

Ils pourraient d'abord occuper des niches, spécialisées mais lucratives. Ainsi, la récupération de la chaleur dissipée par de nombreux procédés industriels (fabrication du verre, de l'aluminium ou de l'acier) est un marché important. Dans l'industrie du verre, les deux tiers de l'énergie consommée sont aujourd'hui perdus en chaleur : pour l'ensemble des verriers, une puissance de un milliard de watts est ainsi gaspillée ! Les générateurs thermophotovoltaïques, en transformant cette chaleur en électricité, permettraient de substantielles économies. Dans le domaine des transports, on peut aussi imaginer que des véhicules électriques hybrides emportent, outre leur moteur à explosion, un convertisseur thermophotovoltaïque : un prototype a été présenté, avec un générateur de dix kilowatts.

Aujourd'hui, 100 à 250 millions de francs sont investis chaque année dans la mise au point de générateurs thermophotovoltaïques. Une étude de marché récente indique qu'ils rapporteraient trois milliards de francs en 2005, surtout grâce au remplacement des groupes électrogènes de moins de deux kilowatts utilisés par les militaires, et dans les camping-cars et les voiliers. D'autres utilisations apparaîtront sans doute ensuite, mais les évolutions sont imprévisibles : lorsqu'il fonda la Société IBM, Thomas Watson n'imaginait pas que l'informatique bouleverserait le monde.

Timothy COUTTS est chercheur au Laboratoire américain des énergies renouvelables. Mark FITZGERALD dirige la Société *Science Communications*.

Timothy COUTTS et John BENNER, *The First NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 321, AIP Press, 1995.

The Second NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity, sous la direction de John Benner, Timothy Coutts et David Ginley, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 358, AIP Press, 1996.

The Third NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity, sous la direction de Timothy Coutts, Carole Allman et John Benner, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 401, AIP Press, 1997.

Les beautés du monde microbien

ESHEL BEN-JACOB • HERBERT LEVINE

Les motifs des colonies de bactéries ou d'amibes ressemblent à ceux du monde minéral.

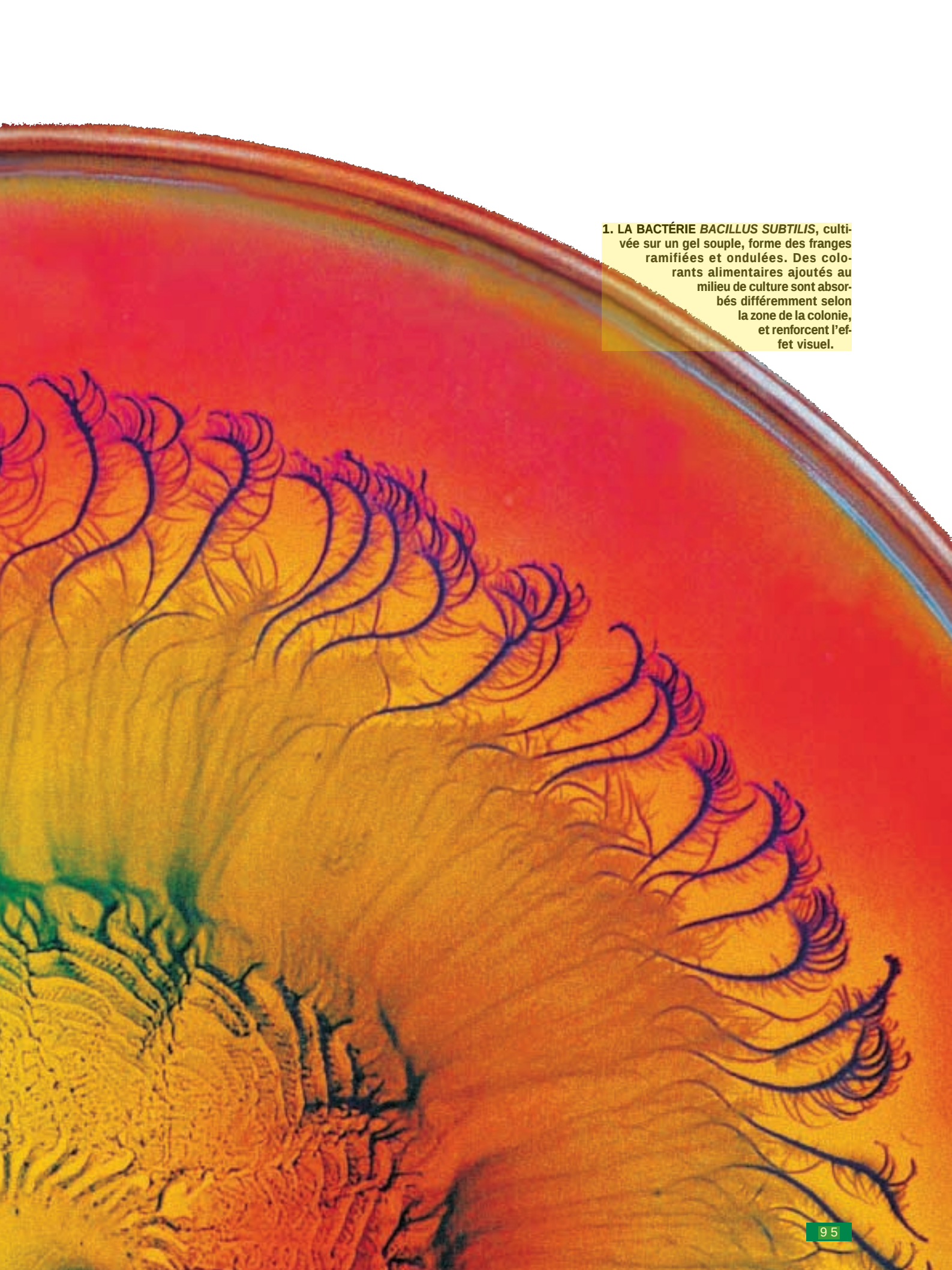
Au cours des dernières décennies, les physiciens ont élucidé les mécanismes de formation de structures telles que les cristaux de givre ou les flammes de bougie. Le givre sur une vitre froide, par exemple, se forme par l'agrégation de molécules d'eau : elles se déplacent au hasard dans l'air d'une pièce chaude ou à la surface du verre et se fixent, au gré des rencontres, sur un cristal naissant. Les parties saillantes du cristal, plus accessibles, se développent plus que les autres, et l'orientation des molécules d'eau déjà cristallisées impose la disposition des nouvelles venues : le cristal adopte spontanément une structure ramifiée.

Les physiciens qui ont observé les colonies de micro-organismes ont été surpris de retrouver des motifs comparables à ceux du givre et d'autres structures formées par le jeu des seules forces physico-chimiques. Parfois, cependant, ces colonies ont des structures plus complexes que celles des cristaux, parce que les micro-organismes ont une propriété que les molécules n'ont pas : la vie. L'exploration des formes que prennent les colonies bactériennes révèle souvent des capacités d'adaptation étonnantes à des milieux hostiles.

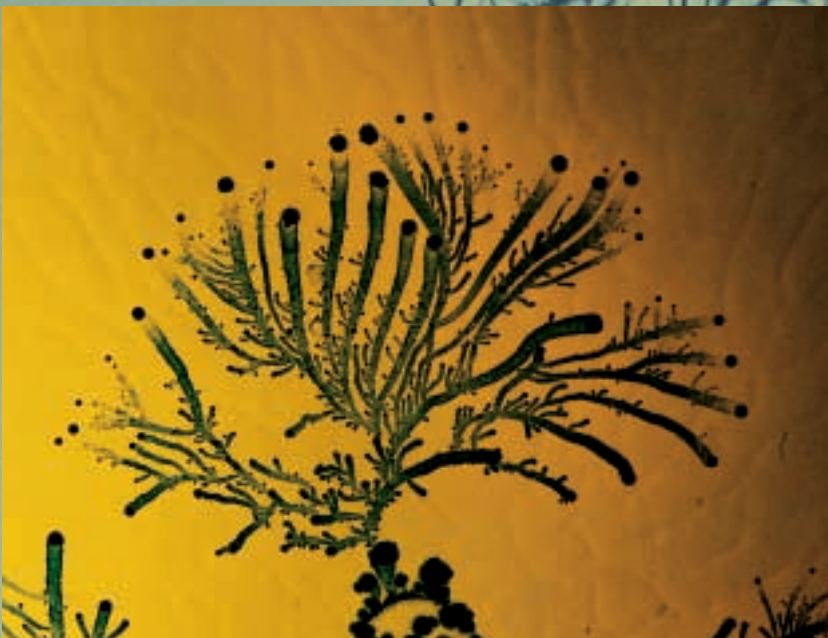
À la fin des années 1980, Mitsugu Matsushita et ses collègues de l'Université Chou, à Tokyo, ont montré que les bactéries *Bacillus subtilis* forment des colonies ramifiées quand le gel

Suite page 101

Eshel Ben-Jacob

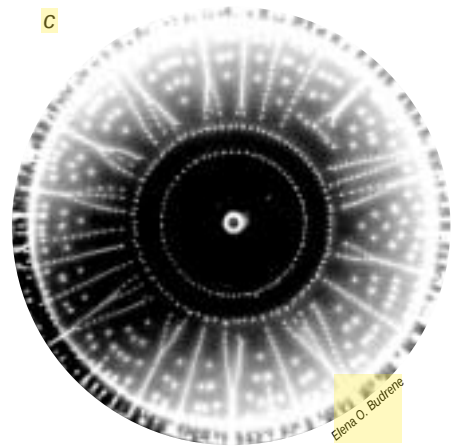
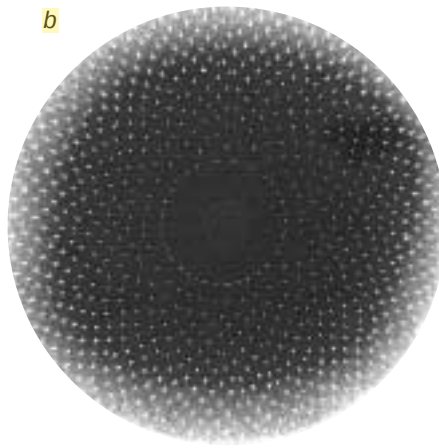
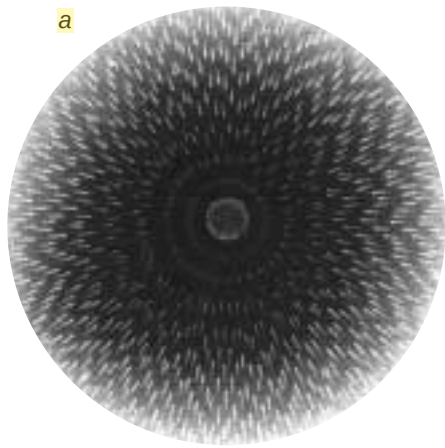
A close-up photograph of a petri dish containing a bacterial culture. The agar surface is covered with a dense, multi-layered growth of colonies. The colonies are characterized by their wavy, fringed, and branched appearance. The color of the agar is a vibrant orange-red, which is more intense in some areas and lighter in others, creating a gradient effect. The colonies themselves are a darker, more saturated red, with some areas appearing almost black. The overall texture is highly detailed, showing the intricate patterns of the bacterial growth.

1. LA BACTÉRIE *BACILLUS SUBTILIS*, cultivée sur un gel souple, forme des franges ramifiées et ondulées. Des colorants alimentaires ajoutés au milieu de culture sont absorbés différemment selon la zone de la colonie, et renforcent l'effet visuel.

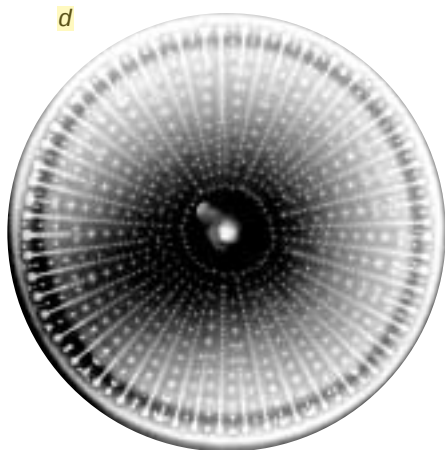


2. UNE SOUCHE DE *BACILLUS SUBTILIS* a été cultivée sur un milieu à deux densités. Sur un gel dur, la colonie est ramifiée (*en bas*) ; sur le milieu souple, un motif plus fin, plus frisé, plus enchevêtré apparaît (*en haut*). Cette structure se forme parce que les bactéries s'allongent et se déplacent rapidement, en tournant vers la droite (sans doute parce que les flagelles qui propulsent chaque

bactérie sont asymétriques). Dans un gel extrêmement dur, *Bacillus subtilis* s'aggrave et forme des petits disques compacts, qui se déplacent en tournant sur eux-mêmes. L'effet est comparable à celui d'une scie circulaire. Grâce à la coopération de ses membres, la colonie se déplace, trouve de la nourriture et se développe (*encart*). La « scie » est le disque noir au bout de chaque branche.



Elena O. Budrene



3. EN PRÉSENCE de substances nutritives ou d'agents de stress, les bactéries *Escherichia coli* (a, b) ou *Salmonella typhimurium* (c, d) sécrètent des substances chimiques attractives et s'organisent. Les colonies forment des réseaux réguliers de disques ou de raies. On retrouve ces motifs quand on reproduit par ordinateur le déplacement des bactéries (à droite) : les bactéries virtuelles se déplacent vers les zones riches en signaux chimiques.



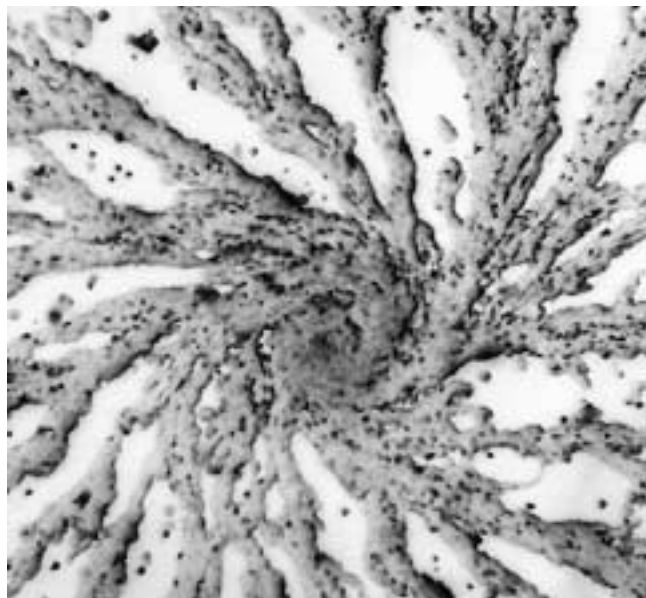
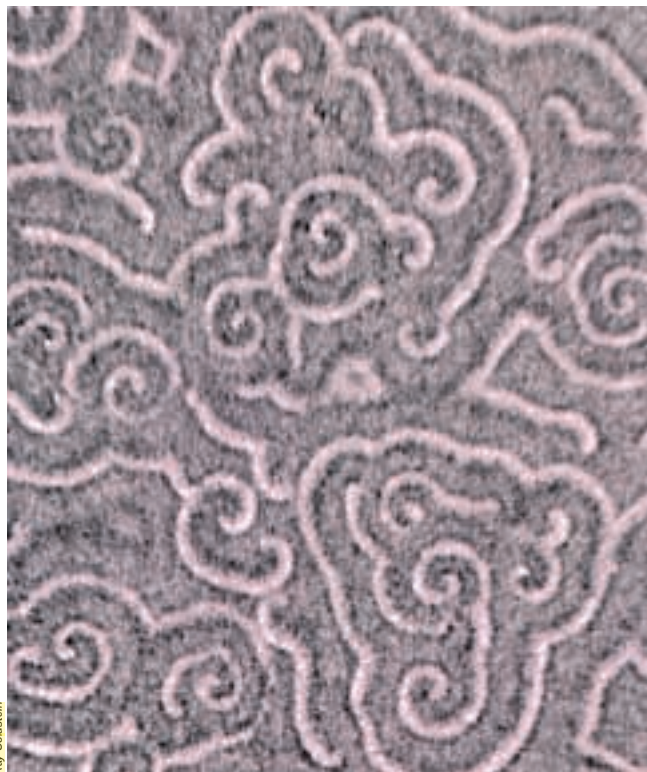
Eshel Ben-Jacob



James A. Shapiro

4. UNE COLONIE DE BACTÉRIES *Escherichia coli* cultivée sur un gel dur présente des anneaux concentriques. Alors, les bactéries ne se déplacent alors pas ; elles se propagent uniquement par division cellulaire. Les anneaux révèlent une activité métabolique périodique : ici, on a coloré en bleu les produits d'une réaction enzymatique.





6. LES CELLULES «AFFAMÉES» de *Dictyostelium discoideum* forment des motifs étoilés qui émettent finalement des spores. Les amibes sécrètent tout d'abord des signaux chimiques (AMPC) qui s'organisent en vagues spirales. Les cellules sont repoussées, elles se déforment et perdent leurs pseudopodes (équivalant à des pieds). Les vagues de substances chimiques sont observées au microscope en champ sombre.

d'agar-agar (extrait des algues) sur lequel on les cultive contient peu de substances nutritives. Elles se développent selon les mêmes principes que le givre. Une bactérie immobilisée par un gel trop dur ne reçoit que les éléments nutritifs qui diffusent dans le gel. Seules les bactéries en bordure de colonie captent alors les substances nutritives, doublent de volume, puis se divisent : l'extrémité de la colonie se ramifie. Sur un gel plus souple, les bactéries se déplacent, elles se dirigent vers les régions plus riches en nourriture, c'est-à-dire vers l'extérieur de la colonie. Dans ce cas aussi, des branches se forment, mais la croissance est bien plus rapide.

L'un de nous (E. Ben-Jacob) a étudié les influences du milieu sur la morphologie des colonies de bactéries (voir la figure 2). Cultivée sur un milieu souple, une colonie adopte spontanément un motif frisé, ondulé et à croissance rapide. Les bactéries

5. LES BACTÉRIES *PROTEUS MIRABILIS* se transforment périodiquement, peut-être grâce à une horloge interne, en de longues cellules exploratrices qui se déplacent de conserve à travers un gel dur afin de coloniser de nouvelles régions. Ces pionniers « fertilisent » une zone qui est alors envahie par les cellules ordinaires. La succession de ces deux étapes donne à la colonie un aspect en terrasses. *Proteus mirabilis* est responsable de nombreuses infections des voies urinaires en milieu hospitalier.

sont alors individuellement plus longues et plus mobiles, mais le mécanisme de la transition entre les colonies ramifiées et les colonies ondulées reste un mystère.

Si certaines bactéries s'adaptent ainsi à leur environnement, d'autres le modifient par les actions individuelles qui déterminent le comportement collectif. Par exemple, les colonies de bactéries *Escherichia coli* parviennent à s'agréger parce qu'elles émettent des molécules qui servent de signaux chimiques. En cas de stress, les colonies de bactéries ne survivent que par les mutants mieux adaptés.

Les amibes ont des comportements collectifs encore plus remarquables. Ces organismes unicellulaires sont plus évolués et plus résistants que les bactéries. Ils ont un noyau et des structures intracellulaires spécifiques qui leur permettent de réagir au stress par des mécanismes sociaux.

Dictyostelium discoideum est l'amibe favorite des biologistes qui étudient les regroupements cellulaires et la formation d'organismes pluricellulaires. Après environ quatre heures sans nourriture, elle sécrète une molécule qui sert de signal : l'AMPc (l'adénosine monophosphate cyclique). Lorsqu'une amibe détecte la présence de cette molécule par ses récepteurs spécifiques, elle en sécrète

à son tour une quantité supérieure. L'information, amplifiée au fur et à mesure, se propage rapidement : des vagues spirales d'AMPc envahissent le milieu de culture. En réaction, les amibes se déplacent vers le centre de la spirale la plus proche, rencontrent d'autres cellules et forment un motif étoilé (voir la figure 6). Avec David Kessler, de l'Université Bar-Ilan, en Israël, l'un de nous (H. Levine) a montré que ces motifs sont indépendants de la nature biologique des amibes ; elles ne sont que le résultat de lois physiques. Finalement, les amibes se regroupent en masses qui émettent des spores ; ceux-ci resteront dormants tant que le milieu sera hostile.

Les biologistes utilisent aujourd'hui des techniques biochimiques et génétiques pour comprendre l'influence de signaux extérieurs sur le déplacement des cellules. L'élucidation des lois microscopiques du comportement collectif des micro-organismes est un travail redoutable, mais l'étrangeté des motifs microbiens stimulera les chercheurs encore longtemps.

Eshel BEN-JACOB est professeur à l'Université de Tel-Aviv. Herbert LEVINE est professeur de physique à l'Université de San Diego.

Un	so	li	taire	en	plein	dé	sert
En	plein	so	leil	s'en	tend	par	ler
Tan	dis	qu'	il	na	vigue	plein	sud
Plein	de	mots	sort	tent	de	sa	tête
Il	fait	le	plein	de	sou	ve	nirs
Ra	vi	vés	par	son	coeur	si	plein
Comme	un	tir	en	plein	dans	le	mille
Le	temps	plein	qu'il	vé	cut	le	perce

Écritures sous contraintes

JEAN-PAUL DELAHAYE

La combinatoire, l'arithmétique et l'algèbre rencontrent la langue française.

Un bon article mathématique est bien écrit : l'objectif recherché est clairement annoncé et placé dans le contexte des travaux déjà publiés qui sont brièvement rappelés ; les énoncés sont formulés avec précision et concision ; les démonstrations sont agencées minutieusement pour qu'on y perçoive instantanément les points délicats et les idées nouvelles ; les perspectives à venir sont évoquées pour conclure. Un bon mathématicien a du style, ses théorèmes sont élégants et ce qu'il dévoile du monde abstrait est joliment décrit. Les informaticiens aussi sont des écrivains : un programme ne peut être bon que s'il est parfaitement écrit et aucune méthodologie de programmation, comme le monde industriel en recherche depuis trente ans, ne dispense du talent littéraire nécessaire en informatique.

Un autre lien entre littérature et mathématiques inverse le précédent : au lieu de demander au mathématicien d'être écrivain, il suggère à l'écrivain d'utiliser les mathématiques pour les cacher dans ses textes et en nourrir son art. En imposant une architecture, combinatoire, arithmétique, algébrique, logique ou même géométrique, l'écrivain enrichit ses textes et y insère une part de la beauté des structures mathématiques. La contrainte peut rester cachée et habiter le texte à l'insu du lecteur, lui procurant une impression étrange qui n'est dévoilée que lorsque le secret est identifié. La contrainte peut être manifeste et alors son irruption dans la conscience du lecteur lui fait ressentir avec force que le sens se construit sur un support où le jeu ouvre des possibilités illimitées à l'auteur et procure des plaisirs subtils au lecteur.

L'exercice n'est pas nouveau. L'alexandrin, avec sa contrainte métrique de 12 pieds, et plus généralement le poème rimé, sont des exemples de contraintes formelles si anciennes qu'on ne réalise pas que les carcans arithmétiques qu'ils imposent sont arbitraires et susceptibles de variations nombreuses.

1. PLAINTÉ D'UNE FEMME DÉCUE

L'hommage de leurs vers qu'à
l'envi les poètes
À la femme décue offrent toujours
ardent
Flatte certes le but, mais n'apaise la
quête :
L'attente a des plaisirs qu'on ne fait
qu'un moment.

Aussi, jouet des vents qui l'hiver me
rudoient,
Sur des talus où vont se fanant mes
appas,
En un dense réduit où je n'ai point
de joie,
Veux-je conter ce don que Thyrsis
bafoua.

Las ! le pâle Thyrsis avait la mine
austère :
Le sentant sur le banc près d'elle un
peu tarder
L'amante bien des fois lui fit en vain
la guerre
Ferme et froid cependant jamais il
ne doutait.

Pour voir se dénouer ce vœu, que
de tendresse !
Que, docile à sa voix et promise à
son lit,
J'eusse aimé dans ses bras
m'adonner à l'ivresse !
Mais le vin que j'offrais jamais ne le
conquit.

Ses doigts pouvaient jouer aux fous
entre mes tresses,
Du vent hardi parfois copiant les
effets :
Il fallait à mon but, d'autres riens,
des caresses
Moins lourdes dont mon goût se fût
mieux satisfait....

Depuis 1960, le mouvement littéraire l'OULIPO (Ouvroir de littérature potentielle) s'est donné pour objet l'invention, l'étude et la pratique des jeux mathématiques avec le langage. Si la systématisation de l'OULIPO est nouvelle, on trouve des traces de cette activité loin en arrière dans le temps : de nombreux auteurs ont pratiqué ces exercices, et les grands rhétoriciens du Moyen Âge y étaient passés maîtres.

ANTISTROPHES...

Tout le monde connaît la contrepèterie, où quelques permutations de syllabes ou de lettres dans une phrase anodine en font apparaître une autre qu'il aurait été malséant d'écrire ou de prononcer. Même si l'on peut trouver des exemples de contrepèteries dans certains textes latins, il semble qu'elles sont fortuites, et l'on doit attribuer l'invention de cet art à Rabelais (il appelait cela des antistrophes). Dans son œuvre, on trouvera par exemple : «Goûtez-moi cette farce», «Cette femme est une lieuse de chardons». On peut se demander si le poète plus récent qui aimait le «son du cor au fond des bois» ne nous a pas adressé un clin d'œil.

Le chef-d'œuvre du genre a paru il y a quelques années dans *Le canard enchaîné* (qui, chaque semaine, propose quelques créations nouvelles dans *L'album de la comtesse*, écrit par le scientifique maître du genre, Joël Martin, le titre de la rubrique étant lui-même une contrepèterie bien cachée). Le chef-d'œuvre anonyme dont nous donnons un extrait ci-contre est cité dans le merveilleux livre de Claude Gagnière *Pour tout l'or des mots* (Collection Bouquins, Robert Laffont, Paris, 1996, page 26). À la contrainte déjà difficile d'inclure une contrepèterie dans chaque ligne, notre expert a ajouté celle de l'alexandrin, contrainte accompagnée, bien sûr, de celle des rimes. On remarquera la cohérence du thème du récit apparent et celle, non moins étonnante, du récit caché.