

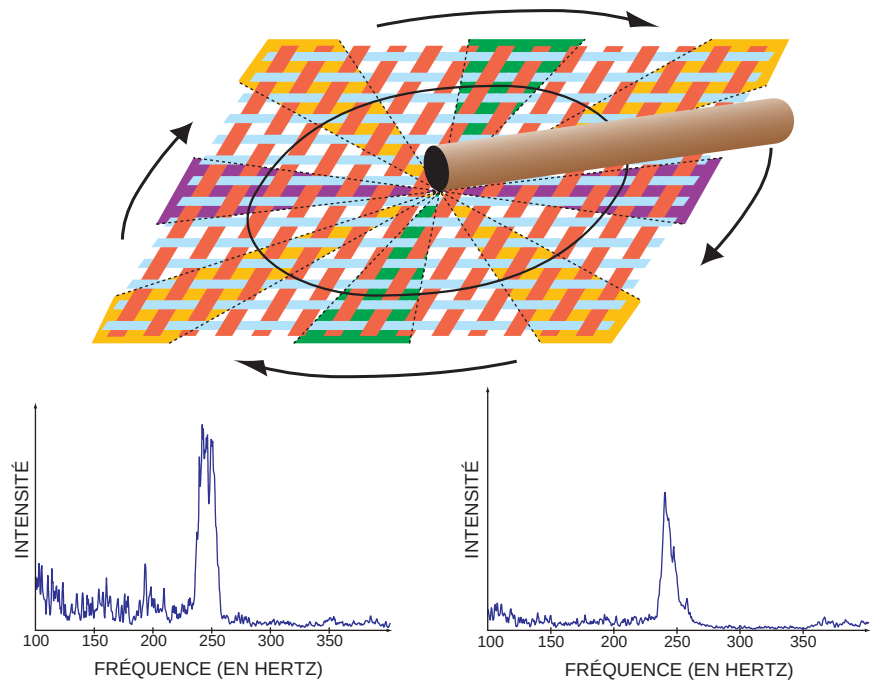
diamètre devient la hauteur des aspérités et détermine l'amplitude des vibrations). Il est inutile d'en obtenir plus ! Cette pilosité existe dans les étoffes de microfibres dont on a « usé » la surface avec un papier d'émeri.

Par ailleurs, à une fréquence de 300 hertz, la main perçoit des aspérités de moins d'un micromètre de hauteur. Une étoffe comptant 300 fibres superficielles par centimètre dont le diamètre est inférieur à un micromètre, nommées nanofibres, est donc également totalement douce au toucher. Notons que ces nanofibres n'existent pas encore à l'état de fil : on ne peut donc pas les tisser. Par exemple, les fibres de cellulose régénérées (la cellulose, qui est un polymère végétal, est dissoute, puis transformée en filament), commercialisées sous le nom Lyocell® par la Société autrichienne Lenzing, d'un diamètre courant d'environ dix micromètres, sont filées, puis tissées. Pendant l'ennoblissement, ces fibres sont fibrillées, c'est-à-dire qu'un traitement mécanique modifie certaines fibres de surface, qui deviennent des microfibres, dont certaines sont ensuite hydrolysées grâce à des enzymes (voir la figure 4). L'étoffe finale n'a que quelques centaines de fibrilles d'un diamètre proche du micromètre par centimètre ; pourtant, son toucher est très modifié. Nous sommes proches de la douceur idéale. Nous avons ensuite cherché à définir et à mesurer la douceur.

La douceur objective

Comme M. Taylor et S. Lederman, la plupart des physiologistes pensent que la main perçoit la rugosité sous la forme d'une énergie de vibration de la peau. Toutefois, la mesure de l'énergie de vibration à l'aide d'un capteur de frottement ou de rugosité n'est pas très sensible, car, à l'inverse du couple main-cerveau, le capteur n'est pas adapté à une grande gamme de surfaces et il n'est pas capable d'apprentissage.

Nous avons mis au point un tribomètre qui caractérise les étoffes : cet appareil de mesure du frottement est équipé d'un palpeur dont les signaux perçus sont traités par une analyse de Fourier qui décompose un signal périodique en une série de fonctions simples. Puisque la main évalue une



6. UN TRIBOMÈTRE MUNI D'UN PALPEUR CYLINDRIQUE mesure le frottement d'une étoffe et en caractérise l'armure. Pour une toile, dans les zones vertes, il rend compte des fils de chaîne (en rouge) et dans les zones violettes, des fils de trame (en bleu). Les mesures des diagonales sont également typiques de l'armure (zones orange). Avec un tel appareil, on mesure l'évolution de la douceur au toucher. Par exemple, dans le cas d'un satin de Lyocell® (seul le pic des diagonales est révélé), après fibrillation et défibrillation (à droite), le pic à 250 hertz est atténué (à gauche) : ce procédé augmente donc la douceur au toucher.

étoffe dans n'importe quelle direction de sa surface, l'échantillon en contact avec le palpeur tourne pendant la mesure. Comme un palpeur ponctuel ne détecte pas l'armure, nous avons donc utilisé un palpeur cylindrique d'axe horizontal, dont le diamètre est de l'ordre de celui des fils : ainsi, le contact est linéaire, et chaque direction fondamentale de l'étoffe (par exemple, pour une toile, parallèle aux fils de chaîne, parallèle aux fils de trame et en diagonale) est caractérisée par un pic dont la fréquence dépend de l'armure et de la densité des fils, tandis que son amplitude rend compte de la hauteur des aspérités (voir la figure 6).

Par exemple, l'analyse d'un tissu de fibres de Lyocell®, montre qu'après l'ennoblissement (fibrillation et défibrillation) le pic de fréquence est atténué : le tissu est donc plus doux. Ces résultats permettent d'aller au-delà des mesures classiques de frottement et de rugosité.

L'évolution des exigences du public en matière de sensation oblige les industriels du textile à innover constamment pour satisfaire et surprendre les

consommateurs qui recherchent l'étoffe parfaitement douce. L'innovation ne peut plus se satisfaire de connaissances empiriques : comprendre les mécanismes qui commandent la douceur est donc indispensable. Les microfibres et, peut-être à l'avenir, les nanofibres, qui permettent d'atteindre cet idéal, ont bouleversé notre paysage textile. Cependant, les nouvelles améliorations, notamment génétiques, des fibres naturelles, tel le coton ou les fibres animales, qui sont de plus en plus fines et se rapprochent des microfibres, augurent d'une forte concurrence entre les producteurs de matières textiles : naturel contre synthétique. Pour le consommateur, la douceur était l'apanage des fibres naturelles, mais, aujourd'hui, elle concerne également les fibres synthétiques.

Marie-Ange BIGUÉ-BUENO est maître de conférences à l'École nationale supérieure des industries textiles de Mulhouse, de l'Université de Haute-Alsace. Marc RENNÉ est directeur de l'École nationale supérieure des industries textiles de Mulhouse.

La confection de tissus vivants

ROBERT LANGER • JOSEPH VACANTI

La fabrication d'organes à partir de cellules et de polymères de synthèse est envisageable. Des recherches sont déjà en cours pour que ces organes soient transplantables chez l'homme.

De nombreuses équipes cherchent aujourd'hui à créer des tissus vivants. Les progrès ont été très rapides : il y a seulement quelques années, on croyait encore qu'il n'était possible de remplacer les tissus humains qu'en greffant des organes prélevés à des donneurs humains ou en implantant des éléments entièrement artificiels, composés de plastique, de métal et de puces informatiques. La fabrication d'organes artificiels par association de cellules vivantes et de polymères naturels ou artificiels semblait impossible. Pour pallier la pénurie d'organes humains destinés aux transplantations, on envisageait seulement l'utilisation d'organes animaux.

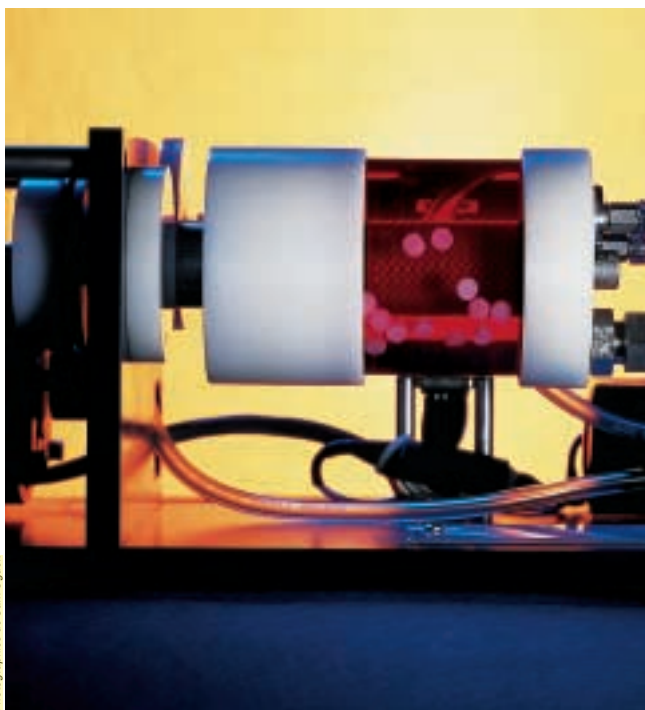
Aujourd'hui, des expériences variées ont démontré que l'on peut fabriquer des tissus artificiels, mais la recherche devra résoudre bien des problèmes avant que des chirurgiens ne greffent des organes artificiels fonctionnels à des patients.

Des cellules en stock

Le premier obstacle est celui de l'approvisionnement en cellules vivantes. On pourrait utiliser des cellules animales, mais on doute encore de leur parfaite innocuité et de leur acceptabilité par le système immunitaire du receveur. De ce fait, les biologistes préfèrent utiliser des cellules humaines.

On a récemment isolé les cellules souches embryonnaires humaines qui engendrent la quasi-totalité des tissus. Toutefois, on maîtrise mal la différenciation de ces cellules souches en culture, de sorte qu'on ne sait pas encore les utiliser pour créer ou pour réparer des organes spécifiques.

Il serait plus simple d'utiliser des cellules précurseurs des tissus : elles sont un peu différenciées, mais restent suffisamment généralistes pour engendrer quelques types cellulaires. Arnold Caplan et ses collègues de la clinique Cleveland, par exemple, ont isolé des cellules précurseurs de la moelle osseuse humaine. *In vitro*, on sait provoquer leur différenciation soit en ostéoblastes (des cellules de l'os),



Photographies de Sam Ogden



1. DES BIORÉACTEURS (à gauche) produisent déjà en série des tissus humains artificiels, composés de cellules cultivées sur des supports de polymère. Ce bioréacteur assure la croissance de morceaux de cartilage humain (à droite), utilisés pour la réparation des articulations.

soit en chondrocytes (qui composent le cartilage). De même, à l'Université de Chapel Hill, Lola Reid a identifié des cellules précurseurs dans des foies humains adultes. De forme ovale et de petite taille, ces cellules se différencient soit en hépatocytes (les cellules qui produisent la bile et dégradent les toxines), soit en cellules épithéliales (qui tapissent les voies biliaires).

Simultanément, quelques équipes recherchent des lignées de cellules de type «donneur universel» : à cette fin, elles essaient d'ôter ou de masquer les protéines situées à la surface des cellules, qui les font reconnaître comme étrangères quand elles sont greffées dans un organisme. La Société *Diacrin* cherche ainsi à rendre quelques types de cellules de porc transplantables chez l'homme. Elle utilise également la technique du «masquage», pour que les greffes de tissus humains non compatibles soient mieux tolérées. Les premiers essais cliniques porteront sur le traitement de lésions hépatiques avec des cellules hépatiques humaines masquées.

En principe, le receveur ne devrait pas rejeter ces cellules de type donneur universel ; on espère en produire à partir de divers types de cellules et les garder en culture jusqu'à leur emploi. Cependant, leur efficacité clinique n'a pas encore été testée.

Des usines de tissus vivants

La production de cellules et de tissus artificiels reste difficile : la biologie n'a identifié que quelques-uns des signaux biochimiques qui commandent la différenciation des cellules souches embryonnaires et des cellules précurseurs. Aujourd'hui, on ne sait pas isoler, à partir de la moelle osseuse, des cellules souches et des cellules précurseurs sans les associer à des cellules de tissu conjonctif, tels les fibroblastes ; or, ces derniers sont gênants, car ils

se divisent rapidement au détriment des cellules souches en culture.

De surcroît, les biologistes ont besoin de procédés mieux adaptés pour cultiver de grandes quantités de cellules dans des bioréacteurs. Ceux-ci se composent d'une enceinte de culture équipée d'agitateurs et d'instruments de mesure. Ils règlent les concentrations en substances nutritives, en gaz (oxygène et dioxyde de carbone) et en produits de dégradation. Les méthodes utilisées procurent souvent trop peu de cellules ou des lamelles de tissu beaucoup trop minces.

Quelques solutions apparaissent. Ainsi, depuis des années, on cherche à obtenir des masses de cartilage suffisamment épaisses pour remplacer, par exemple, un cartilage usé dans le genou. Naguère, lorsque le cartilage cultivé s'épaississait, les chondrocytes du centre étaient trop éloignés du milieu de culture pour prélever des nutriments et des gaz ; ils ne réagissaient plus aux signaux chimiques et physiques qui règlent la croissance et n'éliminaient plus les déchets. À l'Institut de technologie du

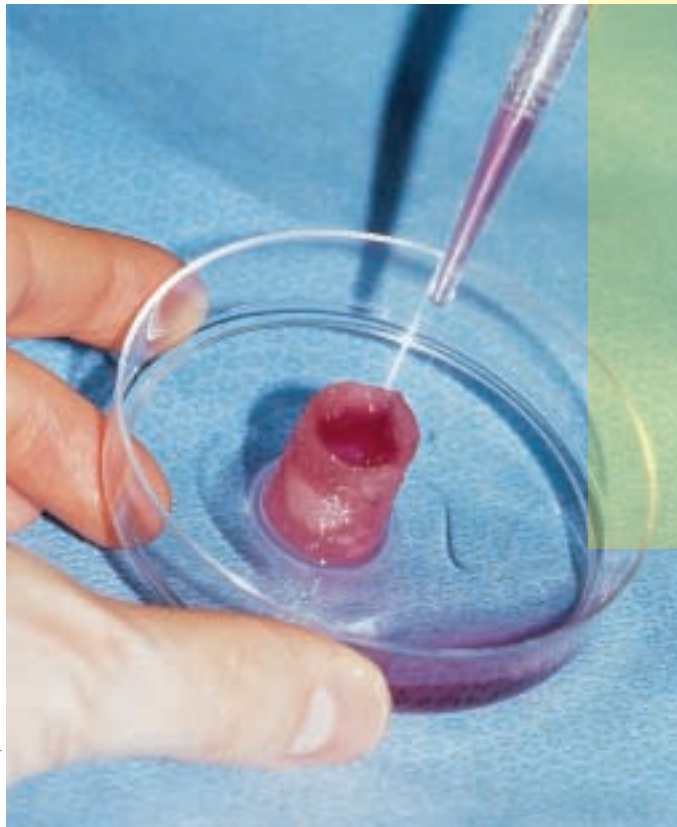
Massachusetts, Gordana Vunjak-Novakovic et Lisa Freed ont résolu le problème en cultivant des chondrocytes sur une matrice tridimensionnelle de polymère (voir la figure 1).

Les bioréacteurs semblent optimiser les propriétés mécaniques des tissus. Ainsi, de nombreux tissus se remodelent ou se réorganisent lorsqu'ils sont étirés ou comprimés : le cartilage s'allonge et s'enrichit en collagène et autres protéines qui forment une matrice extracellulaire, quand il est cultivé dans des flacons en rotation, qui soumettent le tissu à des cisaillements (la matrice extracellulaire est un réseau qui soutient les cellules et guide leur organisation en tissus). Du cartilage cultivé de cette façon contient des protéines de la matrice extracellulaire qui le rendent plus rigide et plus résistant aux contraintes extérieures.

De même, des ostéoblastes fabriquent davantage de minéraux osseux quand ils sont cultivés sur des billes de collagène brassées dans un bioréacteur ; des artérioles artificielles, constituées de cellules endothéliales (qui tapissent les vaisseaux sanguins) et de cellules de muscles lisses, ont des propriétés mécaniques plus proches de celles des vaisseaux sanguins lorsqu'elles sont cultivées dans un milieu de croissance pulsé, qui exerce des contraintes analogues à celles qui sont engendrées par les battements cardiaques. Enfin, plusieurs équipes mettent au point des méthodes pour fabriquer des muscles striés et des muscles cardiaques, c'est-à-dire des tissus qui résistent aux stress physiques.

Tissus sur mesure

Comment régler le comportement de cellules cultivées ? La question est difficile, parce que les systèmes vivants sont complexes. Ainsi, le foie humain contient six types de cellules différents, organisés en réseaux microscopiques, les lobules. Dans chaque cellule, des centaines de réactions



2. CETTE VALVE CARDIAQUE ARTIFICIELLE, réalisée en plastique biodégradable, est «ensemencée» avec des cellules de parois de vaisseaux sanguins de mouton. Après implantation dans un mouton receveur, le plastique est dégradé et remplacé par des protéines naturelles, fabriquées par les propres cellules du receveur.