

Des pinces optiques pour une bactérie

Aux diverses applications des pinces et des ciseaux optiques mentionnées dans l'article de Michael Berns, s'ajoutent, par exemple, les études menées à l'Institut Curie. Grâce aux pinces optiques dont sont équipés deux microscopes, les biologistes ne se contentent plus d'observer les organites nichés au cœur des cellules, mais ils peuvent aussi les manipuler.

Nombre de cellules migrent. Mouvements bénéfiques dans le cas des cellules embryonnaires qui gagnent les territoires où elles se différencient, des globules blancs qui affluent vers les sites infectés, des cellules de la peau qui reforment le tissu après une blessure ; mouvements catastrophiques lorsqu'il s'agit de cellules cancéreuses qui colonisent les tissus sains. Pour mieux comprendre ces mouvements, nous étudions une bactérie, *Listeria monocytogenes*, dont les mouvements présentent des analogies avec les déplacements des cellules de mammifères.

Listeria a la forme d'un cylindre de un micromètre de longeur. Maçon microscopique, elle assemble, dans son prolongement, des filaments d'actine qui forment une queue parfois cent fois plus longue qu'elle ; posée au som-

met de la queue d'actine, la bactérie avance à la vitesse de construction du tube, près d'un millimètre par heure.

Comment les filaments sont-ils assemblés à l'arrière de la bactérie ? D'où vient la force motrice ? Comment la bactérie s'accroche-t-elle à l'échafaudage ? On l'ignore encore, car on ne peut suivre la construction à l'échelle des molécules d'actine. Toutefois, en étudiant les déformations de la queue d'actine, on en déduit un scénario des interactions moléculaires en jeu. Ainsi, en pinçant la queue d'actine à l'aide de pinces optiques, et en tirant sur la bactérie, nous avons évalué la force d'adhérence du micro-organisme à son échafaudage.

On peut également démultiplier une pince optique à l'aide de miroirs que l'on fait osciller rapidement entre deux ou trois positions ; on obtient alors plusieurs pinces qui saisissent la queue d'actine en différents points, et l'on en a ainsi évalué l'élasticité. Par différentes expériences de ce type, nous mesurons les pressions qu'exerce l'échafaudage sur la bactérie. Nous précisons la façon dont elle se déplace, en espérant élucider quelques mécanismes généraux de la locomotion cellulaire.

Fabien GERBAL et Albrecht OTT, Institut Curie

de la division cellulaire (la mitose). Puis, avec des pinces laser, nous avons déplacé les fragments à l'intérieur de la cellule afin d'étudier les forces exercées par le fuseau mitotique, cette machinerie cellulaire qui sépare les chromosomes dupliqués vers les deux parties opposées de la cellule en cours de division.

Les expériences ont donné des résultats surprenants : nous avons aisément déplacé les fragments qui étaient à l'extérieur du fuseau, mais nous n'avons pas réussi à introduire dans le fuseau des éléments prélevés dans le cytoplasme. Ces expériences ont confirmé que le fuseau forme une sorte de cage, empêchant que des éléments étrangers, tels des fragments de chromosomes nouvellement introduits dans le cytoplasme, ne pénètrent dans le fuseau. Comme la mitose détermine la répartition du patrimoine génétique dans les cellules filles, on comprend que l'évolution ait sélectionné un mécanisme qui interdit l'accès au fuseau mitotique d'éléments indésirables. Cet élément étant un acteur essentiel de la division cellulaire, si l'on parvient à élucider son fonctionnement, on comprendra mieux certaines maladies liées à la division cellulaire, tels le cancer et les anomalies de l'embryogenèse.

Aujourd'hui, nous disposons d'un ensemble qui comporte deux fais-

ceaux laser servant de pinces, un faisceau laser servant de ciseaux et un microscope confocal à fluorescence laser. Les lasers sont accordables, c'est-à-dire que l'on peut choisir la longueur d'onde de leur faisceau. Cette station de travail est un outil précieux pour les biologistes cellulaires ; on peut y observer des cellules ou des organites fluorescents à l'aide du microscope confocal, pendant ou après la mise en action des pinces et des ciseaux. Ce système confocal de piégeage et d'ablation se manœuvre simplement, à l'aide d'un petit levier de commande.

Des collègues ont utilisé cette station pour découper le centromère des chromosomes, le point d'ancrage des microtubules du fuseau mitotique. Les gènes de cette région sont-ils actifs ?

On l'ignore, car le centromère est très difficile à isoler et à analyser. Les pinces et les ciseaux optiques aideront sans doute les biologistes à répondre à la question.

Voilà plus de 80 ans qu'Albert Einstein a établi les fondements de la théorie des lasers. Puis, au début des années 1960, des physiciens américains et russes ont mis au point les systèmes capables d'émettre les faisceaux laser prédits théoriquement. Aujourd'hui, grâce à des outils incorporant des lasers, les biologistes sont devenus des chirurgiens de la cellule, manipulant cellules et organites. Ces méthodes ont des applications en médecine et en biologie du développement ; elles servent à étudier la structure de la cellule et son fonctionnement, et à décrypter le génome humain.

Michael BERNs, professeur à l'Université d'Irvine, est le co-fondateur, avec Arnold Beckman, de l'Institut Beckman d'étude des lasers, qu'il préside.

M.W. BERNs, W.H. WRIGHT et R. WIEGAND-STEUBING, *Laser Microbeam as a Tool in Cell Biology*, in *International Review of Cytology*, vol. 129, pp. 1-44, 1991.

A. CLEMENT-SENGEWALD et al., *Fertilization of Bovine Oocytes Induced Solely with Combined Laser Microbeam and Optical Tweezers*, in *Journal of Assisted Repro-*

duction and Genetics, vol. 13, n° 3, pp. 260-265, mars 1996.

A. KHODJAKOV, R.W. COLE et C.L. RIEDER, *A Synergy of Technologies : Combining Laser Microsurgery with Green Fluorescent Protein Tagging*, in *Cell Motility and the Cytoskeleton*, vol. 38, n° 4, pp. 311-317, 1997.

Laser Tweezers in Cell Biology, sous la direction de Michael P. Sheetz, *Methods in Cell Biology* series, vol. 55, Academic Press, 1998.

G. Albrecht-Buehler



Les conquêtes des polyminos

JEAN-PAUL DELAHAYE

Dans certains domaines mathématiques comme les polyminos, amateurs et informaticiens éclairés font avancer les connaissances.

Le domino est composé de deux carrés accolés par un côté. Les polyminos (parfois appelés polyominos) qui en réunissent 3 sont dénommés triminos ; 4, quadriminos ; 5, pentamino ; 6, hexamino ; 7, heptamino.

Depuis que Solomon Golomb les a présentés au monde scientifique, en 1953, lors d'une conférence au Club mathématique d'Harvard, et que Martin Gardner en 1957, dans un de ses premiers articles de récréation mathématique de *Scientific American*, en a fait la publicité, une «culture du polymino» s'est développée, donnant lieu à des centaines d'articles, à une multitude de jeux et de casse-tête, et un grand nombre de sites Internet leur sont consacrés. Des artistes comme Guenter Albrecht-Buehler les uti-

lisent dans leurs œuvres. Ce peintre expose ses tableaux, comme celui représenté en haut de la page, à l'adresse : <http://pubweb.acns.nwu.edu/~gbuehler/>

Dans l'introduction de son livre entièrement dédié aux résultats des recherches sur les polyminos et dont une édition augmentée a été publiée il y a peu, S. Golomb explique : «Après la conférence de 1953, je me suis trouvé irrévocablement lié à tout ce qui pouvait leur arriver. Un flot continu et soutenu de correspondants du monde entier et de toutes les strates de la société – présidents d'Université, pensionnaires d'obscurs monastères ou de célèbres pénitenciers, etc. – m'ont demandé des informations, proposé de nouveaux problèmes ou fourni des nouvelles solutions.»

Même s'il existe des traces de ces remarquables figures géométriques dans un livre, publié en 1907, d'Henry Ernest Dudeney, le célèbre créateur de jeux mathématiques anglais, même si, quelques siècles plus tôt, un maître du jeu de go remarqua qu'on pouvait créer 12 formes différentes composées de 5 carrés accolés par un côté au moins (pentamino), ce n'est que depuis la fameuse conférence qu'on les a considérés avec quelque sérieux.

Dans une version initiale du film *2001, l'Odyssée de l'espace*, de Stanley Kubrick, une scène mettait en lice un acteur qui jouait aux pentamino avec l'ordinateur (cette scène fut remplacée au dernier moment par une partie d'échecs).

Le succès des polyminos est sans doute dû à ce qu'on les étudie sans formules. La démonstration d'une de leurs propriétés consiste le plus souvent en l'évidence d'un dessin (ça existe, je le vois !). Lorsqu'on prouve qu'une certaine configuration est impossible, il s'agit d'un exercice d'astuce et de pure logique qu'on pourra suivre sans aucune préparation mathématique, et que l'on comprendra en s'aidant de pièces en bois ou en carton plutôt qu'avec un crayon et une feuille de papier. Les mathématiques sont ici essentiellement un jeu.

Certaines propriétés obtenues par énumération ne peuvent pas être démontrées par un raisonnement direct, et alors c'est un programme (l'écrire est encore un jeu) qui établit le résultat. Tel est le cas d'un théorème énonçant qu'il y a 1 010 façons de remplir (on dit aussi paver) un rectangle de 12×5 avec les 12 pentamino, qu'il existe 2 339 façons pour le rectangle 6×10 , 368 pour le rectangle 4×15 , et 2 seulement pour le rectangle 3×20 .

Le livre de George Martin (voir la bibliographie à la fin de l'article) sur les polyminos paru en 1996 est composé uniquement de tels petits problèmes, qui pourront occuper les amateurs pendant

1. DÉNOMBREMENTS

Aucune méthode générale ne permet de déterminer le nombre de polyminos composés de n carrés. Dans ces dénombrements, on considère bien sûr comme identiques deux polyminos obtenus par retournement ou rotation. Les nombres de polyminos connus aujourd'hui ont été calculés par dénombrements exhaustifs à l'aide de programmes :

n	Nombre $P(n)$ de polyminos à n carrés	n	Nombre $P(n)$ de polyminos à n carrés
1	1	13	238591
2	1	14	901971
3	2	15	3426576
4	5	16	13079255
5	12	17	50107909
6	35	18	192622052
7	108	19	742624232
8	369	20	2870671950
9	1285	21	11123060678
10	4655	22	43191857688
11	17073	23	168047007728
12	63600	24	654999700403

David Klarner a démontré qu'il existe une constante telle que $P(n) \sim n^k$ à l'infini. Cette constante de Klarner est très mal connue aujourd'hui, on sait seulement qu'elle est comprise entre 3,72 (D. Klarner, W. Satterfield) et 4,65 (D. Klarner, R. Rivest) :

$$n^{3,72} < P(n) < n^{4,65}$$