

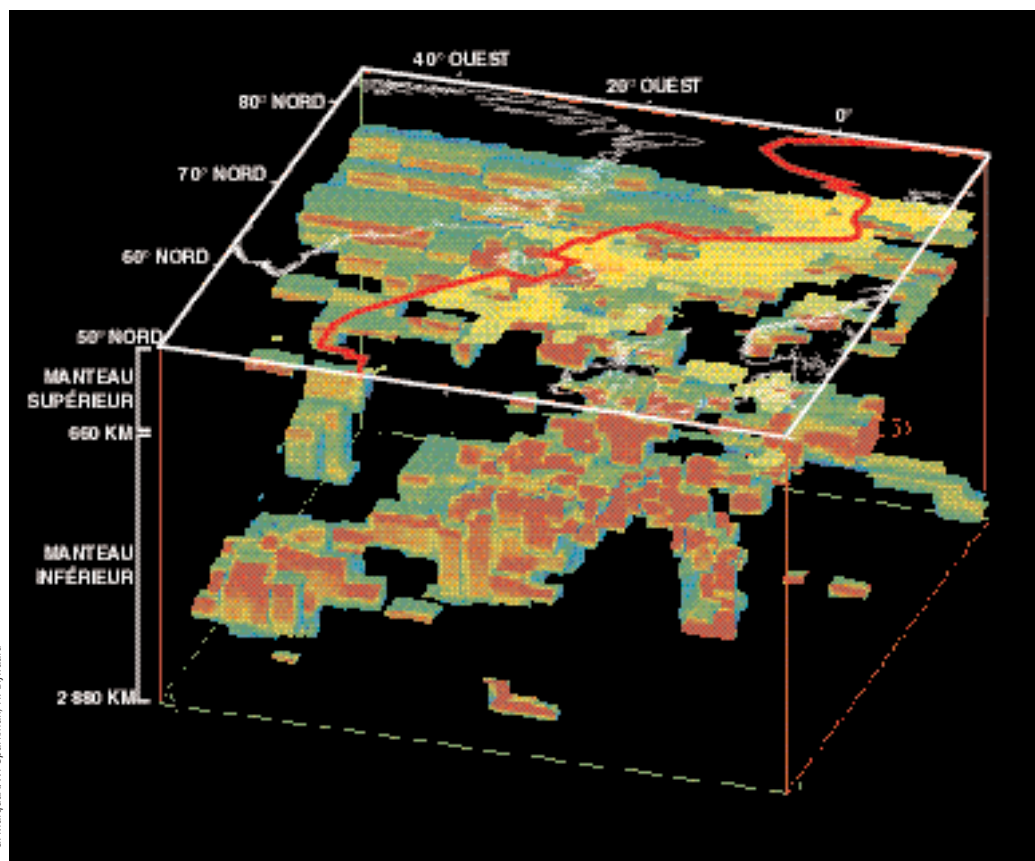
sont restées en retrait de ces mouvements d'ensemble.

L'altimétrie satellitaire nous a permis de découvrir que, lorsque l'Atlantique Nord s'est ouvert, un phénomène d'expansion a eu lieu aussi sur le plateau continental de Lofoten-Vesterålen, au large de la côte Nord de la Norvège. Nous avons été surpris de constater que les mouvements de plaques ont eu alors des conséquences pour la croûte terrestre, mais aussi pour le manteau supérieur.

Dans cette région, les données topographiques indiquaient que le plancher océanique y est quasiment plat, alors que les images fournies par les satellites montraient, au contraire, des sommets et des vallées parallèles à la côte (voir la figure 4). Nous en avons conclu que les variations gravimétriques révélées par les images altimétriques ne s'expliquent pas par la forme du relief sous-marin, mais par des variations des densités des roches sous-jacentes.

Heureusement, les ingénieurs de l'industrie pétrolière avaient déjà minutieusement établi la structure géologique de la région. Trois grands bassins étroits, profonds et parallèles à la côte sont comblés, par endroits, d'une épaisseur de huit kilomètres de sédiments, de sorte que le fond de l'océan paraît quasiment plat. Ces sédiments sont plus légers que la roche de la croûte océanique (entre 5 et 20 pour cent). Les trois bassins se sont formés dans le cadre de l'expansion qui a précédé l'ouverture de l'Atlantique Nord, au début du Crétacé, il y a environ 140 millions d'années. À l'époque, la croûte s'est brisée en plusieurs blocs qui se sont affaissés. Les vallées ainsi formées se sont remplies de sédiments. Rolf Mjelde et ses collègues de l'Université de Bergen ont reconstitué deux profils sismiques du plateau de Lofoten-Vesterålen qui se chevauchent et les ont intégrés dans un modèle géologique. Poursuivant leur travail, nous avons calculé les variations gravimétriques locales en fonction des densités rocheuses. Nos résultats concordent parfaitement avec les données satellitaires.

Nos calculs et les comparaisons que nous avons faites montrent toutefois que les différences de densité dans le fond océanique ne suffisent pas à reproduire le signal gravimétrique mesuré. Pour y parvenir, il faut aussi tenir compte du sous-sol pro-



5. LA «RADIOGRAPHIE» SISMIQUE du manteau de la Terre en dessous de l'Atlantique Nord révèle des régions où les ondes sismiques se propagent à vitesse légèrement réduite. En mesurant ces vitesses, on détecte les zones où des roches particulièrement chaudes remontent des profondeurs du manteau. Un tel courant ascendant, nommé panache, a vraisemblablement joué un rôle déterminant lors de l'ouverture de la dorsale médio-atlantique (la ligne rouge). Sous cette ligne, assez près de la surface, se trouvent des zones particulièrement chaudes (en jaune). Un flux tubulaire remonte de la limite qui sépare le noyau et le manteau (au Sud-Ouest sur l'illustration) et se ramifie dans la partie supérieure du manteau, sous l'Islande. Une deuxième zone chaude, beaucoup plus large et plus plate, s'étend de l'Ouest, sous le Groenland, jusqu'à la dorsale médio-atlantique et l'alimente probablement en magma. Le fait que les laves soient de compositions chimiques différentes au Sud et au Nord de l'Islande indique qu'il existe deux sources séparées de laves, qui correspondent peut-être aux deux structures chaudes identifiées sur l'image sismique.

fond, c'est-à-dire des ondulations de l'interface entre le manteau et la croûte terrestre. Le fait que la croûte terrestre soit si déformée à proximité du plateau continental montre la complexité des contraintes qui se sont exercées au moment de l'ouverture de la dorsale médio-atlantique, voire même avant.

Nous espérons avoir donné un aperçu de la complexité tectonique de l'Atlantique Nord. Même s'ils comprennent mieux les relations qu'entre-tiennent les principales structures qui constituent le fond de l'océan Atlantique Nord, les géologues n'ont pas encore élucidé tous les mécanismes géodynamiques qui lui ont donné naissance.

Alexander BRAUN, géophysicien, travaille au Centre de recherche en géologie de Potsdam sur les données satellitaires. Gabriele MARQUART, spécialiste de géodynamique, dirige une équipe de recherche sur les interactions entre le manteau et la lithosphère, à l'Université de Francfort.

Ross TAYLOR et Scott MCLENNAN, *L'évolution de la croûte continentale*, in *Pour La*

Science, n° 221, mars 1996.

W. H. F. SMITH et D. T. SANDWELL, *Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Sounding*, in *Science*, vol. 277, p. 1956, 1997

Roland TROMPETTE, *Le Gondwana*, in *Pour la Science*, n° 252, octobre 1998.

Maurice MATTAUER, *Sismique et Tectonique*, in *Pour La Science*, n° 265, novembre 1999.

Les biofilms

BILL COSTERTON • PHILIP STEWART

Des bactéries organisées en films – les biofilms – résistent souvent aux antibiotiques et aux défenses immunitaires : elles causent des infections tenaces. L'étude de la structure et de l'organisation de ces communautés microbiennes aidera les microbiologistes à lutter plus efficacement contre elles.

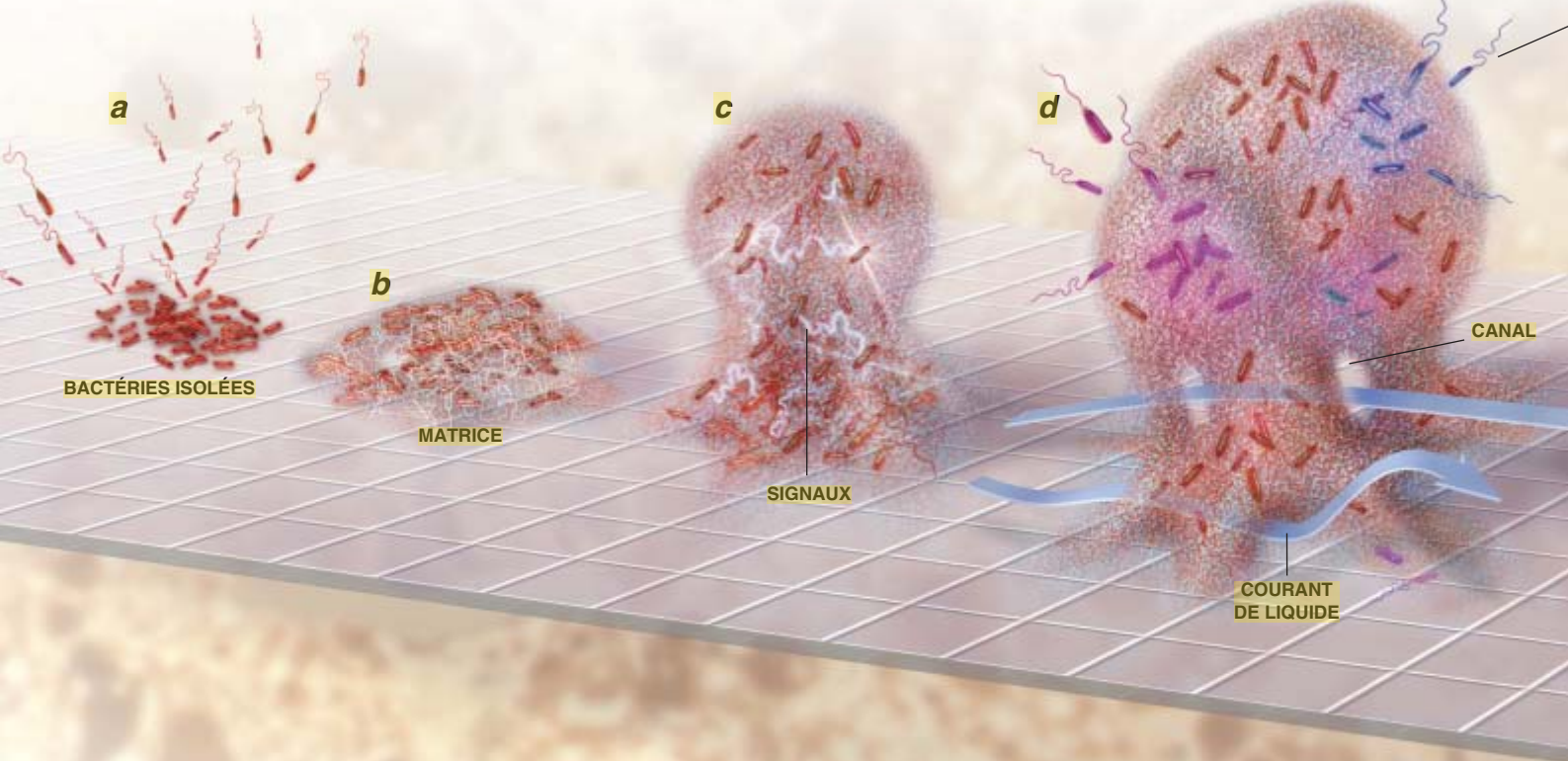
Les biofilms, des films complexes et résistants constitués de micro-organismes, sont omniprésents : dans la plaque dentaire, dans la couche glissante qui recouvre les rochers des rivières, dans l'eau des vases qui contiennent des fleurs... De plus, ils détériorent certaines installations industrielles et en contaminent les productions. Enfin, ils causent de nombreuses maladies, telles les pneumonies chez les personnes atteintes de

mucoviscidose et les infections dues aux implants artificiels. Par exemple, en 1996, une étude a montré qu'au bout d'une semaine, 10 à 50 pour cent des malades porteurs d'une sonde urinaire souffrent d'une infection due aux biofilms qui se sont développés à sa surface : au bout d'un mois, presque tous les malades sont touchés.

Pire encore, ces biofilms infectent parfois des substances thérapeutiques. En 1993 et en 1994, 100 personnes asth-

matiques sont décédées, car les aérosols qu'ils utilisaient contenaient des bactéries *Pseudomonas aeruginosa* organisées en biofilms. En 1989, les bactéries *Pseudomonas cepacia* avaient même colonisé des bouteilles d'un antiseptique puissant !

La lutte contre ce fléau est difficile, car les bactéries organisées de cette façon résistent aux antibiotiques et aux antiseptiques classiques.



1. FORMATION DES BIOFILMS : des bactéries se déplacent isolément puis se déposent sur une surface (a), s'organisent en groupes et s'y fixent. Les cellules assemblées sécrètent alors une matrice visqueuse (b), où circulent des molécules qui transmettent la consigne de se multiplier et de former une microcolonie (c). Des différences de concentrations et des courants de liquides entraînent la coexistence de plusieurs espèces bactériennes et de divers états métaboliques (d). Enfin, certaines cellules s'échappent et reprennent une vie isolée peut-être pour former de nouveaux biofilms (e). Chacune de ces étapes est une cible possible pour lutter contre la formation des biofilms.

Une des clefs de cette redoutable caractéristique tient aux systèmes de communication utilisés par les micro-organismes des biofilms. Les bactériologues mettent peu à peu au jour les mécanismes moléculaires de ces biofilms, et comprennent comment, de l'organisation elle-même, naît la résistance des micro-organismes. Ces mécanismes élucidés, ils pourront concevoir des substances, à usage thérapeutique ou industriel, qui interféreront avec les signaux de transmission et limiteront les dégâts dus à ces biofilms.

Des bactéries organisées

Pourquoi les biofilms ont-ils si longtemps gardé leurs secrets ? En partie, parce que les méthodes d'observations n'étaient pas assez puissantes. Depuis la fin du XIX^e siècle et les travaux de Robert Koch qui confirmaient l'origine microbienne de diverses maladies, les bactéries sont considérées comme des cellules uniques qui flottent ou nagent dans un liquide. Les

biologistes ont d'abord observé des cellules de culture mises en suspension dans une goutte de liquide à l'aide de microscopes optiques. Toutefois, ces conditions expérimentales ne reflètent pas l'environnement réel, et le comportement des bactéries cultivées en laboratoire n'a rien de commun avec celui des bactéries dans la nature.

Le microscope électronique n'a pas été d'un grand secours, car ceux qui l'ont utilisé n'ont pas obtenu d'images précises des couches profondes des amas de bactéries : ils en avaient conclu que les cellules situées à l'intérieur étaient mortes et disposées n'importe comment.

Ce point de vue a changé dans les années 1990, lorsque les bactériologues ont utilisé la microscopie confocale à balayage laser : on fait un balayage de l'échantillon au moyen d'un faisceau laser dont on peut ajuster la profondeur. On obtient ainsi une série de « coupes » optiques transversales dont la profon-

deur varie et l'on reconstruit ensuite une image en trois dimensions. Depuis, on a découvert que ces micro-organismes adhèrent aux surfaces humides sous forme de colonies organisées aux caractères variés.

Notons que les bactéries ne sont pas les seules à créer des biofilms (voir la figure 4) : les champignons, les algues, les protozoaires s'organisent aussi en biofilms. Cette diversité relève sans doute d'une stratégie ancienne de croissance.

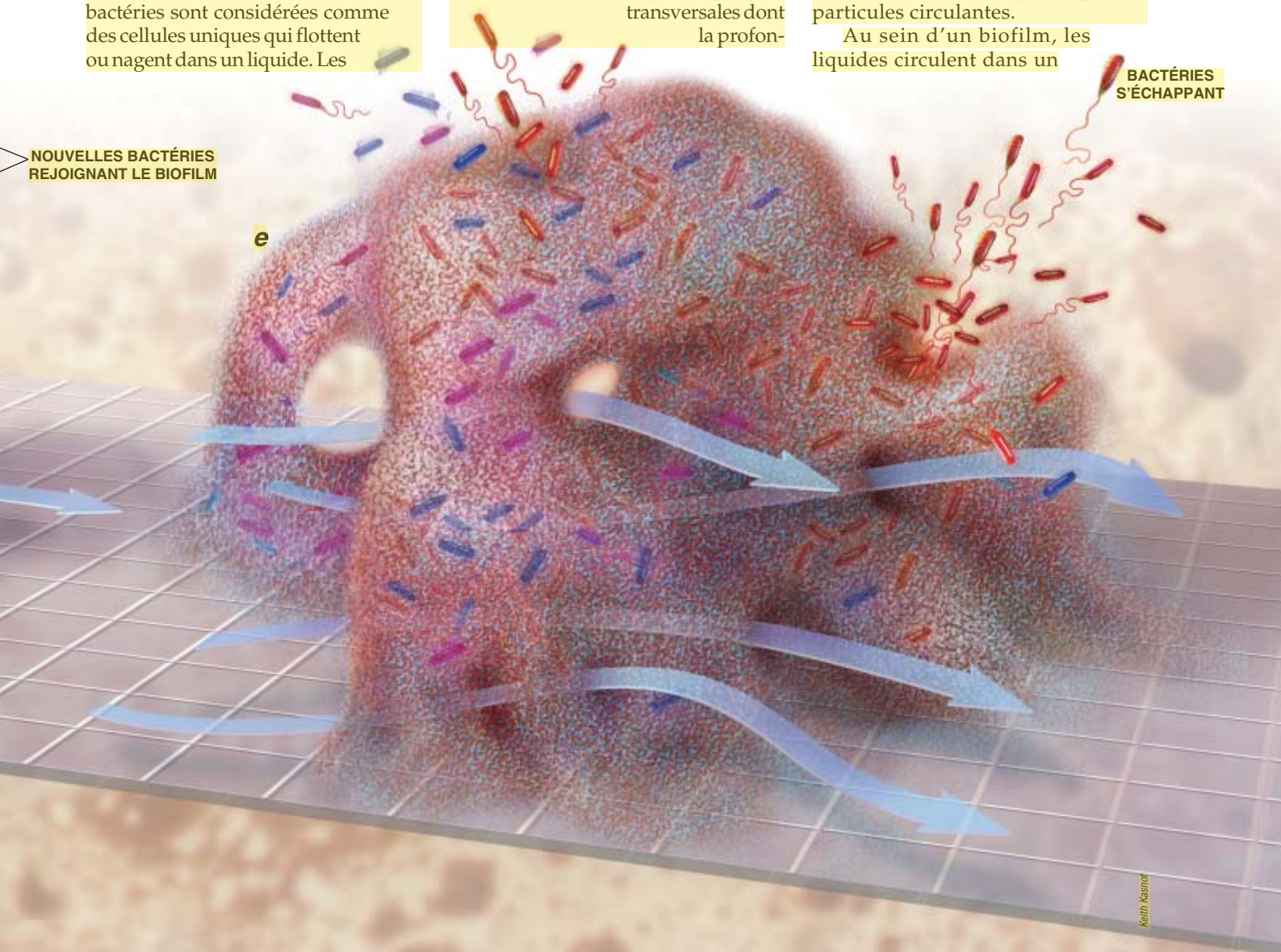
L'étude des biofilms a montré que les bactéries poussent dans de minuscules enclaves, des microcolonies, qui, en grand nombre, constituent les biofilms. Les bactéries elles-mêmes représentent moins d'un tiers de l'ensemble : le reste est une substance visqueuse, nommée matrice, sécrétée par les cellules, qui assure la cohésion de chaque microcolonie, la protège, absorbe l'eau et piège les petites particules circulantes.

Au sein d'un biofilm, les liquides circulent dans un

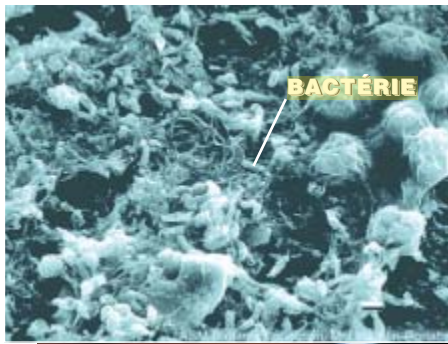
BACTÉRIES
S'ÉCHAPPANT

NOUVELLES BACTÉRIES
REJOIGNANT LE BIOFILM

e



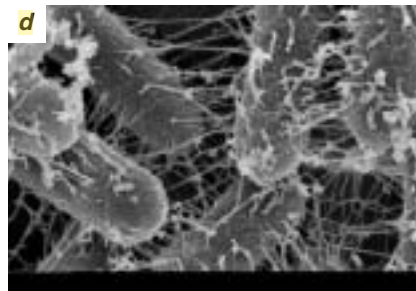
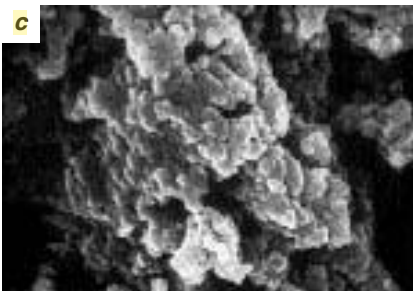
Keith Kasir



En haut : Microbe Library; à droite : Louise McLaughlin-Borlase



2. LES LENTILLES DE CONTACT sont des surfaces aisément colonisées par des biofilms, c'est-à-dire par des micro-organismes (la photo en médaillon) entourés d'une matrice organique.



Microbe Library

3. DES BACTÉRIES *PSEUDOMONAS AERUGINOSA* cultivées dans un tube en Téflon sont observées au microscope électronique après un jour (a), trois jours (b) et six jours (c). Le biofilm qu'elles fabriquent ressemble à ceux que ces bactéries forment dans les voies respiratoires lors d'infections chroniques (d).

réseau de minuscules conduits et baignent chaque microcolonie de bactéries. Ils fournissent ainsi des nutriments dissous et éliminent leurs déchets, comme le liquide intérieur d'un organisme pluricellulaire.

En raison de cette organisation, les cellules de la périphérie d'une microcolonie sont mieux desservies par le réseau de canaux que celles du centre : la densité des cellules et la présence de la matrice organique s'opposent à l'écoulement de l'eau autour des cellules du centre qui reçoivent seulement les nutriments qui diffusent jusqu'à elles. Bien que les petites molécules circulent facilement dans la matrice – essentiellement constituée d'eau –, une substance ne diffuse jusqu'au centre d'une microcolonie que si, sur son parcours, elle interagit peu avec les cellules et avec la matrice.

Ainsi, dans un biofilm, l'environnement des cellules varie notablement. En 1985, grâce à des micro-électrodes, on a constaté que la concentration en oxygène diffère entre deux positions situées à une distance de cinq centièmes de millimètre, soit à peine plus que le diamètre d'un cheveu ! La quantité d'oxygène d'une communauté bactérienne reflète la vitalité du métabolisme et, par conséquent, l'état physiologique des cellules. Par exemple, dans un biofilm constitué de *Pseudomonas aeruginosa* (la bactérie responsable des pneumonies associées à la mucoviscidose), les bactéries sont actives et se multiplient seulement là où l'oxygène pénètre, c'est-à-dire sur deux ou trois centièmes de millimètre, en périphérie de chaque minuscule colonie. Plus en profondeur, les cellules sont en dormance : elles sont vivantes, mais en repos (voir la figure 5). Contrairement à l'uniformité qui règne dans les cultures de laboratoire, la diversité des états métaboliques prévaut dans les conditions naturelles.

À l'intérieur d'un même biofilm, une cellule peut se comporter différemment d'une cellule voisine génétiquement identique. Par ailleurs, les conditions locales influent sur le pouvoir pathogène des micro-organismes d'un biofilm : certains font peu de dégâts chez un hôte, d'autres sont mortels. La variété des conditions rend également possible la cohabitation d'espèces différentes : certaines, par exemple, se nourrissent des déchets des autres.

La digestion des ruminants, telles les vaches, est un exemple d'une telle coopération. Le fourrage que les ruminants