

pendant 20 minutes (puis le liquide s'écoule dans l'intestin grêle). Pendant ce temps, la gélule pourrait examiner la paroi de l'estomac.

Les besoins en énergie des actionneurs ont conduit certains chercheurs à développer une autre approche : l'application de champs magnétiques, créés à l'extérieur de l'organisme par des électroaimants, qui commandent sans fil le mouvement des capsules. En 2005, les sociétés *Olympus* et *Siemens* ont présenté un système de guidage magnétique de leur gélule caméra. Le dispositif engendre une rotation de la gélule ; ce mouvement en tire-bouchon produit un léger frottement qui permet à la capsule de « creuser » dans les replis du tube digestif.

Bien que l'utilisation d'électroaimants contrôlant une capsule endoscopique dans l'intestin soit simple, il est difficile de diri-

ger la gélule avec fiabilité. Les champs magnétiques perdent de la puissance avec la distance, et, avec la géométrie irrégulière de l'intestin, des modifications soudaines de l'intensité du champ magnétique peuvent faire bouger au hasard la capsule ou interrompre le contrôle magnétique. En pratique, à cause de cette instabilité, un opérateur peut perdre tout contact avec la gélule et être incapable de la retrouver. On pourrait améliorer le contrôle et la stabilité en ajoutant des électroaimants, mais au prix d'un encombrement plus important du système.

Étant donné les limites de ces deux approches, interne et externe, qui commandent les mouvements de la gélule, nous avons combiné ces méthodes et trouvé une solution indolore qui fournit des diagnostics fiables. Un contrôle magnétique externe permet de localiser

grossièrement la gélule dans l'intestin ; et des actionneurs semblables à des pattes modifient sa position et optimisent l'angle de vue de la caméra.

Des robots hybrides

Nous avons conçu une telle gélule hybride, avec quatre pattes actionnées par des moteurs, et l'avons testée chez le cochon, dont les intestins ont les mêmes dimensions que ceux de l'homme. Les pattes sont repliées lorsque la capsule est avalée et durant la plus grande partie de son voyage dans le tube digestif. Un générateur de champ magnétique externe, placé près de l'abdomen de l'animal, guide la capsule. Quand celle-ci atteint une partie de l'intestin où les parois se sont affaissées, elle soulève le tissu alentour avec les pattes pour pouvoir continuer son chemin.

DES MINIROBOTS ACTIFS DANS LE TUBE DIGESTIF

Pour fabriquer des robots miniatures fonctionnant dans le tube digestif, les ingénieurs doivent trouver les moyens de commander sans fil leur déplacement et les mouvements des outils qu'ils embarquent. Et ils doivent placer ces outils (les camé-

ras et la batterie par exemple) dans une gélule suffisamment petite pour qu'un patient puisse l'avalier. Voici quelques exemples des fonctions de ces robots minuscules et les techniques mises en œuvre.

Se déplacer

Les mouvements des robots endoscopiques peuvent être commandés soit par des actionneurs embarqués, tels des pattes, des pales, des hélices ou des appendices semblables à des cils, soit par des champs magnétiques engendrés à l'extérieur du corps du patient.



Distendre des tissus

Une façon d'écarter les tissus – pour libérer un passage ou obtenir une image – est de doter le robot de bras puissants qui peuvent exercer une poussée. Une méthode consommant moins d'énergie consiste à faire boire de l'eau au patient : le liquide distend le tube digestif et permet à une capsule propulsée par des hélices de « naviguer ».

Capsule dotée de bras



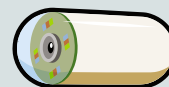
Capsule « navigant » avec des hélices



Estomac distendu

Soigner

Une capsule peut transporter différents outils : une caméra spectroscopique qui voit sous la surface d'un tissu ; une pince pour faire une biopsie du tissu ; ou un réservoir qui contient une dose de médicament.



Caméra spectroscopique



Pince pour biopsie



Réservoir de médicament

Dans la plupart des régions de l'intestin grêle et du côlon, un système de locomotion hybride suffirait aux médecins pour qu'ils puissent faire un examen visuel détaillé. Mais des situations différentes exigent des solutions différentes. Par exemple, le projet VECTOR a développé trois types de gélules destinés seulement à l'intestin grêle : une capsule caméra passive pour un examen classique ; une gélule de diagnostic, dotée d'un système de locomotion actif et d'un capteur d'imagerie spectroscopique qui détecte des anomalies de la surface du tissu ; et la troisième capsule VECTOR prévue transporterait le même capteur spectroscopique et un outil de biopsie. Ce dernier prélèverait un échantillon de tissu et le stockerait dans la capsule ; puis les médecins le récupéreraient quand la capsule sortirait de l'organisme du patient.

La capacité de faire des biopsies et d'autres gestes thérapeutiques plus complexes, telle une ablation, ferait de ces gélules robots des outils exceptionnels. Mais plusieurs difficultés restent à résoudre : la faible puissance embarquée disponible et les contraintes d'espace et de couples moteurs. Avec une unique gélule de deux centimètres cubes, il est pour l'instant impossible d'atteindre des objectifs thérapeutiques plus ambitieux, qui nécessiteraient des mouvements compliqués et de multiples actionneurs.

S'auto-assembler dans l'organisme

En conséquence, nous travaillons sur un nouveau concept : des robots chirurgicaux qui s'assemblent eux-mêmes dans l'organisme. Voyons de quoi il s'agirait. Le sujet boirait un liquide distendant l'estomac, puis avalerait jusqu'à 10 à 15 gélules. Chacune serait un composant miniaturisé, avec des électroaimants à chaque extrémité. Une fois dans l'estomac, ces capsules, guidées par le chirurgien de l'extérieur, s'assembleraient automatiquement pour former la structure souhaitée.

Un chirurgien utiliserait alors ce robot assemblé comme un outil sans fil : il pourrait opérer sans avoir besoin de faire la moindre incision externe. L'acte chirurgical terminé, les liaisons magnétiques entre les capsules seraient reconfigurées ou rompues, ce qui permettrait aux différentes parties d'être éliminées par les selles. Nous avons fabriqué un premier prototype constitué de capsules de deux centimètres cubes environ, motorisées et télécommandées. Chaque capsule pourrait porter un capteur, par exemple une caméra ou des instruments chirurgicaux spécialisés.

Les composants robotiques miniaturisés pourraient aussi avoir d'autres fonctions. Les systèmes de contrôle et les caméras mis au point pour les capsules vidéo-endoscopiques influencent déjà d'autres techniques biomédicales, tels les endoscopes classiques et les dispositifs utilisés pour les laparoscopies (l'examen de l'intérieur de l'abdomen). Au-delà des soins médicaux, on constate une tendance à la miniaturisation et à la commande sans fil de robots multifonctionnels. Les gélules robots serviront sans doute d'exemples pour d'autres machines utilisées dans de tout autres domaines.



UNE GÉLULE HYBRIDE GUIDÉE par des électroaimants externes se déplace dans le côlon d'un cochon, en utilisant ses pattes pour ajuster sa position et repousser le tissu environnant.

Arianna Mencias

Opérer à distance

On peut étendre la gamme des tâches que peuvent effectuer les gélules robots en les concevant de sorte qu'elles s'auto-assemblent dans l'organisme. Le patient avalerait une douzaine de gélules ; dans l'estomac, ces gélules s'assembleraient pour former un robot. Les chirurgiens contrôleraient ce dispositif à distance, sans fil. Lorsque l'acte chirurgical serait terminé, le robot se scinderait en capsules, qui passeraient sans difficulté dans le tube digestif.

Une configuration chirurgicale possible



Frank Hülshömer

LES AUTEURS



Paolo DARIO et Arianna MENCIASSI sont professeurs de robotique biomédicale à l'École supérieure Sant'Anna de Pise, en Italie.

✓ BIBLIOGRAPHIE

K. Harada *et al.*, *Wireless reconfigurable modules for robotic endoluminal surgery*, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japon, 2009.

P. Valdastris *et al.*, *Wireless therapeutic endoscopic capsule : in vivo experiment*, *Endoscopy* 2008, vol. 40, pp. 979-982, 2008.

A. Moglia *et al.*, *Wireless capsule endoscopy : from diagnostic devices to multipurpose robotic systems*, *Biomedical Microdevices*, vol. 9, pp. 235-243, 2006.