

# IRM INTERVENTIONNELLE : vers une neuronavigation en temps réel

D. MARTIN (1), M.T. NGUYEN KHAC (2), F. SCHOLTES (2), T. RACARU (2)

**RÉSUMÉ :** La neuronavigation est un outil neurochirurgical qui peut être comparé au GPS. Elle sert à guider la procédure neurochirurgicale en visualisant les déplacements des instruments chirurgicaux sur les images préopératoires. En augmentant la précision du geste, elle permet d'atteindre des lésions parfois très petites ou difficiles d'accès tout en réduisant la morbidité et en augmentant l'efficacité. Elle présente cependant un écueil majeur. L'image utilisée par le système de navigation est obtenue avant l'intervention et ne peut être corrigée durant celle-ci. En raison des modifications anatomiques inhérentes à l'opération (modification du volume du liquide céphalo-rachidien, résection de la tumeur,...), il apparaît progressivement une discordance entre la réalité chirurgicale et l'imagerie. Les informations pertinentes se périment ainsi peu à peu et la précision se perd. L'IRM interventionnelle est le moyen de réactualiser la neuronavigation par des images de haute définition. De plus, elle permet de réaliser des contrôles intra-opératoires de la qualité du geste chirurgical.

**MOTS-CLÉS :** Neurochirurgie - Neuronavigation - IRM intra-opératoire - Tumeur cérébrale

**INTERVENTIONAL MRI : TOWARDS A REAL-TIME NEURONAVIGATION SUMMARY :** The neuronavigation is a neurosurgical tool which can be compared to GPS. It is used to guide the neurosurgical procedure by viewing the movements of the surgical instruments on the preoperative images. By increasing the precision of surgery, it allows to reach very small or difficult to access lesions while reducing the morbidity and increasing the efficiency. It presents, however, a major drawback. The images that are used by the navigation system are obtained before surgery and cannot be corrected during the procedure. Because of anatomical changes inherent to the operation (modification of the volume of cerebrospinal fluid, resection of the tumor...), a discrepancy gradually appears between the reality and the surgical images. Relevant information will progressively disappear and the precision be lost. Interventional MRI is the way to update the neuronavigation with images of high definition. Moreover, and this last but not least, it allows to check the intra-operative quality of the surgery.

**KEYWORDS :** Neurosurgery - Neuronavigation - Intraoperative MRI - Brain tumor

## INTRODUCTION

Selon la doctrine énoncée par Monro puis confirmée par Kellie au début du 19<sup>ème</sup> siècle, l'enceinte crânio-rachidienne est rigide et inextensible. Elle est remplie à sa pleine capacité par un contenu constitué de trois éléments : le sang artériel et veineux, le liquide céphalo-rachidien et le parenchyme nerveux, lequel est incompressible.

Bien que cette loi ne soit pas absolue (en raison notamment de la rigidité partielle au niveau du rachis et de l'extensibilité du crâne chez le petit enfant), on peut déduire que toute augmentation du volume de l'un des constituants du contenu intracrânien se répercutera par une hypertension intracrânienne.

Cette doctrine conditionne non seulement la physiopathologie de l'hypertension intracrânienne, mais aussi le déroulement de toutes les procédures neurochirurgicales crâniennes. En effet, bien que le cerveau et les compartiments liquidiens soient incompressibles, ils sont déformables. Le cerveau se comporte ainsi comme une structure viscoélastique. En termes simples, si le cerveau est le siège d'un processus pathologique expansif (tumeur, hématome,...), il se laissera déformer. Il en va de même pour les déformations induites lors d'une procédure chirurgicale. Contrairement à d'autres cavités anatomiques telle la cavité abdominale, le caractère inexten-

sible et rigide de la boîte crânienne, ne permet en aucune manière d'augmenter la place nécessaire au cerveau. S'il est comprimé, le cerveau sera nécessairement lésé.

On comprend dès lors que pour atteindre une lésion, il convient de la rendre le plus accessible possible (par exemple, en la plaçant au point culminant du champ opératoire). L'anatomie chirurgicale, à côté de l'anatomie systématique et de l'anatomie topographique, nous permet de choisir les meilleures voies d'abord en profitant, par exemple, des scissures et sillons. On évitera aussi de traverser des zones hautement fonctionnelles en les identifiant au mieux. Cependant, la vue que l'on peut avoir du cerveau est le plus souvent incomplète. Le chirurgien ne peut voir au-delà des surfaces exposées. Forcément limitée par l'ouverture chirurgicale, la zone exposée manque souvent de repères visibles pour aider à appréhender toutes les structures anatomiques avoisinantes. Ces limitations sont encore majorées par le développement de voies d'abord très limitées (par exemple, en endoscopie ou par de petites voies d'abord décrites par les auteurs anglo-saxons sous le terme de «keyhole surgery» ou «minimally invasive surgery») (1, 2).

De plus en plus, des systèmes de guidage intra-opératoire deviennent indispensables afin de respecter ces diverses contraintes visant à réaliser le traitement chirurgical avec la plus grande efficacité (la résection la plus complète possible d'une tumeur, par exemple) et la morbidité la plus faible (3).

(1) Chargé de cours (2) Assistant, Service de Neurochirurgie, CHU de Liège.

## LA NEURONAVIGATION

Durant les trois dernières décennies, plusieurs révolutions technologiques, en particulier dans le domaine de l'imagerie médicale (développement du CT-scanner et de l'IRM), ont considérablement modifié le diagnostic, mais aussi les techniques neurochirurgicales. Le terme neuronavigation est un néologisme qui désigne une technologie utilisant un système informatique pour récupérer ces images diagnostiques et s'y orienter en temps réel pendant la procédure neurochirurgicale. Grâce à de puissants outils informatiques, il est désormais possible à l'opérateur de corréliser son intervention dans l'espace et dans le temps à des données d'imagerie conventionnelle (4, 5).

Le principe fondamental de la neuronavigation repose sur la capacité d'intégrer, à tout moment, la position des instruments du chirurgien à l'anatomie (normale ou pathologique) du patient. Son installation matérielle s'apparente à un système de GPS (global positioning system ou Géo-Positionnement par Satellite). Comme pour le GPS, la neuronavigation utilise des cartes sur lesquelles il est possible de se repérer. Ces cartes sont issues de l'imagerie. Elles sont le plus souvent obtenues par la résonance magnétique en coupes fines (le plus souvent des images pondérée T1 sans ou avec gadolinium). Dans certains cas, les images pondérées T2 ou FLAIR peuvent être utiles. Dans d'autres cas, les données osseuses fournies par le scanner sont capitales (repérage, des détails de l'anatomie osseuse de la base du crâne ou même du rachis dans le cas de la neuronavigation spinale). Outre les images anatomiques, des informations fonctionnelles commencent à être disponibles. C'est le cas de l'IRM fonctionnelle ou de la magnétoencéphalographie qui permettent de repérer des zones parlantes. Le PET scanner, quant à lui, permet d'apporter des informations métaboliques (zones hyper-métaboliques associées à des caractères de malignité). Toutes ces modalités iconographiques sont habituellement acquises au plus tard la veille de l'intervention et peuvent être fusionnées au moyen d'algorithmes adaptés.

A l'instar du GPS, la neuronavigation est composée de trois «segments» : le segment spatial, le segment de contrôle et le segment utilisateur. Le segment spatial du GPS est composé actuellement d'une constellation de 31 satellites (NAVSTAR pour Navigation Satellite Timing And Ranging). En neuronavigation, trois caméras avec capteurs infrarouges constituent ce segment spatial. Le segment de contrôle du GPS est la partie qui permet de piloter et de surveiller le système. Il sert aussi de repère fixe sur la terre. En neuronavigation, il comporte un système de repérage fixé au crâne et raccordé

à une station de travail dotée d'un écran tactile sur lequel seront visualisées les images 3D du cerveau pendant l'intervention. Enfin le segment utilisateur (dans le système GPS, le conducteur d'un véhicule, le pilote d'un avion,...) comporte en salle d'opération les instruments chirurgicaux identifiables par les caméras infrarouges.

Durant l'utilisation du système de navigation, le neurochirurgien suivra trois étapes :

- la visualisation : c'est la reconstruction en trois dimensions du cerveau (ou du rachis) ainsi que de la zone à opérer. Ceci peut être réalisé par des logiciels informatiques sophistiqués;
- la simulation préopératoire : elle permet de repérer les contours de la lésion et d'identifier les zones du cerveau à éviter. Cette simulation de l'opération permet de rechercher les meilleurs gestes opératoires en profitant, en particulier, des voies d'accès les plus adéquates qu'offre l'anatomie (sillons, scissures, zones dites muettes, etc.). Ceci augmente la sécurité et raccourcit la durée opératoire;
- le guidage en temps réel pendant l'opération des gestes du neurochirurgien en visualisant la position précise des instruments chirurgicaux sur le modèle en 3D. L'extrémité et l'axe des instruments chirurgicaux manipulés pendant l'intervention sont repérés et le chirurgien visualise en temps réel leur progression. La précision est millimétrique.

Cette nouvelle technique chirurgicale, pilotée en temps réel par l'imagerie, permet de respecter au maximum les impératifs de la doctrine de Monro et Kellie : éviter les déplacements intempestifs du cerveau, éviter les compressions parenchymateuses, éviter les modifications de la pression intracrânienne. En pratique, la neuronavigation limite le rasage du crâne, réduit la taille de l'incision et celle du volet crânien. La précision du geste augmente et la chirurgie devient minimalement invasive. Certaines lésions, invisibles à la surface du cerveau (par exemple, des lésions sous-corticales), sont repérées avec grande précision. Il en est de même des limites, parfois très difficiles à repérer visuellement, entre le tissu tumoral (surtout pour les tumeurs gliales de bas grade) et parenchyme normal. Pour le patient, il en résulte une amélioration du traitement de même qu'une réduction de la durée de l'intervention et de l'hospitalisation.

La simulation préopératoire et le guidage intraopératoire permettent le traitement chirurgical de lésions qui, par le passé, n'étaient pas opérables ou seulement avec des risques importants. La visualisation de la lésion et des structures adjacentes permet de réduire la morbidité.

## L'IRM INTERVENTIONNELLE

Très performante, la neuronavigation présente cependant des limitations : si l'enceinte crânienne n'est pas déformable, il n'en va pas de même du parenchyme cérébral qui est soumis à plusieurs contraintes, à commencer par la gravité. L'orientation de la tête durant la procédure chirurgicale influence ainsi la position de l'encéphale qui peut changer. C'est que l'on appelle le «brain shift» (6). Durant l'opération, l'élimination de liquide céphalo-rachidien, surtout en cas d'ouverture du système ventriculaire, la réduction progressive du volume de la tumeur, la modification du parenchyme normal accentuent encore ce phénomène et modifient progressivement les repères anatomiques et pathologiques visibles sur l'imagerie préopératoire. Les images se périment peu à peu et il se crée alors inévitablement une perte de précision liée au décalage entre la réalité chirurgicale et les images acquises préalablement.

Il est apparu de plus en plus indispensable de corriger la neuronavigation par une réactualisation des données en cours d'intervention. Dans cette optique, l'échographie est un moyen simple et maniable qui offre une discrimination utile. Nous l'utilisons en routine en particulier pour des lésions extra-axiales comme les méningiomes ou pour des lésions intra-axiales comme les métastases. L'échographie est cependant limitée par sa résolution et sa définition (7, 8).

L'utilisation de fluorochromes comme l'acide 5-aminolévulinique (5-ALA) constitue également une option très intéressante pour les gliomes de haut grade. Ce métabolite, ingéré par voie orale en préopératoire, y est sélectivement incorporé et transformé en protoporphyrine IX, un pigment rosâtre visible sous rayonnement ultraviolet. La lésion tumorale apparaît donc fluorescente par rapport au tissu sain. Cette technique est cependant limitée à la chirurgie des gliomes malins et nécessite un microscope opératoire adapté (9, 10).

En réalité, l'avancée majeure dans le domaine de la neuronavigation est constituée par la possibilité d'acquérir pendant l'opération de nouvelles images de haute qualité qui actualisent la situation. C'est ici que l'IRM interventionnelle prend toute son utilité (11). Elle permet en effet la mise à jour des cartes du GPS selon la modalité d'imagerie la plus performante pour le cerveau. L'acquisition de nouvelles images IRM, durant l'intervention, permet d'incorporer en direct les nouvelles informations à l'ensemble du système et ainsi de pouvoir s'y repérer en temps réel (12-16).

Sur le plan pratique, l'appareillage dont dispose le service universitaire de Neurochirurgie du CHU de Liège est une IRM Polestar N20. Il se compose

d'une unité mobile placée sous la tête du patient et maintenue en place pendant l'intervention chirurgicale. L'aimant permanent (dont les deux éléments sont séparés par une distance de 27 cm) est capable de générer un champ magnétique de 0,15 Tesla pour l'acquisition d'images. Des séquences standards (T1, T2, et FLAIR) d'épaisseur et de durée d'acquisition variables peuvent être obtenues. Il est possible d'utiliser du gadolinium. L'acquisition des images nécessite d'isoler les aimants des influences électromagnétiques environnantes y compris le champ magnétique terrestre. Une tente d'isolation (Starshield) servant de cage de Faraday est déployée au-dessus du patient et de l'aimant pendant l'acquisition des images (Fig. 1).

L'IRM interventionnelle que nous utilisons est dite à faible champ (0,15 Tesla, ce qui constitue tout de même 3.000 fois le champ magnétique terrestre). Cela s'oppose aux IRM dites à haut champ (1,5 à 3 Tesla) utilisées pour les examens diagnostiques. Il en résulte que le champ de vue est plus limité (16 x 20 cm) et la définition des images de l'IRM interventionnelle est moindre que celle des images obtenues sur les appareillages IRM à haut champ. Cependant, toutes les structures anatomiques devant être vues pour actualiser les images peuvent

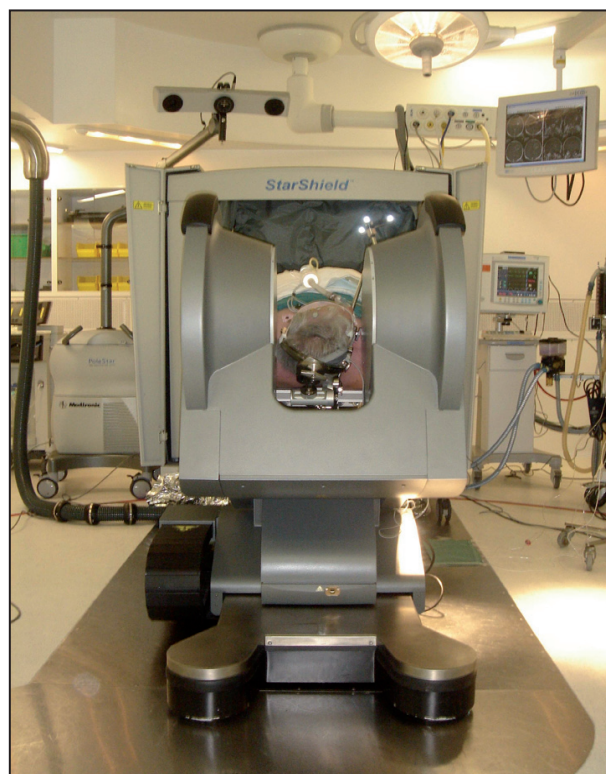


Figure 1. Vue de l'IRM interventionnelle Polestar N20 installée dans le service de Neurochirurgie du CHU de Liège. Le patient est installé sur une table opératoire conventionnelle. Le système de neuronavigation est mis en place et comprend les caméras (en haut à gauche), les écrans de contrôle (en haut à droite) et le système de repérage (les trois sphères réfléchissantes au centre). L'aimant de l'IRM est placé en position relevée pour permettre l'acquisition des images et la tente isolante (Starshield), formant une cage de Faraday, sera déployée.



Figure 2. Vue de la salle d'opération durant une intervention utilisant l'IRM. L'aimant reste sous les champs opératoires. Il sera déployé, sans enlever les champs, lorsqu'une actualisation des images de neuronavigation et une vérification de l'exérèse seront utiles. Aucune modification des procédures opératoires, y compris dans l'utilisation des instruments chirurgicaux même ferromagnétiques, n'est nécessaire.

l'être avec suffisamment de détails pour naviguer utilement. Au-delà de cet inconvénient (aisément contournable par la navigation conjointe sur les images à la fois pré- et per-opératoires), l'avantage majeur du bas champ est de pouvoir utiliser tous les instruments habituels y compris ferromagnétiques pendant l'opération. Aucune modification significative dans les habitudes du chirurgien ou de son environnement n'est requise (Fig. 2).

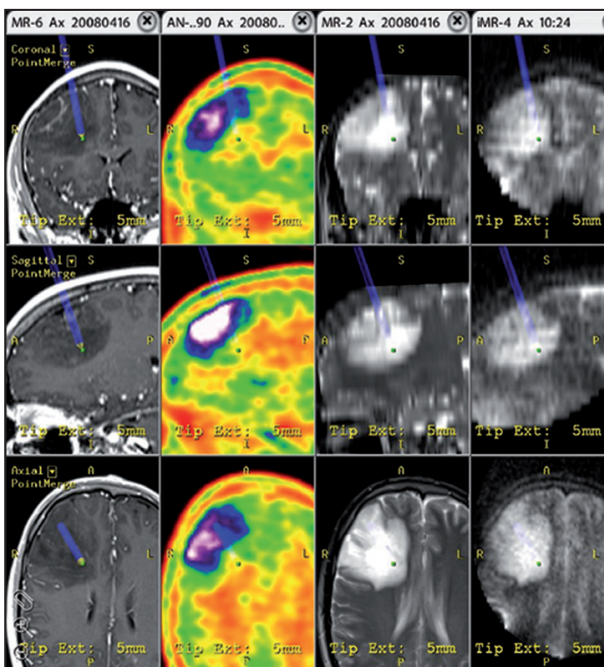


Figure 3. Ecran de contrôle du système de neuronavigation. La navigation peut être réalisée sur diverses modalités d'imagerie et dans divers plans anatomiques. Les images pré-opératoires (T1 avec injection de gadolinium, PET scan à la tyrosine et T2) figurent dans les trois colonnes de gauche. La colonne de droite montre les images obtenues pendant l'intervention avec l'IRM interventionnelle Polestar N20. Bien que tout le cerveau ne soit pas visible, la zone d'intérêt pour l'intervention peut être étudiée en détail. La tumeur, un oligodendrogliome, a fait l'objet d'une résection complète.

Au cours d'une résection tumorale, le neurochirurgien peut donc désormais naviguer avec ses instruments dans les images préopératoires selon différentes modalités fusionnées, et réactualiser les séquences IRM en cours d'intervention afin de pallier les déformations cérébrales (Fig. 3). En outre, et c'est un avantage majeur, il est également possible de suivre la qualité de son exérèse tout en naviguant dans ces nouvelles acquisitions (Fig. 4).

L'impact clinique de ce progrès technique majeur est toujours en cours d'évaluation, mais les quelques équipes qui ont le privilège de disposer de cette technique de par le monde ont déjà pu confirmer que son utilisation menait à la résection plus efficace des tumeurs cérébrales (17), y compris les adénomes hypophysaires (18-20).

Dans un avenir proche, l'application routinière pourra être généralisée à d'autres pathologies, notamment à la chirurgie de l'épilepsie ou la stéréotaxie. Plus encore, la remise à jour de l'information pourra inclure le versant métabolique et fonctionnel grâce à des recalages non rigides d'images préopératoires. Ainsi, s'il n'est pas concevable de réaliser une tomographie à émission de positons en salle d'opération, on envisage qu'un traitement numérique permette un recalage, en les déformant, des images PET et IRM préopératoires sur les images intra-opératoires actualisées.

Bien plus qu'un examen de contrôle per- et postopératoire précoce, l'IRM interventionnelle pourvoit donc la neuronavigation d'une dimension temporelle en lui permettant de s'adapter à une réalité changeante. Au-delà des prouesses de cet important progrès technologique, ceci permet

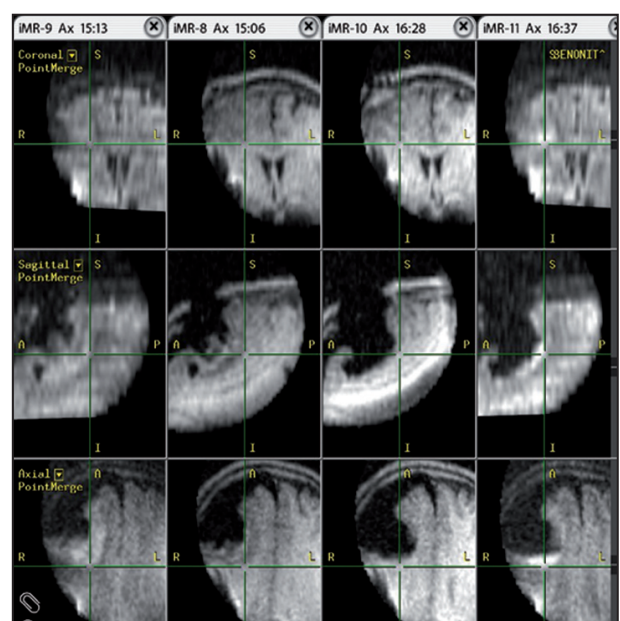


Figure 4. Progression de la résection d'un oligodendrogliome frontal droit en utilisant l'IRM interventionnelle Polestar N20.

de répondre aux exigences d'une expertise toujours plus grande dans le domaine de la prise en charge des pathologies tumorales intracrâniennes, et ce, au plus grand bénéfice de nos patients (21).

## BIBLIOGRAPHIE

- Haberland N, Ebmeier K, Hliscs R, Grnewald JP, et al.— Neuronavigation in surgery of intracranial and spinal tumors. *J Cancer Res Clin Oncol*, 2000, **126**, 529-541.
- Chen HJ.— Clinical experiences in neuronavigation. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2001, **6**, 145-147.
- Grunert P, Darabi K, Espinosa J, Filippi R.— Computer-aided navigation in neurosurgery. *Neurosurg Rev*, 2003, **26**, 73-99.
- Willems PW, Van Der Sprenkel JW, Tulleken CA, et al.— Neuronavigation and surgery of intracerebral tumours. *J Neurol*, 2006, **253**, 1123-1136.
- Fahlbusch R, Samii A.— Review of cranial imaging techniques: potential and limitations. *Clin Neurosurg*, 2007, **54**, 100-104.
- Nabavi A, Black PM, Gering DT, et al.— Serial intraoperative magnetic resonance imaging of brain shift. *Neurosurgery*, 2001, **48**, 787-797.
- Rasmussen IA Jr, Lindseth F, Rygh OM, et al.— Functional neuronavigation combined with intra-operative 3D ultrasound: initial experiences during surgical resections close to eloquent brain areas and future directions in automatic brain shift compensation of preoperative data. *Acta Neurochir*, 2007, **149**, 365-378.
- Unsgaard G, Rygh OM, Selbekk T, et al.— Intra-operative 3D ultrasound in neurosurgery. *Acta Neurochir*, 2006, **148**, 235-253.
- Stummer W, Novotny A, Stepp H, et al.— Fluorescence-guided resection of glioblastoma multiforme by using 5-aminolevulinic acid-induced porphyrins : a prospective study in 52 consecutive patients. *J Neurosurg*, 2000, **93**, 1003-1013.
- Stummer W, Pichlmeier U, Meinel T, et al., ALA-Glioma Study Group.— Fluorescence-guided surgery with 5-aminolevulinic acid for resection of malignant glioma : a randomised controlled multicentre phase III trial. *Lancet Oncol*, 2006, **7**, 392-401.
- Keles GE.— Intracranial neuronavigation with intraoperative magnetic resonance imaging. *Curr Opin Neurol*, 2004, **17**, 497-500.
- Kubben PL, van Santbrink H, Spincemaille GH, Vandertop WP.— Intraoperative MRI in brain surgery. *Ned Tijdschr Geneesk*, 2007, **151**, 2877-2882.
- Hall WA, Truwit CL.— Intraoperative MR Guided Neurosurgery. *J Magn Reson Imaging*, 2008, **27**, 368-375.
- Hall WA, Liu H, Maxwell RE, Truwit CL. Influence of 1,5-Tesla intraoperative MR imaging on surgical decision making. *Acta Neurochir Suppl*, 2003, **85**, 29-37.
- Schulder M, Salas S, Brimacombe M, et al.— Cranial surgery with an expanded compact intraoperative magnetic resonance imager. Technical note. *J Neurosurg*, 2006, **104**, 611-617.
- Ntoukas V, Krishnan R, Seifert V.— The new generation polestar N20 for conventional neurosurgical operating rooms : a preliminary report. *Neurosurgery*, 2008, **62**, 82-89.
- Jung TY, Jung S, Kim IY, et al.— Application of neuronavigation system to brain tumor surgery with clinical experience of 420 cases. *Minim Invasive Neurosurg*, 2006, **49**, 210-215.
- Gerlach R, du Mesnil de Rochemont R, Gasser T, et al.— Feasibility of Polestar N20, an ultra-low-field intraoperative magnetic resonance imaging system in resection control of pituitary macroadenomas : lessons learned from the first 40 cases. *Neurosurgery*, 2008, **63**, 272-284.
- Schwartz TH, Stieg PE, Anand VK.— Endoscopic transphenoidal pituitary surgery with intraoperative magnetic resonance imaging. *Neurosurgery*, 2006, **58**, S44-51.
- Nimsky C, von Keller B, Ganslandt O, Fahlbusch R.— Intraoperative high-field magnetic resonance imaging in transsphenoidal surgery of hormonally inactive pituitary macroadenomas. *Neurosurgery*, 2006, **59**, 105-114.
- Robe P, Martin D.— Actualités neurochirurgicales dans le traitement des tumeurs cérébrales. *Rev Med Liege*, 2007, **62**, 405-409.

Les demandes de tirés à part sont à adresser au Pr. D. Martin, Service de Neurochirurgie, CHU Sart Tilman, 4000 Liège, Belgique.