

La végétation par satellite

On étudie les échanges de carbone de la biosphère continentale en suivant les variations de couverture végétale du Globe.

Depuis 1750 environ, l'humanité rejette une quantité croissante de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère. Une partie du gaz libéré est fixée par les océans ou par les plantes et les sols, mais le reste s'accumule dans l'atmosphère, augmentant l'effet de serre et contribuant au réchauffement de la planète. Cette accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère sera-t-elle ralentie ou amplifiée par la végétation dans les prochaines décennies ? Pour étudier cette question, notre équipe s'est associée à celle de Gérard Dedieu, du Centre d'études spatiales de la biosphère, à Toulouse : ensemble, nous avons utilisé des capteurs embarqués à bord de satellites pour déterminer la production de matière organique par l'ensemble de la végétation mondiale, puis les échanges de dioxyde de carbone entre la végétation et l'atmosphère.

Les plantes fabriquent de la matière organique par photosynthèse en fixant le dioxyde de carbone de l'atmosphère, grâce à l'énergie solaire. Une partie de la biomasse formée est consommée par les herbivores, qui nourrissent eux-

mêmes des carnivores. Puis, lorsque les plantes et les animaux meurent, leur matière organique est décomposée en éléments minéraux assimilables par les plantes. Pendant la saison de croissance, la photosynthèse l'emporte sur la respiration des végétaux et des animaux, et les écosystèmes accumulent du carbone, qu'ils extraient de l'atmosphère. C'est l'inverse pendant la mauvaise saison.

Sur les continents, la photosynthèse n'a lieu que si des feuilles vertes absorbent le rayonnement solaire. Nous avons eu recours aux observations par satellite pour distinguer les feuilles vertes du sol nu : les feuilles, en effet, réfléchissent très peu le rouge (absorbé par la chlorophylle) et beaucoup le proche infrarouge (à cause des interfaces air-eau dans les feuilles) ; en revanche, les sols et les roches réfléchissent à peine plus le proche infrarouge que le rouge. On a donc construit des indices de végétation permettant, à partir de mesures par satellites, de calculer la fraction de sol occupée par de la végétation, puis le rayonnement solaire absorbé par cette dernière.

Le problème est un peu compliqué par l'atmosphère : d'une part, on doit

éliminer les zones couvertes de nuages, ce qui est un phénomène fréquent en zone équatoriale ; d'autre part, le contenu de l'air en vapeur d'eau et en aérosols modifie le spectre du rayonnement reçu par le satellite et impose des corrections atmosphériques.

Malgré ces difficultés, nous avons établi des cartes mensuelles du rayonnement solaire absorbé par la végétation, avec une résolution spatiale de un degré de latitude et de longitude. Nous avons ensuite calculé la photosynthèse qui, en première approximation, est égale au produit du rayonnement absorbé par une efficacité de conversion biologique. Cette efficacité a été prise identique pour tous les types de végétation sur la base de données expérimentales. Nous avons ensuite calculé la respiration des plantes, qui dépend de la température et de la quantité de biomasse qui respire, et nous avons finalement obtenu la production de biomasse sur l'ensemble des continents (voir la figure).

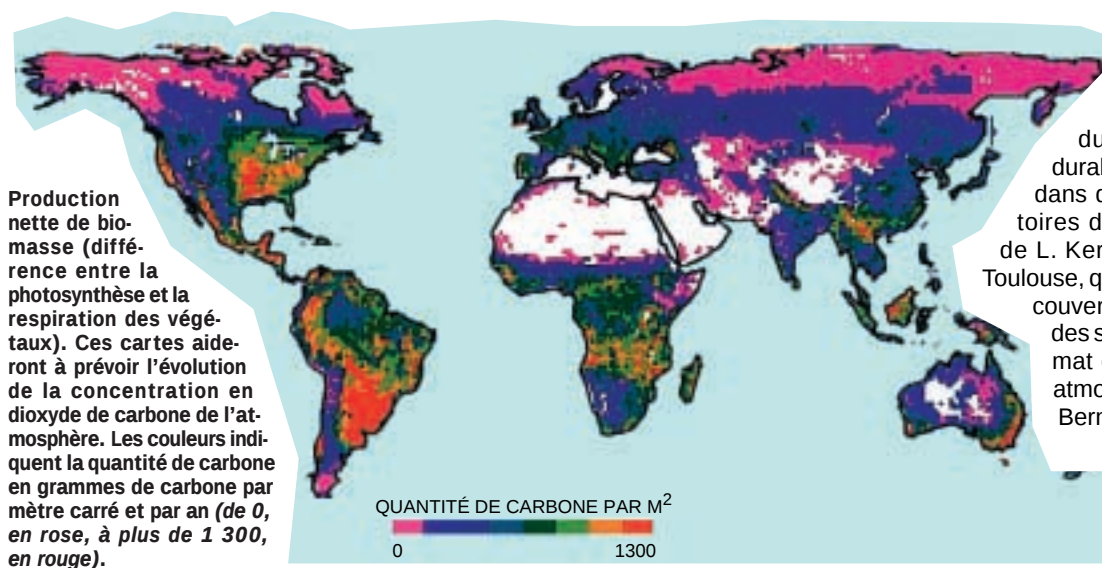
ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION

Revenons à la question initiale : comment évolue cette production végétale ? Chez la plupart des plantes, une augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone accroît la photosynthèse et la production de biomasse. On s'attend donc à ce que la végétation modère l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère en stockant un excédent de carbone dans la biomasse et dans la matière organique des sols ; toutefois l'effet observé fluctue beaucoup selon la température annuelle moyenne, la pluviométrie, etc. Notre suivi, année par année, du couvert végétal est en cours de corrélation avec les mesures globales de la concentra-

tion atmosphérique en dioxyde de carbone. Il restera à préciser si l'accroissement de production végétale est durable, ce qui est étudié dans de nombreux laboratoires dont le nôtre et celui de L. Kergoat, au CESBIO de Toulouse, qui simulent l'état de la couverture végétale à partir des seules données du climat et de la composition atmosphérique.

Bernard SAUGIER

et Anne RUMY
Laboratoire
d'écophysiologie
végétale, (URA
1492) Orsay



La vidéo-chirurgie

FRANÇOIS DUBOIS

Aujourd'hui, les chirurgiens introduisent par de petites incisions les instruments miniaturisés grâce auxquels ils pratiquent les opérations qui nécessitaient de larges ouvertures, douloureuses et difficiles à cicatriser.

Endormir, pénétrer dans l'organisme humain, traiter et réveiller : ces différentes étapes d'une opération chirurgicale ont été rendues moins traumatisantes au cours des 20 dernières années. Les améliorations réalisées en anesthésie et en réanimation ont permis de nouvelles interventions ; simultanément, la chirurgie vidéo-endoscopique parfois qualifiée, aux États-Unis, de «seconde révolution française» a bouleversé la pratique chirurgicale des 15 dernières années. Cette technique est née de la volonté des chirurgiens de limiter les conséquences physiologiques de l'agression, de minimiser les risques liés à une large incision des tissus et d'accélérer la cicatrisation. La chirurgie vidéo-endoscopique est une chirurgie très peu invasive.

Lors d'une intervention classique, dite ouverte, le chirurgien atteint, par une large incision, l'organe cible qu'il observe directement, touche, coupe ou suture, avant de refermer la plaie. Lors d'une intervention vidéo-endoscopique, le chirurgien n'observe pas directement l'organe, mais seulement une image transmise par un dispositif optique sur un écran de télévision ; il ne tient pas directement les ciseaux qui découpent ou les pinces qui arrêtent la circulation sanguine, et qui sont sous la paroi, mais il commande ces instruments par des poignées à l'extérieur.

Cette méthode, dont nous allons examiner le principe, les applications, les avantages – et aussi les inconvénients – a suscité une nouvelle querelle des Anciens et des Modernes. Les pionniers de la chirurgie vidéo-endoscopique se sont heurtés à la résistance de leurs pairs ; au début, on refusa de publier leurs résultats dans les revues scientifiques internationales.

Ils ont dû travailler dans la réprobation officielle et ont subi de nombreux sarcasmes : on les traitait de charlatans ou de chirurgiens philippins aux mains nues ! Puis, en 1990, les Américains se sont intéressés à la méthode et, sous la pression des futurs opérés, la chirurgie vidéo-endoscopique s'est répandue : la méthode est aujourd'hui reconnue et enseignée dans les facultés.

Cinq petites ouvertures

La chirurgie vidéo-endoscopique est issue de la laparoscopie, une méthode qui permettait d'observer l'intérieur de la cavité abdominale. En 1902, un médecin allemand, G. Kelling, a, le premier, introduit un cystoscope dans la cavité péritonéale (ou abdominale) d'un chien ; l'instrument utilisé était un trocart (un tube évidé) de quelques millimètres de diamètre, équipé d'une petite lampe à l'extrémité, introduite dans l'abdomen, et d'un oculaire, à l'autre extrémité, par laquelle le médecin observait.

Ce dernier avait d'abord injecté de l'air dans la cavité péritonéale afin de décoller les membranes du péritoine qui normalement adhèrent à l'intestin et qui en interdiraient l'observation. Quelques années plus tard, en 1910, le Suédois H.C. Jacobaeus semble avoir été le premier à explorer par ce procédé les cavités pulmonaires et abdominales de l'homme. Toutefois ces méthodes, d'abord strictement réservées à l'observation de l'intérieur du corps humain, restèrent confidentielles jusque dans les années 1950 ; elles se développèrent alors comme aide au diagnostic, en gynécologie et en pathologie digestive ou pulmonaire.

Bientôt quelques gestes chirurgicaux complétèrent la stricte observa-

tion : par le trocart introduit dans la cavité abdominale ou thoracique, on observait les organes, et l'on commençait à sectionner des brides (des tissus fibreux anormaux) de la plèvre, à prélever des biopsies de tissus, ou encore à ponctionner des organes pour retirer des kystes, par exemple.

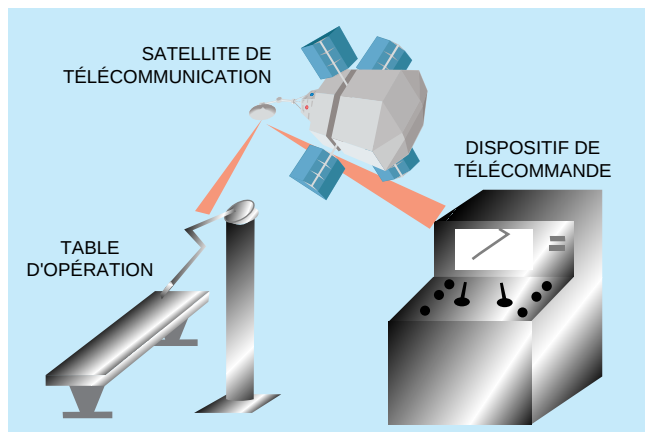
Au cours des années 1960, le système optique fut amélioré : on remplaça la petite lampe, à l'extrémité du trocart, par une source de lumière éloignée, transmise à l'extrémité de l'endoscope par des fibres optiques ; les tissus étaient mieux éclairés et n'étaient plus chauffés par la lampe. Dans les années 1970, les gynécologues Kurt Semm, à Kiel, Maurice Antoine Bruhat, de Clermont-Ferrand, et Hubert Manhès, de Vichy, ont fait les premiers gestes chirurgicaux sur des femmes : ils ont opéré sur des ovaires et sur des trompes de Fallope (qui relient les ovaires à l'utérus). Quelques opérations de chirurgie digestive ont été pratiquées au début des années 1980, mais elles restaient encore confidentielles.

En 1987, Philippe Mouret, à Lyon, fort de son expérience laparoscopique, réalise la première ablation coelioscopique de la vésicule biliaire, ou cholécystectomie. Dès les premières interventions, les chirurgiens ont eu besoin de toute une gamme d'instruments de petites dimensions, que l'on peut introduire dans l'abdomen par les trocarts. Les gestes opératoires – écarter les tissus, couper, recoudre, faire coaguler, arrêter la circulation, les mêmes qu'en chirurgie ouverte – nécessitent des instruments miniaturisés : pinces, ciseaux, porte-aiguilles, etc. Grâce à cette panoplie, on réalise progressivement par chirurgie endoscopique les mêmes opérations que par chirurgie classique.

En quoi consiste cette méthode? Le chirurgien pratique quatre ou cinq petites incisions (nommées points de ponction) pour introduire dans l'abdomen du patient anesthésié des trocards de cinq à dix millimètres de diamètre. L'un d'eux contient une fibre optique, reliée à la source lumineuse,

dont la lumière éclaire l'organe à opérer. Lors des premières opérations, le chirurgien observait l'organe éclairé par l'intermédiaire d'un télescope contenu dans le trocart. Il avait l'œil rivé sur l'oculaire du télescope, qu'il tenait d'une main, et il opérait de l'autre main. Aujourd'hui, le télescope est relié

à une microcaméra qui filme l'organe; l'image transmise est projetée sur un écran de télévision, de sorte que le chirurgien dispose de ses deux mains pour opérer, comme en chirurgie classique. Généralement, l'optique utilisée permet une observation dans l'axe du télescope, sur un champ aussi large que



1. LORS D'UNE OPÉRATION PAR VIDÉO-CHIRURGIE, Une microcaméra est introduite dans l'abdomen du patient et filme l'organe à opérer; l'image du «champ opératoire interne» est observée sur un écran de télévision (*en haut à gauche*). Le chirurgien commande les instruments introduits dans l'abdomen par des poignées. On peut penser que, dans quelques années, le chirurgien ne tiendra plus les poignées des instruments, mais les contrôlera d'une console où écran d'observation et commandes seront rassemblées (*figure du bas*). Comme le chirurgien ne touche plus le patient, sauf pour introduire les trocards et créer le champ opératoire interne, les opérations

très difficiles, exigeant des spécialistes qui sont parfois éloignés, pourraient faire appel aux moyens de télécommunication les plus élaborés: l'image de l'organe opéré, prise par la caméra, serait émise jusqu'à un satellite relais qui la retransmettrait sur le dispositif télévisuel de l'opérateur (*en haut à droite*). Observant son écran, le chirurgien «opérerait», et ses ordres seraient également transmis par l'intermédiaire du satellite: que le chirurgien soit à un mètre du patient ou à des milliers de kilomètres ne fait guère de différence. Du moins en théorie, car, en pratique, le chirurgien doit être présent pour recourir rapidement à la chirurgie ouverte, si nécessaire.

possible ; pour accéder à certaines zones, on utilise des télescopes qui, grâce à un jeu de miroirs, autorisent une vision latérale à 45, voire à 90 degrés ; des endoscopes flexibles facilitent l'exploration de tous les recoins.

Opérer un écran de télévision

Le télescope permet une exploration large de la cavité et l'observation des autres instruments. Outre ce trocart réservé à l'éclairage de la cible et à son observation, les autres contiennent les instruments : l'un contient les microciseaux, un autre les pinces qui saisissent les organes, un autre un écarteur qui repousse les tissus environnants pour libérer la zone d'intervention. La caméra filme l'organe et les instruments, de sorte que le chirurgien n'observe pas le champ opératoire directement, mais sur l'écran de télévision. Il actionne les instruments par l'intermédiaire de poignées, situées à l'extrémité des différents trocarts. Ses instruments sont ceux de la chirurgie classique : des ciseaux, des pinces, des porte-aiguilles, des écarteurs, des aspirateurs, tous adaptés à la chirurgie endoscopique, c'est-à-dire miniaturisés, allongés, orientables.

Reste une difficulté que nous n'avons pas encore évoquée : l'accès

à l'organe et sa visualisation. En chirurgie classique, le chirurgien ouvre la paroi et crée ainsi un champ opératoire, à l'air libre. En chirurgie vidéo-endoscopique, ce champ opératoire est formé par une « bulle d'air » créée en injectant du gaz dans l'espace qui sépare les deux feuillets du péritoine (les deux membranes qui recouvrent l'intestin), ou de la plèvre (les deux membranes qui recouvrent les poumons). On crée ainsi un pneumopéritoine ou un pneumothorax, dômes artificiels où les instruments évoluent librement.

Pour injecter le gaz, on utilise une aiguille dite de Veress, munie d'un dispositif de protection qui évite de blesser les organes une fois la membrane du péritoine traversée (l'aiguille se recouvre automatiquement d'un capuchon qui protège l'embout). Le gaz injecté doit être inerte et non toxique. De surcroît, il doit être soluble dans le sang afin de diminuer le risque d'embolie gazeuse : si le gaz n'était pas soluble, les bulles véhiculées par le sang risqueraient d'obstruer certains vaisseaux sanguins pulmonaires ou cérébraux. On utilise généralement du dioxyde de carbone.

En raison de certains inconvénients liés à l'usage de ce gaz et que nous évoquerons, les chirurgiens tentent de mettre au point des suspenseurs, des

sortes d'anneaux rigides qui décollent la paroi de l'organe. Toutefois, ces suspenseurs, malgré leurs avantages théoriques, sont encore imparfaits, et l'on soulève moins bien la paroi qu'avec un gaz sous pression.

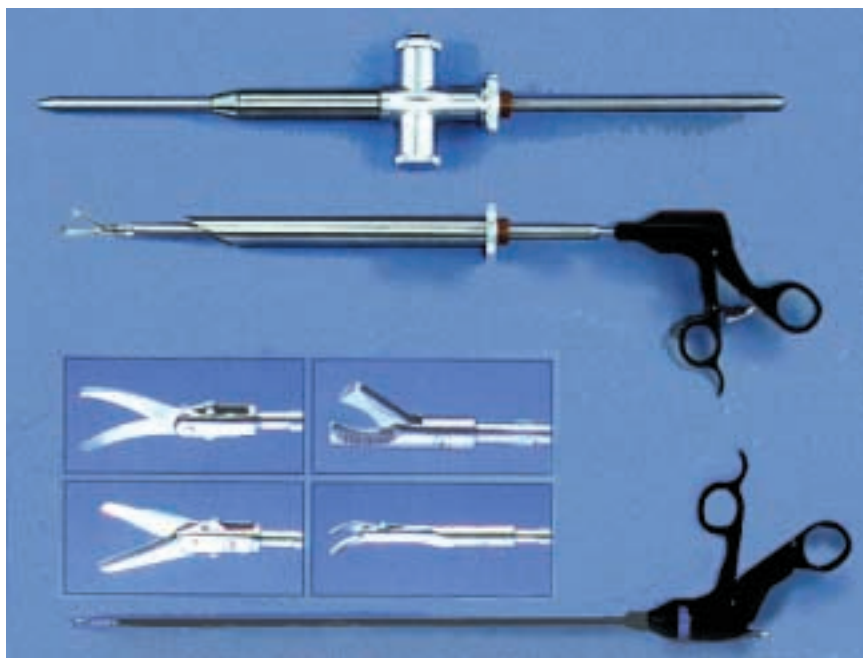
Au contraire, lors d'une intervention thoracique, l'usage de ce gaz n'est pas nécessaire : le poumon s'affaisse spontanément lorsque de l'air pénètre dans la cavité pleurale (entre les deux membranes de la plèvre qui recouvre le poumon). Normalement, le poumon adhère à la plèvre ; lorsque l'on inspire, la plèvre, entraînée par les côtes, se soulève, et les poumons, en dépression, s'emplissent d'air. Lorsque de l'air pénètre dans la plèvre, l'entraînement mécanique normalement exercé par les côtes cesse, et les poumons ne se remplissent plus. L'espace entre le poumon affaissé et les côtes permet au chirurgien d'opérer par vidéo-endoscopie.

Les domaines d'application

Pendant deux à trois ans, la vidéo-chirurgie endoscopique a été quasi réservée aux interventions sur la vésicule biliaire. Puis, dès 1989, elle a étendu son domaine à d'autres interventions digestives. En 1990, la chirurgie vidéo-endoscopique s'est répandue comme un raz de marée parmi les chirurgiens du monde entier et, aujourd'hui, elle s'applique à presque toutes les interventions sur l'appareil digestif, les poumons et la plèvre, à la chirurgie orthopédique, à la neurochirurgie, à la chirurgie du nez, de la gorge et des oreilles, à celle de l'appareil urinaire et même à la chirurgie plastique. Nous nous limiterons aux applications en chirurgie digestive, gynécologique et pulmonaire.

Dans ces domaines, pratiquement toutes les interventions peuvent être réalisées sous vidéo-endoscopie, mais il faut distinguer les opérations qui sont désormais du domaine quasi exclusif de la chirurgie vidéo-endoscopique et celles qui restent du domaine de l'exploit. On pratique couramment par chirurgie vidéo-endoscopique la chirurgie des trompes et des ovaires (quand il ne s'agit pas de cancer), l'ablation de la vésicule biliaire, l'appendicectomie, la cure des hernies de l'aîne et, en chirurgie thoracique, la resection de bulles d'emphysème ou encore les pleurectomies (ablation de la plèvre).

En revanche, un chirurgien doit déjà avoir une bonne expérience de la chi-



2. LA PANOPLIE DES INSTRUMENTS utilisés en vidéo-chirurgie ressemble à celle de la chirurgie classique, mais tous les instruments sont miniaturisés. Des trocarts (*en haut et au milieu*) sont des tubes métalliques creux, où l'on introduit soit la source lumineuse qui éclaire le « champ opératoire interne », soit les instruments, tels des pinces ou des ciseaux (*en bas*), avec lesquels le chirurgien opère. Ces instruments mesurent entre 40 et 50 centimètres de long.

rurgie vidéo-endoscopique pour réaliser par cette voie une hystérectomie (ablation de l'utérus), le traitement des hernies hiatales (ascension de l'estomac dans le thorax, avec remontée d'acide), une splénectomie (ablation de la rate), ou toute intervention en chirurgie pédiatrique.

Enfin, seuls des centres très spécialisés pratiquent des exérèses pancréatiques (ablation du pancréas), des gastrectomies (ablation de l'estomac), des résections pulmonaires (ablation partielle d'un lobe pulmonaire) et certaines interventions cardio-vasculaires. L'équipe d'Alain Carpentier, à l'hôpital Broussais, a pratiqué, pour la première fois, le 26 février 1996, une intervention à cœur ouvert sur une patiente atteinte de graves lésions de la valve située entre l'oreillette et le ventricule gauche.

La salle d'opération

Une opération par chirurgie vidéo-endoscopique met en œuvre une grande quantité d'appareils dans une salle d'opération déjà très encombrée par la table d'opération, les projecteurs, le générateur de bistouri électrique, les appareils d'anesthésie, de radiologie et d'échographie : ainsi la chirurgie vidéo-endoscopique nécessite-t-elle des salles d'opération de grandes dimensions, car on doit aussi pouvoir recourir, à tout instant, et parfois de façon urgente, à la chirurgie classique (quand une complication imprévue survient, le chirurgien recourt aux méthodes classiques et ouvre l'abdomen).

Les instruments spécifiques de la vidéo-chirurgie sont l'insufflateur de gaz qui injecte le gaz carbonique à un débit et à une pression déterminés et qui contrôle automatiquement ces paramètres durant toute l'intervention ; un dispositif qui injecte du sérum sous pression pour nettoyer la cavité après l'intervention ; une source de lumière puissante et d'intensité modulable ; une caméra et son moniteur, qui transmet l'image sur un écran, et un magnétoscope, qui enregistre les images. L'instrumentation comprend les éléments nécessaires pour créer et maintenir le pneumopéritoine, et les instruments pour réaliser le geste chirurgical lui-même.

En chirurgie, on utilise des instruments qui sont nettoyés et stérilisés après chaque intervention et qui ont une durée de vie très longue,



3. VUE FACTICE D'UN «CHAMP OPÉRATOIRE INTERNE» : cette illustration représente l'organe sur lequel le chirurgien intervient (l'estomac) et les instruments qu'il utilise. La source lumineuse est transmise par le trocart situé au milieu au premier plan. Les autres instruments soulèvent les tissus ou les incisent. Cette vue correspond à celle que transmet une microcaméra, introduite dans l'abdomen pour filmer l'opération.

parfois supérieure à celle du chirurgien lui-même. Du fait de leur complexité et de leur fragilité, les instruments endoscopiques sont difficiles à nettoyer, à stériliser et à entretenir. À cela s'ajoute la crainte de transmission de virus, tels le VIH ou celui de l'hépatite C, de sorte que le matériel à usage unique tend à se développer : ce matériel ne sert qu'à une seule opération, est produit en grande série, livré stérilisé, prêt à l'emploi, puis jeté après usage, ce qui épargne beaucoup d'heures de main-d'œuvre. Certains instruments sont livrés en «kits» à usage unique adaptés à tel ou tel type d'opération.

Des générateurs d'ultrasons miniaturisés peuvent être introduits par les trocarts et servir soit au diagnostic, soit au traitement : ils permettent de réaliser des échographies *in situ*, ou de pulvériser des calculs biliaires ou urinaires avec précision, puisque la source destructrice est amenée au contact du calcul à fragmenter. Le laser découpe, vaporise et coagule. Le plus utilisé en gynécologie est le laser à CO₂, qui assure bien les coagulations de surface, mais il n'est pas transporté par les fibres optiques. On peut également utiliser un laser pulsé pour fragmenter les calculs et faciliter leur extraction. Toutefois, en raison de son coût, et parce que d'autres techniques sont aussi performantes, le laser tend à être abandonné pour la chirurgie digestive.

Une chirurgie peu agressive

Les techniques mini-invasives, et surtout la chirurgie vidéo-endoscopique, se sont notablement développées au cours des dernières années, car leurs avantages sont multiples.

Le traumatisme lié à l'acte opératoire est réduit par rapport à une opération par chirurgie ouverte ; la plaie opératoire est minime, et une ouverture de dix centimètres, par exemple, est plus douloureuse et plus longue à cicatriser que cinq incisions de deux centimètres. La douleur liée aux petites cicatrices est faible et gêne peu le mouvement et la respiration ; on évite le risque de rupture de la suture, source d'éventration ; le traumatisme viscéral, péritonéal ou pleural est réduit : les viscères restent dans leur milieu naturel, ne sont ni refroidis, ni desséchés, ni irrités par le contact des compresses ; ils sont manipulés au minimum. De ce fait, les contractions de l'intestin sont peu perturbées et le transit reprend rapidement.

L'opéré ressent peu de douleurs de paroi, peu de ballonnements post-opératoires, peu de gêne respiratoire, de sorte qu'il peut se lever et s'alimenter rapidement après le réveil, ce qui évite les complications liées à l'alitement : une mauvaise circulation sanguine dans les membres inférieurs avec risque de phlébite (obstruction des veines),

les risques d'infection pulmonaire ou urinaire, qui grèvent la chirurgie classique, surtout chez les sujets «à risques», telles les personnes âgées, handicapées, cardiaques ou obèses.

La période de diète préopératoire est réduite et les habitudes alimentaires des opérés changent peu. L'incapacité engendrée par l'acte opératoire est réduite ; les durées d'hospitalisation et d'arrêt de travail diminuent, avantage essentiel de la méthode, pour l'opéré et pour la société.

Au cours de l'opération, l'observation et l'exploration sont de bonne qualité, car le dispositif optique utilisé grossit les tissus observés entre cinq et quinze fois et révèle des détails que l'œil nu ne percevrait pas. De surcroît, le télescope étant orientable dans toutes les directions, il transmet l'image des moindres recoins, et le chirurgien qui voit la totalité de la cavité péritonéale, peut l'explorer aussi bien, voire mieux, que par une ouverture classique, même très large.

En outre, en raison de la discrétion des incisions, on minimise les risques de contamination par l'air : en chirurgie ouverte, la plaie risque d'être infectée par des micro-organismes véhiculés par l'air ou par le contenu des viscères. Le préjudice esthétique est minime : les points d'incision laissent peu de traces et sont dissimulés dans des replis de la peau. Enfin, cette méthode réduit les risques d'adhérences postopératoires : après une intervention, une cicatrice interne

crée un tissu fibreux qui empêche les tissus de glisser librement dans la cavité abdominale : l'intestin, par exemple, risque de s'enrouler autour de telles brides de tissu fibreux, provoquant une occlusion intestinale. Comme le traumatisme est moindre lors d'une opération par vidéo-endoscopie, ce tissu fibreux est moins abondant et les risques d'adhérence sont réduits.

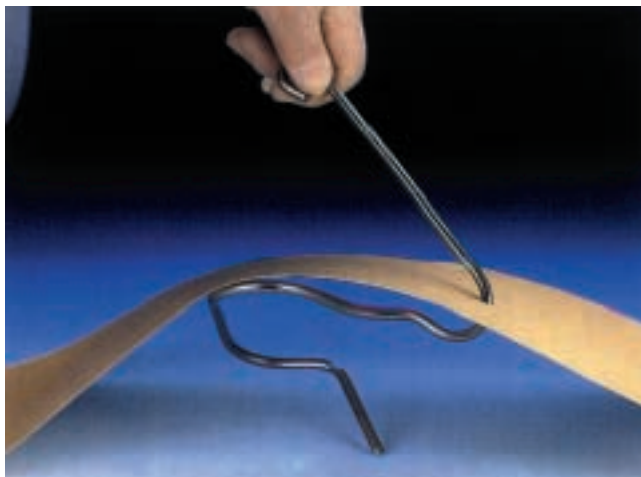
Les inconvénients

Toutefois, la méthode n'est pas totalement dénuée d'inconvénients potentiels. Pour le chirurgien, il s'agit d'une chirurgie fatigante, qui nécessite une attention de tous les instants. Au-delà de quelques heures, quatre environ (ce qui n'est pas très fréquent), l'opérateur devrait être remplacé : tels des copilotes, des «cochirurgiens» devraient opérer ensemble. De plus, le chirurgien n'observe pas les organes en relief, en trois dimensions, mais sur un écran en deux dimensions ; il doit reconstruire mentalement le relief, ce qui exige un certain entraînement. Il ne peut plus s'aider du sens du toucher, qui le renseigne en chirurgie ouverte, et l'absence de palpation manuelle est mal palliée par les instruments. Ainsi, un chirurgien habitué aux méthodes classiques doit se «recycler», contrainte souvent longue, pénible et onéreuse.

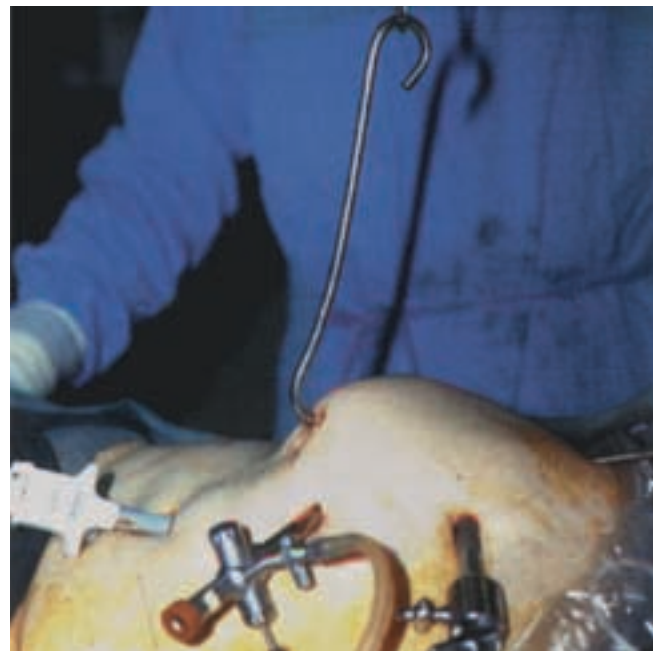
Pour le malade, l'intervention n'est pas dénuée de quelques risques, tels que des blessures d'organes ou de vais-

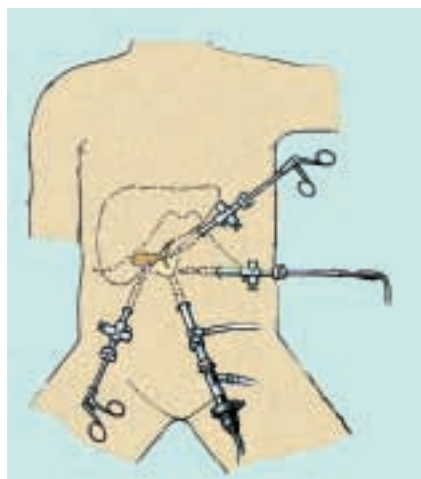
seaux lors de l'introduction des trocars, mais ces accidents sont rares. De plus, l'utilisation de dioxyde de carbone sous pression – même si la pression est modérée et contrôlée en permanence – risque d'entraîner une augmentation de la concentration sanguine en dioxyde de carbone, laquelle se traduit par une augmentation de l'acidité du sang ; lors des interventions longues, et chez les sujets fragiles, cette hyperacidité sanguine peut déclencher des épisodes de tachycardie. Enfin, si le gaz dissous est brusquement libéré, le risque d'embolie gazeuse, minime, existe.

En plus des complications qui peuvent survenir au cours de l'opération, certaines apparaissent après : on constate une augmentation des complications locales, par exemple les fuites biliaires après cholécystectomie ou des fistules digestives (fuites de liquide digestif dues à des perforations de la paroi intestinale). Généralement, on ignore l'origine de ces complications, mais elles résultent souvent de l'utilisation d'un instrument qui n'était pas adapté, d'une technique approximative ou même – paradoxalement – d'un avantage de la technique que nous avons souligné : l'absence d'adhérences. Le tissu fibreux qui se forme après les opérations par chirurgie ouverte, s'il est parfois responsable d'occlusion, sert aussi de «colle», colmatant les éventuelles petites fissures mal suturées. En l'absence de ce tissu fibreux, des fistules



4. POUR DÉCOLLER la paroi abdominale des organes à opérer, on peut injecter un gaz sous pression, généralement du dioxyde de carbone. Toutefois, l'usage de ce gaz n'est pas dénué de risques, et certains chirurgiens préfèrent décoller mécaniquement la paroi à l'aide d'un suspenseur (le principe en est illustré ci-dessus). Ce dernier est suspendu à un crochet dont la hauteur règle celle de la paroi abdominale (à droite).



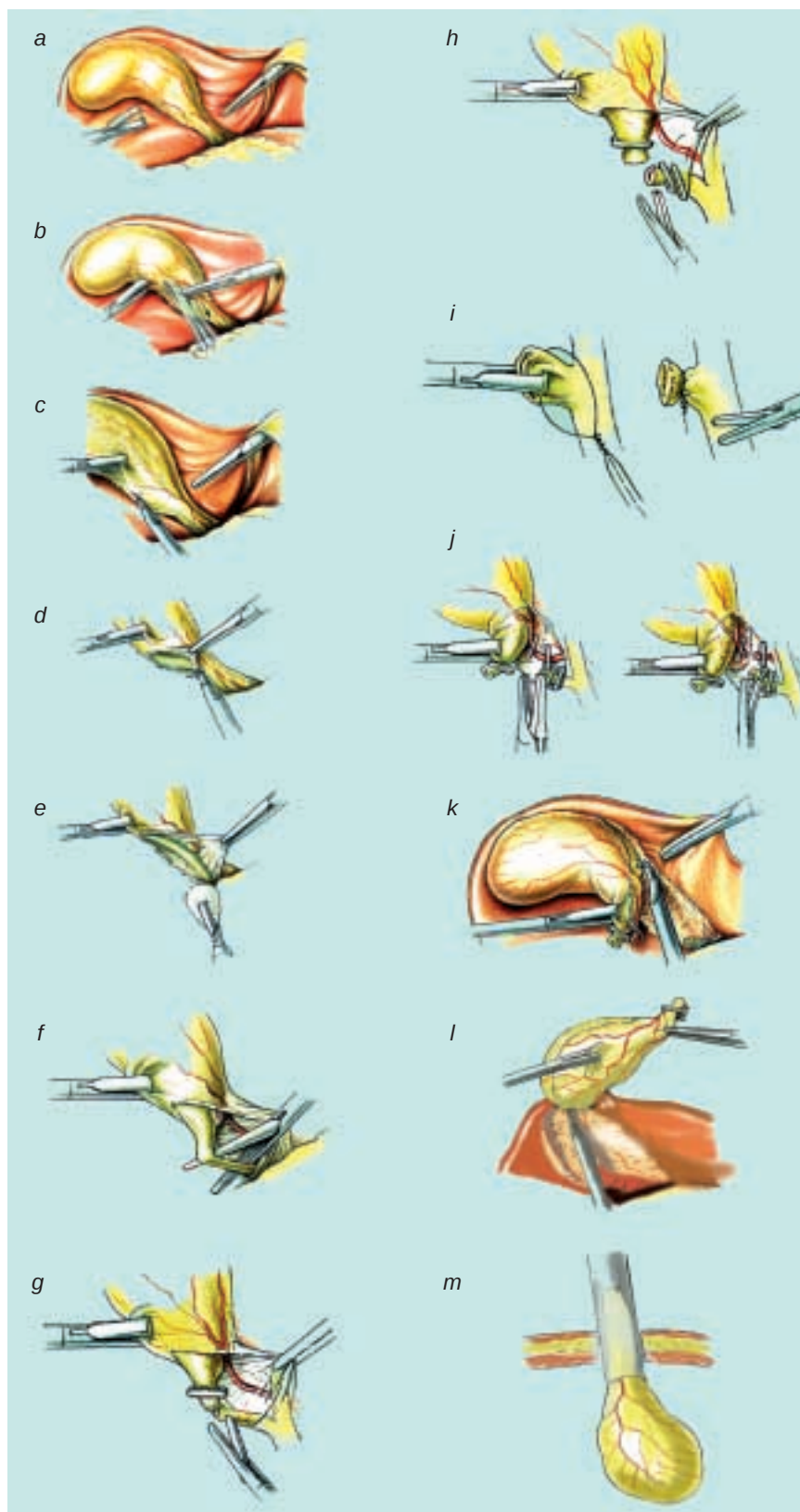


risquent d'apparaître. L'usage de la chirurgie vidéo-endoscopique est controversé dans les affections malignes, car on pense – sans en avoir la preuve – que les cellules cancéreuses risquent d'être disséminées.

Le coût de la chirurgie vidéo-endoscopique n'est pas encore estimé précisément, car de multiples facteurs, de nature opposée, interviennent. Toutefois, la réduction des durées d'hospitalisation et d'arrêt d'activité diminuent incontestablement les coûts : une intervention pratiquée par vidéo-chirurgie peut coûter jusqu'à deux fois moins cher que la même opération par chirurgie classique.

En revanche, l'installation est onéreuse : les instruments et l'installation spécifique de la vidéo-chirurgie, nommée la « colonne » (voir la figure 7) coûtent environ 250 000 francs, et il est prudent de disposer de plusieurs unités, pour pallier les pannes éventuelles. Le coût de l'entretien est élevé, et la maintenance nécessite de faire appel à des techniciens spécialisés. De plus, certaines équipes choisissent des instruments à usage unique, mais les bilans économiques des deux techniques (instruments stérilisés à usages multiples ou instruments à usage unique) ne sont pas encore bien établis.

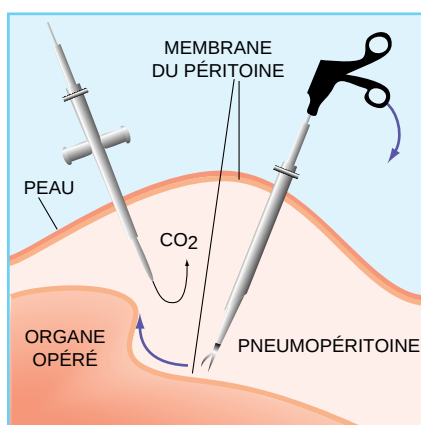
Certaines interventions durent plus longtemps, immobilisant davantage le personnel et les salles d'opération. Une heure de salle d'opération coûte 6 000 francs, soit l'équivalent de deux journées d'hospitalisation. L'évolution des techniques chirurgicales entraînera celle des centres de soins : les futurs hôpitaux offriront moins de lits d'hospitalisation, mais nécessiteront des plateaux techniques de plus en plus complexes et coûteux.



5. L'ABLATION DE LA VÉSICULE BILIAIRE, ou cholécystectomie, comprend plusieurs étapes : une fois les différents trocars introduits dans l'abdomen (en haut à gauche), la première étape consiste à dégager la vésicule au moyen de pinces (a) et à libérer l'« embouchure » (b à e). Lorsque ce canal est dégagé (f), on le ligature au moyen d'agrafes, et l'on coupe entre ces agrafes (g et h). Il faut ensuite faire un nœud autour de l'extrémité coupée qui reste en place (i). On interrompt la circulation sanguine et l'on coupe l'artère qui irrigue normalement la vésicule biliaire (j). La vésicule est désormais indépendante du reste de l'organisme, et il faut la retirer. Au moyen de pinces et de scalpels, le chirurgien dégage complètement l'organe (k et l) et l'extirpe par un des trocars (m).

La gestuelle du chirurgien

Comment devient-on vidéo-chirurgien ? L'enseignement de la chirurgie comporte un aspect théorique, assuré par les cours et par les livres, et un aspect technique artisanal, qui s'apprend par compagnonnage : le futur chirurgien commence par regarder celui qui opère, puis il l'aide, d'abord en second, puis en premier ; ensuite, il se fait assister par un chirurgien chevronné et, enfin, il opère seul, en demandant conseil en cas de difficulté. Cette période d'apprentissage dure entre quatre et cinq ans. Il en est de même pour pratiquer la chirurgie vidéo-endoscopique :



tout chirurgien doit désormais être capable d'opérer par les deux techniques et de passer de l'une à l'autre.

En chirurgie vidéo-endoscopique, la gestuelle n'est pas naturelle : le chirurgien ne voit directement ni les organes à traiter, ni les instruments qu'il utilise. Il suit ses gestes sur un écran sans relief, et l'axe de vision est différent de l'axe de ses mouvements. De surcroît, les gestes sont inversés : comme l'instrument pivote autour du point d'introduction du trocart dans les tissus, on doit pousser vers la gauche quand on veut que les ciseaux aillent vers la droite (voir la figure 6). Pour l'apprentissage, on utilise des « fantômes », des mannequins, et l'on s'entraîne à réaliser les gestes de la dissection, de la section, de la ligature, des sutures, des nœuds, etc. Cela est lassant, voire humiliant, pour un chirurgien habitué à faire ces gestes instinctivement et élégamment et qui redevient maladroit et pataud !

Cette formation à la chirurgie vidéo-endoscopique des chirurgiens déjà qualifiés a soulevé plusieurs difficultés. Entre 1990 et 1992, la plupart des chirurgiens ont dû se reconverter à cette discipline nouvelle, mais les équipes capables de les former étaient peu nombreuses : les délais étaient souvent

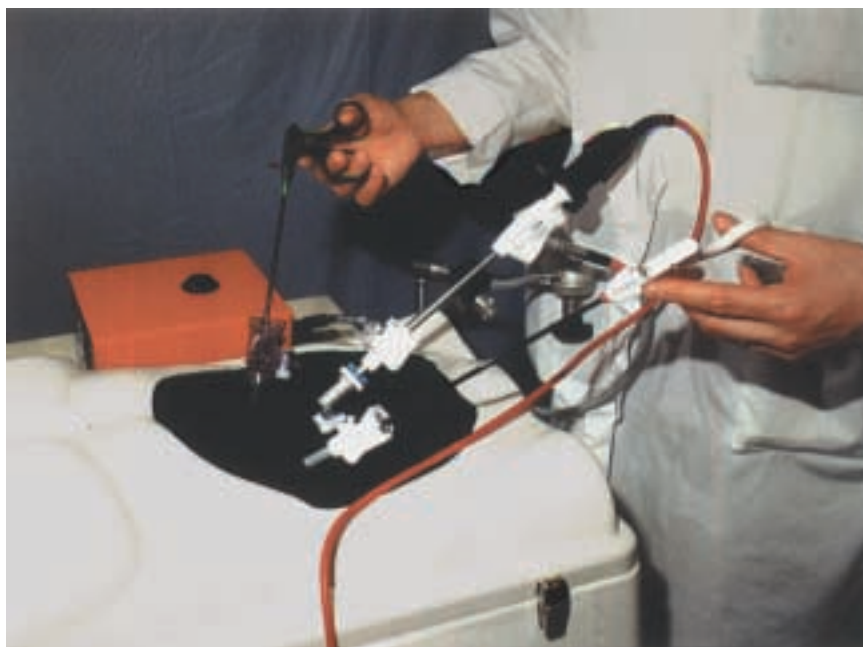
longs, et la qualité de l'enseignement parfois médiocre. Aujourd'hui, les centres de formation, tant publics que privés, sont nombreux et compétents, et la plupart des universités dispensent un enseignement à la fois théorique et pratique, sanctionné par un diplôme auquel ont accès aussi bien les internes en chirurgie que les chirurgiens déjà en activité.

Aussi bien que les pilotes de ligne s'entraînent sur des simulateurs de vol, les chirurgiens pourraient-ils s'exercer sur des simulateurs ? Non, du moins pour le moment, d'une part en raison du coût et du marché limité que représenteraient de tels simulateurs de vidéo-chirurgie et, d'autre part, en raison d'une difficulté technique difficilement surmontable : contrairement à un relief ou à une piste d'atterrissage fixes, les organes abdominaux sont mobiles et se modifient sous l'action de chaque geste chirurgical. La modélisation est difficile, car on ne peut prévoir les réactions et les mouvements des organes. Au contraire, pour les organes immobiles, tels le cerveau, l'œil, l'oreille et le système ostéo-articulaire, on peut envisager des simulateurs et une chirurgie assistée par ordinateur.

Si l'apprentissage de la gestuelle se fait sur des fantômes inertes, certains gestes, tels la création d'un pneumopéritoine ou le contrôle d'une hémorragie, doivent être réalisés sur des sujets vivants ; en dépit des questions éthiques soulevées par l'expérimentation animale, mieux vaut que le chirurgien s'entraîne sur un animal que sur l'homme !

L'expérimentation animale reste indispensable à la recherche, à la mise au point et à l'étude des conséquences de ces techniques de pointe ; les données doivent être recueillies chez un mammifère aussi proche de l'homme que possible sur le plan physiologique. L'animal le plus utilisé est le porc de 30 kilogrammes. D'ailleurs, les chirurgiens de pays tels que la Grande-Bretagne, où l'expérimentation animale est interdite, viennent apprendre les techniques de vidéo-chirurgie en France ou en Allemagne.

La vidéo-chirurgie étendra son domaine d'action à mesure que la technique progressera. Les interventions qui restent aujourd'hui du domaine de l'exploit deviendront routinières et sûres. Certains inconvénients actuels, par exemple l'utilisation de dioxyde de carbone, seront mieux maîtrisés, voire



6. DES MAQUETTES servent à l'apprentissage de la vidéo-chirurgie. Un chirurgien habitué à la chirurgie classique dite ouverte, doit réapprendre tous les gestes, et s'accoutumer aux difficultés que présente la méthode : il ne voit pas directement l'organe opéré, mais une image, à deux dimensions, projetée sur un écran de télévision ; il ne peut s'aider du sens du toucher qui le renseigne en chirurgie ouverte, et il doit s'habituer à inverser ses gestes : les trocarts étant mobiles autour d'un point fixe (l'endroit où ils pénètrent dans la peau), quand il veut amener l'outil vers la gauche, il doit pousser la poignée vers la droite (voir le schéma, en haut).



7. LA «COLONNE» qui sert aux interventions par vidéo-chirurgie comporte une source lumineuse, un dispositif de contrôle de la pression du gaz injecté sous la paroi abdominale, un dispositif de reconstruction des images enregistrées par le télescope d'observation, un écran qui projette ces images et un magnétoscope qui les enregistre.

supprimés. Le travail du chirurgien sera facilité par l'utilisation d'instruments plus aisés à manier. Des procédés simples permettront aux chirurgiens de voir en trois dimensions : les techniques actuelles nécessitent le port de lunettes inconfortables ou un recours peu satisfaisant à l'holographie.

Chirurgie sans chirurgien ?

Les futurs dispositifs optiques amélioreront la résolution et élargiront le champ d'observation pour les trocars de faible diamètre. Des porte-caméra télécommandés réagiront à des capteurs fixés sur la tête de l'opérateur ou seront commandés par la voix : il suffira au chirurgien de tourner la tête vers la droite ou d'ordonner «droite» pour que l'instrument ainsi commandé «obéisse». La télémanipulation fait également l'objet d'un programme de recherche européen dans le cadre du projet *Eurêka* ; des micromoteurs et des microcapteurs devraient permettre d'automatiser certaines interventions.

Ainsi quelques prothèses de hanche ont déjà été posées avec davantage de

précision grâce à des ordinateurs : l'image tridimensionnelle de l'os sur lequel l'intervention doit avoir lieu est numérisée grâce à des radiographies et à des images obtenues par scanner ; l'ordinateur définit le canal à percer pour que la prothèse s'ajuste parfaitement ; grâce à des micromoteurs commandés par l'ordinateur, l'os est percé, et la prothèse est mise en place.

Reste un pas à franchir : si l'homme est assisté de machines suffisamment performantes pour le remplacer, si le chirurgien n'observe plus l'organe qu'il opère, mais une image de cet organe sur un écran de télévision, il n'est plus nécessaire qu'il soit dans la salle d'opération, ni même à proximité : il pourrait être à des milliers de kilomètres. Les systèmes de transmission des images par satellite pourraient permettre de s'affranchir de la présence directe de l'opérateur, qui officierait à distance. Toutefois, le temps de transmission de l'information (un dixième de seconde pour que l'image parvienne au chirurgien et un dixième de seconde pour que l'ordre soit transmis) risque d'être supérieur à ce que l'on tolère si, par exemple, une hémorragie se déclenche.

Enfin, le chirurgien peut décider à tout moment de recourir à la chirurgie ouverte, si bien que la vidéo-chirurgie à distance, réalisable en théorie, ne sera peut-être jamais pratiquée couramment. Les progrès de la robotique, de l'intelligence artificielle et de la télématique aideront sans doute les chirurgiens à réaliser avec sécurité des actes dont la simple évocation paraît aujourd'hui osée, mais la chirurgie sera encore longtemps pratiquée par des chirurgiens.

François DUBOIS, membre de l'Académie de chirurgie, est professeur à la Faculté et chirurgien des Hôpitaux de Paris.

F. DUBOIS, *Cholécystectomie sous cœlioscopie*, in *Nouvelle Presse Médicale*, n° 18, p. 980, 1989.

J. TESTAS et B. DELAITRE, *Chirurgie digestive par voie cœlioscopique*, éditions Maloine, 1991.

Ph. MOURET, *La cholécystectomie endoscopique à 4 ans*, Lyon Chirurgical, 87, 179, 1991.

M.A. BRUHAT et F. DUBOIS, *Cœlio-chirurgie abdomino-pelvienne*, Springer, 1992.

A. CUSHIERI, G. BUSS et J. PERISSAT, *Operative Manual of Endoscopic Surgery*, Springer-Verlag, 1992.

Lumière et trous noirs

NORBERT QUIEN • RAINER WEHRSE • CHRISTOPH KINDL

L'exemple d'un disque de matière qui tourne autour d'un trou noir illustre l'effet d'un fort champ de gravitation sur la propagation de la lumière. Des simulations sur ordinateur font apparaître comment les images se déforment et se multiplient.

«Très bien, dit le Chat, et cette fois il s'évanouit lentement, en commençant par le bout de sa queue pour finir par le sourire qui demeura en suspens quelque temps après tout le reste.

«Eh bien, j'ai souvent vu un chat sans sourire, pensa Alice, mais un sourire sans chat ! C'est bien la chose la plus étrange que j'aie jamais vue !».

Lewis CARROLL,
Alice au pays des merveilles

Une étoile très massive, qui s'effondre en trou noir à la fin de sa vie, illustre une propriété essentielle des objets physiques : le couplage de la matière et de la masse. Tout comme le chat du Cheshire de Lewis Carroll, qui disparaît dans le néant en ne laissant que son sourire, la matière de l'étoile s'évanouit, ne laissant que la masse et son champ gravitationnel. La matière située à proximité tombe vers le centre immatériel de la masse, où elle disparaît ; ainsi la masse du trou noir et l'intensité de son champ gravitationnel ne cessent de croître avec le temps.

Les objets massifs et compacts comme les trous noirs engendrent des effets spectaculaires et singuliers. La matière, aspirée dans un tel maelström cosmique, n'en échappe plus jamais ; la gravitation est si intense que même la lumière y est piégée. Comme il est impossible d'extraire la moindre information sur ce qui se produit à l'intérieur d'une sphère dite de Schwarzschild entourant la masse, cette sphère est un horizon infranchissable. À l'intérieur de cette sphère de Schwarzschild, les rayons lumineux sont si courbés qu'ils bouclent sur eux-mêmes.

Même à l'extérieur de cet asile interdit, on observe des phénomènes étranges. Les rayons lumineux qui passent à proximité sont fortement déviés et peuvent même tourner plusieurs fois autour du trou noir.

Au XVIII^e siècle déjà, on supputait l'existence d'objets qui, par leur masse imposante, captureraient la lumière qu'ils émettaient et restaient invisibles pour un observateur éloigné. Le géologue et astronome britannique John Mitchell (1724-1793), puis le mathématicien et physicien Pierre Simon de Laplace (1749-1827) ont élaboré les premières représentations de ces corps célestes. Il y a 30 ans, lorsque les théories modernes de la physique permirent des calculs plus précis, la majorité des astronomes se persuadèrent que les trous noirs existaient.

Comme aucun rayonnement ne peut s'en échapper, il est difficile de prouver l'existence de ces objets étranges : on ne peut qu'observer l'effet de leur énorme champ gravitationnel sur la matière proche. Ainsi l'afflux des nuages de gaz, ou les étoiles déchirées par les marées induites par le trou noir, doivent former un disque d'accrétion autour du trou et tourner à très grande vitesse. Au cas où, selon une hypothèse vraisemblable, on trouverait des trous noirs dans le noyau de certaines galaxies, ils devraient se manifester par la vitesse de rotation particulièrement élevée de la matière

présente dans cette zone. Les observations récentes incitent à penser qu'il existe des trous noirs dans notre Voie lactée et dans d'autres galaxies.

Le frottement et d'autres processus chauffent les gaz du disque d'accrétion jusqu'à plusieurs millions de degrés, de sorte que ces gaz émettent un rayonnement intense et de très forte énergie, jusqu'aux fréquences des rayons X. Les astronomes supposent aujourd'hui que l'extrême intensité lumineuse des noyaux de galaxies résulte de la présence de trous noirs, de masses égales à 100 millions, voire un milliard de masses solaires. Les quasars, qui ont en leur centre un trou noir, émettent un rayonnement 1 000 à 10 000 fois plus intense qu'une galaxie ordinaire. Chaque année, l'équivalent d'une masse solaire est engloutie dans le trou noir central.

Comme la luminosité des noyaux de galaxies où se trouverait le trou noir varie en quelques heures, le diamètre du dispositif rayonnant n'est pas plus grand que la distance que parcourt la lumière dans le même temps : il devrait avoir, quelques heures-lumière environ, la taille de notre Système solaire.

Étant donné la grande distance qui sépare ces objets de la Terre (plusieurs millions à quelques milliards d'années-lumière) et leur faible étendue, même les meilleurs télescopes ne pourront en distinguer les détails.

1. PERCEPTION DE L'ENVIRONNEMENT D'UN TROU NOIR. La série de clichés se lit de gauche à droite, et de haut en bas ; elle représente ce que verrait un observateur qui se déplacerait progressivement du pôle Nord du système constitué d'un trou noir en rotation et de son disque d'accrétion, à travers l'équateur jusqu'au pôle Sud. La simulation sur ordinateur est réalisée en intégrant les équations de la géométrie de Kerr. La masse du trou noir représente 100 millions de masses solaires, le diamètre du disque d'accrétion, un milliard de kilomètres (soit le double de la longueur de la trajectoire de la planète Mars).