

En 2006, la construction de l'Institut des neurosciences et le transfert du plateau technique d'imagerie RMN expérimentale pour le petit animal dans ce bâtiment, à proximité de la plate-forme d'imagerie clinique, augmentent encore cette visibilité. La plate-forme IRM de Grenoble qui regroupe ces deux composantes est aujourd'hui reconnue sur le plan national. En 2003, sous l'impulsion d'Alim-Louis Benabid, le CHU acquiert une IRM peropératoire, installée dans le bloc opératoire neurochirurgical. Cet équipement permet un contrôle du geste interventionnel. Fin 2005, un nouvel équipement d'IRM 1,5 Tesla est installé à l'hôpital Sud pour des développements autour de l'appareil ostéo-articulaire. Cet équipement est co-utilisé par le public et le secteur libéral, tandis que les deux équipements cliniques de l'hôpital Nord sont aujourd'hui totalement consacrés à l'activité du CHU.

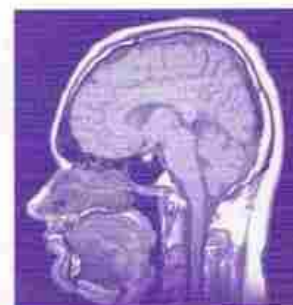
Au cours de ces vingt années, les équipements IRM ont considérablement progressé, tout comme les équipements scanner X. Ces réussites ont nécessité de la part de chacun des partenaires locaux des efforts constants. Il faut sans doute saluer ici les différents responsables qui se sont succédé au niveau du CHU, de la Faculté de médecine et de notre Université Joseph Fourier, au cours de cette période.

- Max Coulomb, professeur de radiologie, ancien chef du service de radiologie, Jean-François Le Bas, ingénieur, professeur de génie biologique et médical, chef du service de neuroradiologie, responsable de l'unité d'IRM, Roger Sarrazin, professeur d'anatomie et de chirurgie au CHU de Grenoble.
- Robert Allemand, Roger Gariod, Corinne Mestaïs, Edmond Tournier, ingénieurs au LETI-CENG.



Équipement IRM 1,5 Tesla de l'hôpital Nord et image de l'encéphale et du crâne acquise en coupe sagittale sur cet équipement. Le liquide céphalorachidien est gris, le tissu cérébral est plus clair, la

49



graisse sous-cutanée plus blanche, en rapport avec l'échelle des temps de relaxation longitudinaux T_1 de ces tissus.

Aujourd'hui, les contraintes d'environnement liées au champ magnétique statique sont bien maîtrisées. Le CHU dispose de matériels spécifiques (monitoring, respirateur) qui permettent la réalisation d'un examen IRM chez des patients en réanimation.