

De 1,5 tesla à 3 teslas, le doublement d'un champ magnétique pour de nouvelles performances de l'IRM

Emmanuel A. Cabanis, professeur à l'université Paris 6, membre correspondant de l'Académie nationale de médecine, chef de service, expert agréé par la Cour de cassation

M.-T. Iba-Zizen, adjoint, neuroradiologue des Hôpitaux de Paris

T.H. Nguyen, neuroradiologue des Hôpitaux de Paris

A. Abanou, neuroradiologue des Hôpitaux de Paris

C. Habas, médecin des Hôpitaux de Paris

A. Istoc, doctorant

Service de neuro-imagerie, Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts

Le phénomène physique «**résonance magnétique nucléaire (RMN)**» est découvert en 1946, aux Etats-Unis, par les physiciens américains **Félix Bloch** (1905-1983) et **Edward Mills Purcell** (1912-1997), prix Nobel de physique 1952. L'«**imagerie par résonance magnétique (IRM)**» naît **36 ans plus tard** (1972, première «zeugmatographie», image plane (2D) d'une coupe de tubes capillaires remplis d'eau, puis d'un citron, à partir du signal RMN, image d'un doigt), grâce à **Paul Lauterbur** (1929-) et **Peter Mansfield** (1933-), chimistes américains, prix Nobel de médecine 2003. Rappelons que, par définition, **la RMN est «nucléaire (N)»**, avec le noyau de certains atomes para-magnétiques. Le proton, charge positive du noyau hydrogène, est le plus exploité car le plus diffus dans le corps humain vivant (70 % de H₂O, elle-même 70 % des tissus biologiques). «**Magnétique (M)**» signifie que les protons sont soumis à un champ magnétique intense B₀, de 10 à 60 000 fois le champ magnétique terrestre naturel moyen (0,5 gauss), soit 5 000 à 30 000 G, ou encore 0,5 à 3 teslas (unité de mesure du physicien). La charge électrique positive et la rotation permanente du proton sur lui-même (le spin) lui confèrent la propriété de para-magnétisme (sensibilité à un champ magnétique). La RMN, enfin, est «**résonance (R)**» entre fréquence de rotation du proton et impulsion électro-magnétique de radiofréquence (RF) déterminée (quantum d'énergie), dans l'équation de Larmor. Le retour à l'équilibre de la population protonique ré-émet, «en écho», l'énergie reçue, l'antenne RF émettrice devenant réceptrice. Le temps de retour à l'équilibre du vecteur gyromagnétique symbolisant chaque proton (sa ré-aimantation ou relaxation) se mesure en millisecondes, dans le plan horizontal par le temps de relaxation T₂ (spin-spin) et dans le plan vertical par le temps de relaxation T₁ (spin-réseau). La densité protonique «Rho» constitue le troisième paramètre caractéristique de la matière vivante.

L'analyse des valeurs de T₁ et T₂, par transformées de Fourier, reconstitue les coordonnées spatiales du signal et donc une cartographie. Celle-ci s'affiche en valeur de gris. Les volumineux fichiers numériques (matrices symétriques ou non, ayant de 256 à 1024 voxels de côté - le «voxel» étant l'abréviation de *volume element cell*) sont alors accessibles aux logiciels modernes des traitements numériques du signal, sur stations de travail atteignant des capacités de mémoire dépassant le téra-octet. En résumé, les protons du corps humain, mis en résonance dans un plan de coupe déterminé au sein d'un champ magnétique intense, permettent à la région anatomique explorée de fabriquer ses propres coupes anatomiques après exposition de quelques millisecondes aux séquences RF quantiques (128 MHz à 3 teslas).

Après un temps chimique «*in vitro*» («**spectrométrie RM ou SRM**»), et à partir de 1978, cette nouvelle imagerie RM («**IRM**») est reconnue comme «le plus grand événement pour l'exploration du corps humain vivant» depuis la découverte des rayons X par W.C. Roentgen (1895). Elle suscite immédiatement recherches et développements industriels. Une première image RMN de la tête est publiée en 1980. Depuis, la pratique de l'IRM bouleverse les spécialités médicales et chirurgicales, par son immense sensibilité, sa vaste polyvalence et son innocuité. Cette efficacité explique qu'en 2005, **90 millions de patients ont bénéficié d'un examen IRM sur l'une des 12 000 machines IRM** qui fonctionnent dans le monde (dont 250 en France). On estime à **1 milliard le nombre d'examen IRM pratiqué depuis 1985** sans qu'aucun effet nocif n'ait été signalé, dans des conditions d'utilisation normale. L'IRM donne accès à de nouveaux diagnostics et à une nouvelle connaissance des pathologies, presque instantanément et sans la moindre souffrance pour le patient.

L'expérience acquise peut être résumée, pour la tête et le rachis, par exemple. L'exploration IRM du cerveau et de la moelle épinière décèle et analyse la cause et les conséquences des cinq grandes classes de la pathologie (traumatique, vasculaire, tumorale, infectieuse, congénitale et dégénérative).

En **pathologie traumatique**, à la période aiguë (hématomes, contusions, œdèmes, fractures...) ou, à distance, dans la période des séquelles (atrophies ou cavitations cérébrales, ischémies localisées, atrophies ou hydrocéphalies post-traumatiques...), l'IRM offre un bilan complet, à la condition majeure d'une absence de corps étranger ferromagnétique inclus dans la blessure (le recours est alors celui du scanner RX, malgré sa sensibilité très inférieure même à 64 barrettes de détecteurs pour l'encéphale).

La **pathologie vasculaire** de l'encéphale ou de la moelle épinière (hémorragies et saignements par malformations artérielles ou artério-veineuses ou, à l'inverse, obturations vasculaires par thrombose locale athéromateuse ou embolie cruorique) est explorée dans sa conséquence (hématome ou hypovascularisation du parenchyme) autant que dans sa cause (analyse directe, 3D, de la malformation ou de la thrombose en ARM).

Une **cause tumorale bénigne ou maligne** est affirmée ou infirmée avec une sûreté maximum chez tout patient. La limite d'échelle est celle du voxel, un peu inférieure à 1 mm^3 , à 10^9 du micron cube de l'étage cellulaire.

Les **pathologies inflammatoires et infectieuses** constituent un succès majeur de l'IRM, seule technique capable de les mettre en évidence aux temps les plus précoces. La cause en est, une fois encore, l'eau. En effet, toute agression biologique, microbienne, virale ou immunitaire du système nerveux central provoque-t-elle une réaction œdémateuse du tissu nerveux. Cet œdème, aqueux, est décelable dès son origine, au volume vu plus haut (1 mm^3). La démonstration d'efficacité la plus importante est celle de la sclérose en plaques (SEP), effroyable maladie par son pronostic encore méconnu. Dès la survenue d'un premier symptôme neurologique, moteur ou sensitif, l'IRM cérébrale et médullaire permet de détecter la première atteinte, œdémateuse, sous la forme d'un haut signal en pondération T2, avec rehaussement en pondération T1 après injection de Gadolinium (preuve d'une rupture de la barrière hémato-encéphalique).

Les **pathologies congénitales et dégénératives, chez l'enfant et l'adulte**, maladies qui altèrent la forme et les fonctions du SNC imposent, désormais, une exploration IRM. Deux exemples symétriques sont résumés dans une épilepsie néonatale (l'IRM peut découvrir des anomalies de migration cellulaire ou de développement localisé de l'encéphale) et dans la survenue d'une démence pré-sénile (l'IRM explore les circuits de la mémoire comme elle affirme la cause vasculaire de leur atteinte, par exemple).

En pratique, le patient est introduit, sur un lit adapté, dans le tunnel de l'aimant à haute puissance

(**1 à 3 teslas**). Les antennes de réception-émission RF y sont incluses pour le corps entier, d'autres antennes entourant l'organe examiné (tête, thorax, abdomen, membre...). Pilotée par le médecin, une puissante informatique commande le détail et la succession des séquences excitation-réception. Celles-ci s'adaptent différemment à l'objectif recherché : pondérations T1, T2, T2 étoile, Rho, ARM, diffusion, IRM(f), SRM... L'informatique construit et traite les images, voxel à voxel, comme les spectres. De 5 minimum à 10 ou 15 séquences (quelques secondes à quelques minutes) sont donc pratiquées, patient immobile dans le tunnel, les oreilles obturées pour éviter la nuisance du bruit des gradients de champs auxiliaires, qui contribuent à l'acquisition des données de construction de l'image. Les séquences sont commandées depuis la station de pilotage de la machine isolée dans une cage de Faraday, derrière une vitre de cette cage. L'examen dure 20 (urgence) à 45 minutes, selon la région anatomique et sa complexité (par exemple exploration d'un genou ou de la tête), selon la pathologie (tumeur, accident vasculaire...). Le patient, avant l'examen, enlève ses vêtements et met une robe de chambre, un bonnet et des chaussures de papier, afin d'éviter toute présence de matériel ferromagnétique au sein du tunnel de l'aimant. De même, l'interrogatoire préalable, voire un examen radiologique par scanner Rx, dépistent-ils tout matériel ferromagnétique intra-corporel (pacemaker, prothèses métalliques, dentier, etc.). Chez l'enfant (signes cliniques de pathologie congénitale malformative ou tumorale), une neurosédation permet une exploration de haute qualité grâce à la qualité de l'immobilisation obtenue.

Selon le type des séquences choisies, le résultat attendu de l'examen IRM de la tête est de trois types.

- 1° **L'anatomie descriptive** (normale et pathologique) **2D et 3D de la tête, de l'encéphale et des vaisseaux** (IRM et ARM), s'affiche sur l'écran vidéo (figures 1 et 2, planche I) ; de puissantes stations de travail permettent la mise en œuvre de logiciels de traitement de l'image (figure 3, planche I) ; de ce domaine anatomique relève la «**tractographie en IRM par tenseur de diffusion (IRM TD)**» qui isole l'anatomie constitutive de la substance blanche, celle des faisceaux d'association et/ou de projection, ou «tractus» ; la diffusion, en effet, isole les faisceaux d'axones des neurones, dont les corps cellulaires constituent la substance grise, corticale et nucléaire (figure 4, planche I).
- 2° **L'anatomie fonctionnelle ou physiologie cérébrale** (normale et pathologique) (IRM (f)) est affichée sur des courbes, des coupes et des reconstitutions 3D de l'encéphale, comme des zones de réponses du cortex cérébral, spécifiquement stimulé par des paradigmes de stimulation sensorielle (vision, audition...), sensitive ou motrice périphérique (figure 5, planche II) ; deux thèses de doctorat de science, en cours, se consacrent à la connexion tractographie-IRM(f), dans le but

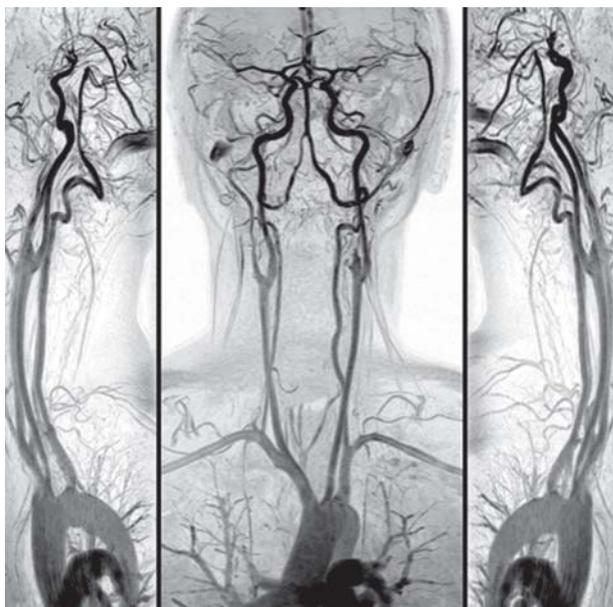
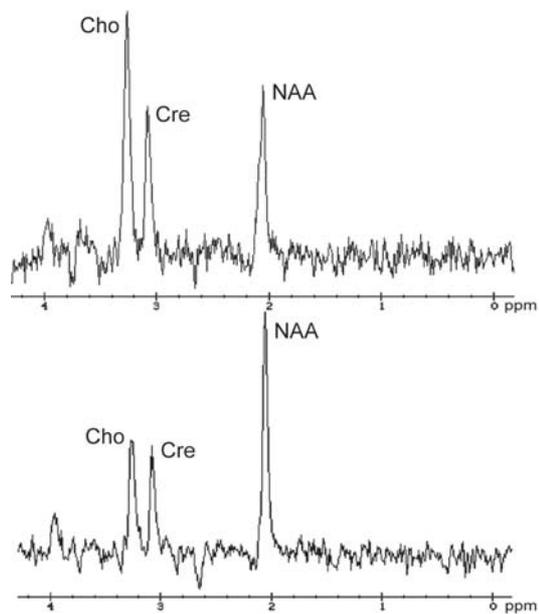


Fig. 1



p

nl

Fig. 2

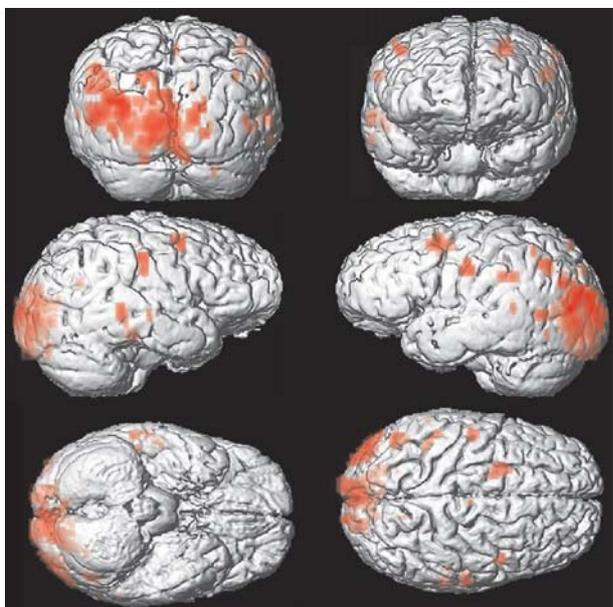


Fig. 3

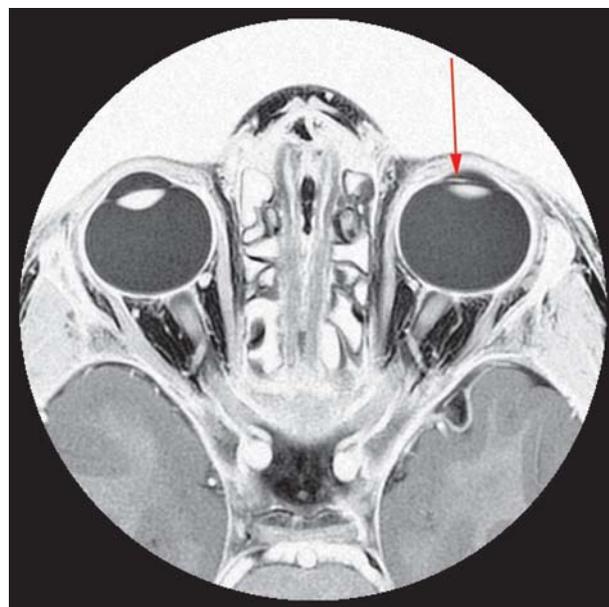


Fig. 4

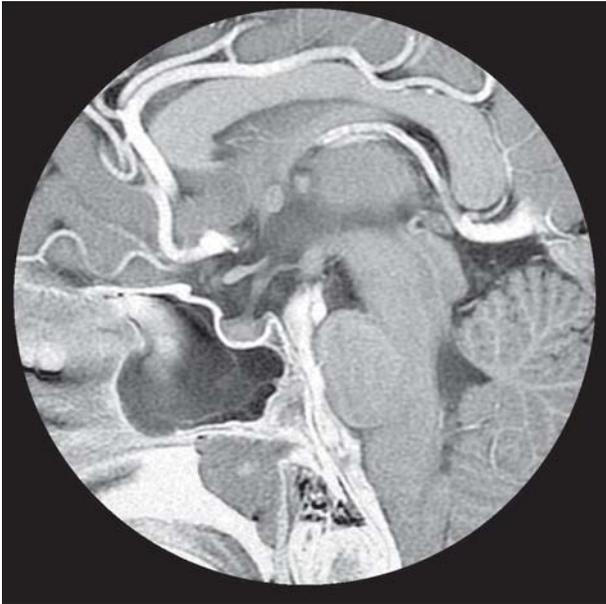


Fig. 5



Fig. 6

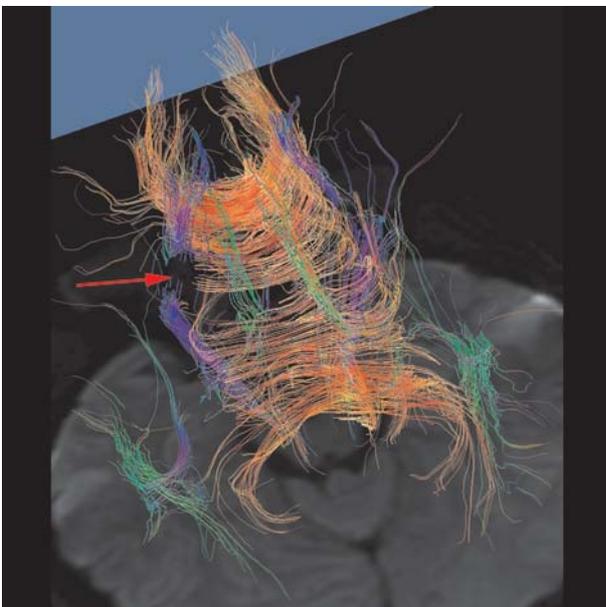


Fig. 7

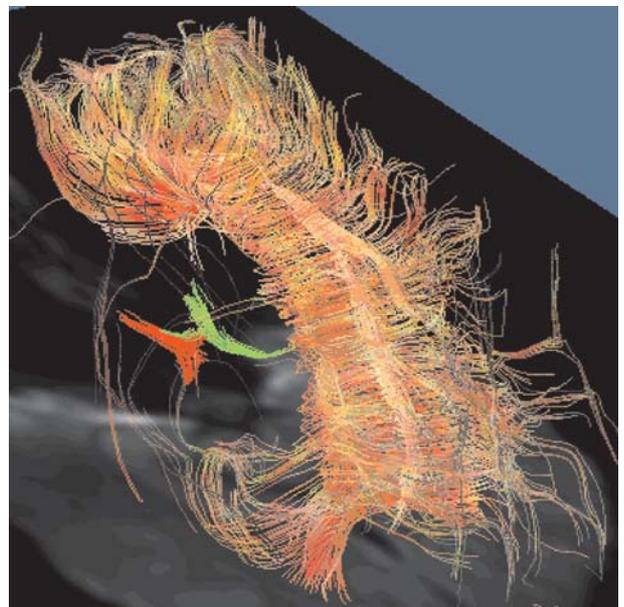


Fig. 8

d'évaluer les trajets fonctionnels liés aux localisations corticales.

- 3° L'**anatomie moléculaire ou métabolique des différentes zones et parties de l'encéphale** (SRM) s'étudie, principalement, à travers la discrimination des pics de N-acétyl-aspartate (NAA), créatine (Cr), choline (Cho) et myo-inositol (Myo), entre 2 et 3,7 ppm (figure 6, planche II). Aujourd'hui, le doublement de puissance du champ magnétique de la machine discrimine mieux les pics de lactates et des glutamates, voire du GABA, précieux neuromédiateur.

Quotidiennement et en recherche de routine, cette «neuro-imagerie» renouvelée à 3 T détecte mieux une anomalie de signal comme tumeur cérébrale, avec ses limites, ses rapports et ses dimensions, mesure son degré de vascularisation ; les neurochirurgiens disposent non seulement du diagnostic pré-opératoire le plus probable, mais encore du suivi évolutif, à la recherche précoce d'une éventuelle récurrence, dans certains cancers. Autre exemple, en pathologie vasculaire, l'angio-RM analyse plus vite dans tous les plans de l'espace les dimensions et la topographie d'un anévrisme artériel, les afférences et efférences d'une malformation artério-veineuse comme ses conséquences d'ischémie cérébrale. Dans un retard mental, l'IRM anatomique décèle plus finement des anomalies de migration cellulaire et la SRM peut rattacher

cette anomalie à une pathologie génétique associée ou causale. Dans l'exemple du résultat majeur de l'IRM, la sclérose en plaque (SEP), les nouvelles antennes permettent une exploration simultanée du système nerveux central «*in toto*», cerveau et moelle épinière, là où, dans le passé, le temps et l'argent manquaient : seul le cerveau était exploré. On devine déjà l'importance de cette donnée dans l'évaluation d'efficacité des protocoles thérapeutiques ralentissant l'évolution de la maladie.

Les auteurs, en charge d'une mission d'évaluation clinique de ce 3 T, mesurent combien la santé publique et les spécialités de la médecine profitent de cette avancée majeure d'un doublement de puissance du champ magnétique, en routine. **Fruit des savoirs de la physique et des mathématiques, la RMN puis l'IRM, avec ses multiples applications et cette puissance augmentée, offrent un futur supplémentaire au bien-être de l'humanité.**

Emmanuel A. Cabanis, M.T. Iba-Zizen, T.H. Nguyen, A. Abanou, C. Habas, A. Istoc

Université Pierre et Marie Curie Paris 6, UFR Pierre et Marie Curie, Service de neuro-imagerie, Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, 28 rue de Charenton, 75012 Paris