

milieu de culture préalablement commencé par une suspension bactérienne bien caractérisée ; quand le textile a une activité antimicrobienne, on observe, autour du disque de tissu, une zone où la croissance bactérienne est inhibée. Les diverses méthodes d'évaluation de l'activité bactéricide et bactériostatique des biotextiles sont rigoureusement standardisées, et des normes ont été proposées.

Toutefois, quand on démontre qu'un textile possède une activité sur des cultures de bactéries, en laboratoire, il faut encore prouver qu'il est actif dans des conditions normales d'utilisation. Deux études ont validé leur efficacité. Une des études a mis en évidence l'activité antibactérienne de sous-vêtements féminins dont le fond était composé d'un mélange de coton et de fibres contenant des zéolithes à l'argent et au cuivre. Le développement bactérien sur le tissu est réduit de près de 50 pour cent (entre 25 et 80 pour cent) par rapport au tissu témoin. L'effet antimicrobien persiste après 40 lavages. Toutes les souches bactériennes étudiées subissent la même inhibition, de sorte que l'expérience montre aussi que ces tissus ne semblent pas modifier la flore naturelle.

La lutte contre les infections nosocomiales ?

La seconde étude qui a confirmé l'efficacité des biotextiles a été conduite à l'hôpital du Val-de-Grâce, à Paris. Les draps utilisés dans les services de réanimation et de néphrologie contenaient un mélange de coton et de

polyester incorporant des zéolithes à l'argent et au cuivre. On a constaté que la densité des bactéries sur les draps, les taies d'oreiller et les alèses était réduite de près de 60 pour cent (entre 40 et 70 pour cent). Ce linge ne semble pas perdre son activité lors de son passage dans les circuits de lavage habituels dans les hôpitaux et qui comportent : un prélavage à 40 °C, un lavage de 40 minutes à 90 °C et un repassage à haute température. En revanche, ces textiles représentent un surcoût de près de 20 pour cent par rapport aux tissus classiques.

L'étude réalisée au Val-de-Grâce a mis en évidence la prédominance de certaines bactéries, notamment de *Staphylococcus aureus* et *Acinetobacter*, qui sont, avec les entérobactéries, souvent incriminées dans les infections contractées au cours d'une hospitalisation. Ainsi, même s'ils coûtent plus cher que les tissus classiques, les textiles qui inhibent notablement la multiplication des bactéries pourraient avoir un intérêt, au moment où la lutte contre les bactéries résistantes s'intensifie dans les hôpitaux.

L'étude du Val-de-Grâce a montré que les bactéries ne commencent à se multiplier sur le linge traité par des zéolithes qu'après six heures. Or, dans les unités de soins intensifs, les patients affaiblis ont davantage de risques de développer une infection nosocomiale que ceux d'autres services. On peut donc supposer qu'un changement de draps toutes les six heures, dans ces unités de soins intensifs, pourrait réduire en partie le risque de contamination par le linge.

François RENAUD, maître de conférences au département de génie biologique de l'IUT A, mène ses recherches à la Faculté de Pharmacie Rockefeller (DM3), à Lyon. Jean FRENEY est professeur de microbiologie à l'hôpital Édouard-Herriot, à Lyon.

J. FRENEY, *Composés phénoliques*, in *Antisepsie et désinfection*, J. Fleurette, J. Freney et M.E. Reverdy, éditions Eska, pp. 90-134, 1995.

S. GAILLON et al., *Le linge de lit peut-il avoir des propriétés antibactériennes ? Évaluation d'un nouveau procédé*, in *Hygiènes*, vol. 14, pp. 50-54, 1996.

M. DUTAUD et al., *Étude in vitro et in situ d'un textile antimicrobien*, Congrès

de la Société française de microbiologie, Lille, 1998.

H.P. SCHWEIZER, *Intrinsic resistance to inhibitors of fatty acid biosynthesis in Pseudomonas aeruginosa is due to efflux: application of a novel technique for generation of unmarked chromosomal mutations for the study of efflux systems*, in *Antimicrob. Agents Chemother.*, vol. 42, pp. 394-398, 1998.

L.M. McMURRY et al., *Triclosan targets lipid synthesis*, in *Nature*, vol. 394, pp. 531-532, 1998.

R.J. HEATH et al., *Mechanisms of triclosan inhibition of bacterial fatty acid synthesis*, in *J. Biol. Chem.*, vol. 274, pp. 11110-11114, 1999.

Pour un mohair de qualité

DANIEL ALLAIN

Grâce à des analyses génétiques des chèvres angoras, les éleveurs sélectionnent des reproducteurs dont la laine est de qualité supérieure.

Selon des tablettes de l'ancienne civilisation de Sumer, la chèvre angora existe au moins depuis 1 400 ans en Asie. Des témoignages grecs indiquent que l'élevage de cette race de chèvres à la toison longue et blanche s'est développé au III^e siècle avant notre ère : d'abord en Turquie, sur les plateaux d'Anatolie, dans la région d'Ankara, d'où dérive le nom angora, puis dans le monde occidental. Au XV^e siècle, la famine a fait échouer la tentative d'introduction en France. Enfin, depuis 1980, l'espèce s'est acclimatée et, aujourd'hui, environ 7 500 animaux répartis sur tout le territoire, dans 180 élevages, produisent chaque année 30 tonnes de poils nommés mohair. Des coopératives d'éleveurs gèrent la totalité de cette production jusqu'à la commercialisation de produits finis identifiés par un label : «Le Mohair des Fermes de France», qui garantit la qualité et l'origine de la production. Nous avons identifié les caractères déterminants de la qualité du mohair et mis au point un programme de sélection des futurs reproducteurs, afin d'améliorer la qualité des fibres.

La chèvre angora femelle pèse environ 40 kilogrammes, tandis que le bouc atteint 65 kilogrammes. Les jeunes naissent au printemps et sont tondus pour la première fois vers l'âge de six mois, puis deux fois par an, à la fin de l'hiver et à la fin de l'été, lorsque les fibres atteignent 8 à 12 centimètres de longueur. Chaque année, un mâle produit cinq à six kilogrammes de mohair brut, contre quatre à cinq kilogrammes pour la femelle. Les élevages français sont beaucoup moins extensifs que ceux des grands pays producteurs, telles l'Afrique du Sud (qui fournit 50 pour cent de la production mondiale), la Turquie, l'Argentine et l'Australie : les éleveurs français utilisent des aliments complémentaires pendant

la phase de reproduction, la lactation et la croissance des jeunes. Les animaux sont ainsi plus corpulents, ils se reproduisent mieux et donnent un mohair de meilleure qualité.

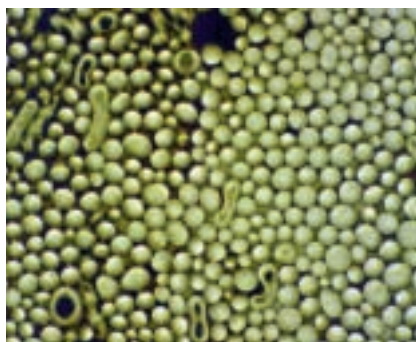
Le mohair est une fibre longue et blanche, très appréciée par l'industrie textile pour sa solidité, sa résistance à la rupture, sa douceur, son lustre, son élasticité et sa faible aptitude au feutrage : les fibres ne s'emmêlent pas, ni ne s'agglutinent. La toison de la chèvre angora est normalement composée d'un seul type de fibres, de 25 à 40 micromètres (millièmes de millimètres) de diamètre, composées d'une

protéine pure, la kératine (comme nos cheveux et nos ongles).

Cependant, la toison peut également contenir jusqu'à cinq pour cent de fibres médullées : ces fibres creuses ont une cavité centrale qui contient une moelle. Celles dont le canal médullaire est large sont nommées jarres, celles dont le canal est étroit et parfois discontinue sont dites hétérotypiques. Souvent grossières et épaisses, elles sont indésirables. Pour éviter ces fibres, on a d'abord cherché à comprendre pourquoi elles apparaissent.

Bien que permanente, la croissance du mohair subit de fortes variations saisonnières : la vitesse de croissance est maximale en été, quand l'alimentation et les sécrétions d'hormones, telles la prolactine et les hormones thyroïdiennes, sont plus importantes, et minimale en hiver. Chez la chèvre, mais aussi chez les chats ou les lapins, le caractère angora, qui résulte de l'expression de plusieurs gènes, correspond à un allongement de la durée d'activité des follicules pileux, qui synthétisent ainsi des poils longs.

La finesse, qui est le principal paramètre de la qualité du mohair, dépend de l'âge de l'animal : les fibres des chevreaux ont moins de 30 micromètres de diamètre, celles des jeunes chèvres, entre 30 et 34 micromètres, et les fibres des animaux adultes, plus de 34 micromètres. La finesse du mohair des chevreaux lui vaut une appellation particulière : «kid». Des fibres d'une longueur inférieure à sept centimètres ou des fibres de longueurs variables réduisent la quantité de fil obtenu après le filage (l'opération qui assemble les fibres en un fil). La qualité du mohair et, donc sa valeur marchande dépendent également de son rendement en lavé de fond, c'est-à-dire la proportion de mohair pur dans la toison brute lorsque le sébum, la sueur, les débris végétaux, les



1. LA SECTION TRANSVERSALE d'un faisceau de fibres de mohair commun montre, d'une part, la présence de fibres médullées indésirables et, d'autre part, l'hétérogénéité des dimensions des fibres (en bas). En revanche, la section transversale d'un mohair de haute qualité se caractérise par la présence de peu de fibres médullées et par l'homogénéité des dimensions des fibres (en haut).

fibres colorées, les fibres médullées et les poussières ont été éliminées.

Le mohair le plus pur et le plus fin est réservé à la fabrication de produits haut de gamme, tels les vêtements, les tissus d'ameublement et les fils à tricoter, tandis que les mohairs de qualité inférieure sont réservés à la production de couvertures.

En partenariat avec une cinquantaine d'éleveurs, nous cherchons à produire en quantité un mohair de haute qualité, fin et exempt de fibres médullées, chez des animaux adultes âgés de 18 mois, en sélectionnant les animaux en fonction du poids et l'homogénéité de leur toison, de la finesse des fibres. Depuis 1988, à l'Institut national de la recherche agronomique, à Toulouse, nous avons ainsi mis au point un programme d'amélioration génétique de la chèvre angora.

Dans les fermes et en station de contrôle, où les futurs boucs reproducteurs sont sélectionnés, nous effectuons un contrôle de filiation qui inclut le suivi de la reproduction et des généalogies, et un contrôle des performances. Pour chaque animal, nous enregistrons les poids de laine à chaque tonte. À chaque animal âgé de 18 mois, nous prélevons un échantillon de toison pour évaluer la qualité des fibres. Nous déterminons le rendement au lavage, la finesse moyenne, l'homogénéité du diamètre des fibres et la quantité de fibres médullées. Le diamètre des fibres et la quantité de fibres médullées sont mesurés à l'aide d'un microscope piloté par un ordinateur qui, à l'aide d'un logiciel d'analyse d'images reconnaît et identifie les différents types de fibres. Cet appareil mesure le diamètre de quelques milliers de fibres en deux à trois minutes. Les autres caractéristiques de la toison sont recueillies et notées selon un barème établi par un expert. Toutes ces données sont ensuite gérées et analysées régulièrement au sein d'un fichier national que les éleveurs consultent et exploitent.

Nous avons montré que le sexe, l'âge et le statut physiologique de la femelle (allaitante ou non), ainsi que l'année et l'élevage de production déterminent la quantité et la qualité du mohair produit. À chaque tonte, les mâles produisent plus de mohair que les femelles, mais avec une fibre plus grossière. Le mohair le plus fin est produit par les jeunes animaux. La production quantitative augmente



2. LES CHÈVRES ANGORAS ont une longue toison, dont les fibres sont très appréciées par l'industrie textile. Ce caractère résulte d'une activité prolongée des follicules pileux.

avec l'âge de l'animal. Le poids de toison récoltée en été est plus élevé qu'en hiver. En revanche, chez les femelles, la chèvre produit moins de laine pendant l'allaitement.

L'analyse des données permettent, à l'aide de modèles statistiques appropriés, d'évaluer périodiquement la valeur génétique d'un animal à partir de sa performance, que l'on décompose en une somme des effets de l'environnement de production (âge, sexe, année, saison...) et des effets génétiques des caractères transmissibles. Ainsi, les éleveurs sont aidés dans le choix et la diffusion des futurs reproducteurs.

Nos résultats montrent qu'une partie des améliorations obtenues (entre 20 et 35 pour cent, selon les caractères de la toison) sont transmissibles génétiquement à la descendance ; l'autre partie dépend des aléas des conditions de production. La chèvre angora se

prête donc bien au travail d'amélioration génétique : par exemple, depuis dix ans, nous avons observé une augmentation transmissible à la descendance de 250 grammes du poids moyen de la toison et une réduction de cinq micromètres du diamètre des fibres résultant aussi bien de l'expression génétique que des conditions de production.

L'application du programme de sélection à la production de poils utilisés par l'industrie textile rend ce programme d'amélioration unique. Il concerne une petite filière d'éleveurs qui produisent un mohair de qualité croissante en contrôlant toutes les étapes, de la production à la commercialisation de produits finis.

Daniel ALLAIN travaille à la station d'amélioration génétique des animaux, à l'INRA, à Toulouse.

De l'étoffe à la main

MARIE-ANGE BIGUÉ-BUENO • MARC RENNER

Une meilleure connaissance théorique du toucher conduirait à des améliorations de la qualité et de la douceur des étoffes. Les fabricants satisferaient alors mieux les consommateurs.

Le toucher d'une étoffe, gage de confort et de qualité, est un des principaux arguments de vente d'un vêtement. Pourtant, l'amélioration du toucher est encore empirique : les professionnels le modifient en se fondant sur leurs connaissances de la nature des fibres, de la fabrication du fil, du tissage ou du tricotage, des traitements chimiques et mécaniques d'ennoblissement, tels la teinture, l'impression et l'abrasion par un papier d'émeri. Ils savent, par exemple, que les adoucissants réduisent le coefficient de frottement entre la surface et les doigts, rendant ainsi les étoffes plus douces au toucher.

Toutefois, de telles connaissances ne permettent pas d'optimiser le toucher d'une étoffe. Dans notre laboratoire, nous avons étudié, d'une part, la perception de la peau au contact d'un tissu et, d'autre part, comment varie le toucher d'une étoffe en fonction de sa structure. Nous pensons qu'une meilleure connaissance théorique et une maîtrise des paramètres

de fabrication seraient des atouts importants pour atteindre la douceur idéale. La première étape est une analyse de la sensation tactile procurée par les étoffes.

Le sens du toucher

Pourquoi certains touchers, tel le célèbre «peau de pêche», sont-ils si doux? Comment quantifier objectivement la douceur d'une étoffe? Quelle est l'influence de la surface (rugosité, comportement au frottement...)? Quels phénomènes sont en jeu lorsque la main touche une surface?

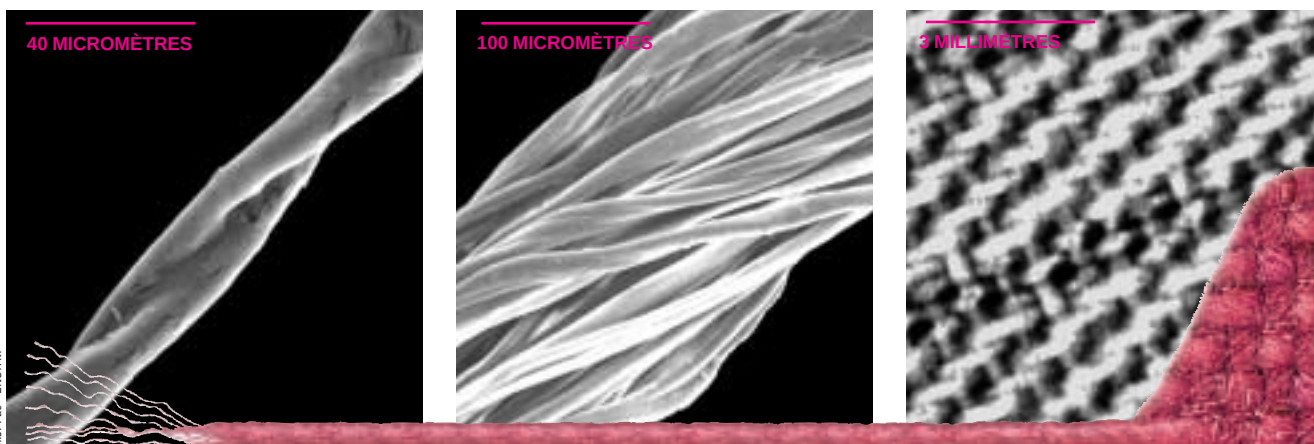
La peau contient des récepteurs du toucher que l'on trouve également sur tout le corps, mais nous n'avons étudié que la pulpe des doigts, où ils sont plus nombreux et plus souvent sollicités. La plupart des récepteurs sensoriels sont formés par l'extrémité d'une ramification d'un neurone, enveloppée dans une capsule de tissu conjonctif : c'est le cas des corpuscules de Pacini, de Meissner et de Ruffini.

Les récepteurs de Merkel sont composés d'une terminaison nerveuse nue en forme de disque, adjacente à une cellule, nommée cellule de Merkel, de la base de l'épiderme (voir la figure 2).

Les corpuscules de Pacini et de Meissner sont sensibles aux fréquences vibratoires, c'est-à-dire, pendant un mouvement de la main, au nombre de collisions par seconde entre la peau et les aspérités de la surface de l'étoffe. Les corpuscules de Ruffini et les récepteurs de Merkel, eux, perçoivent les déformations durables de la peau.

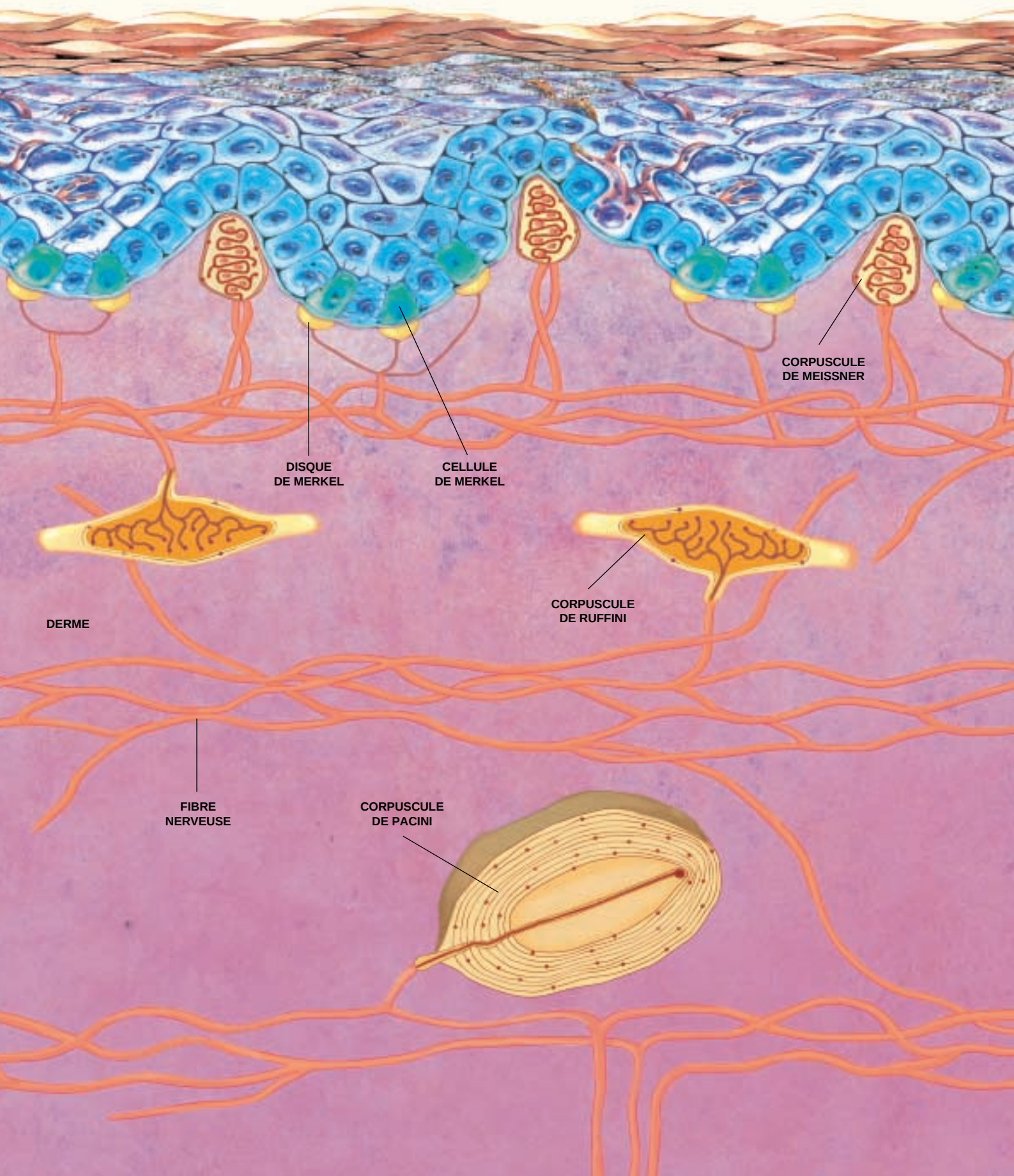
Outre leur profondeur dans la peau, leur taille, la superficie de leur zone de réception, etc., ces quatre types de récepteurs se distinguent par leur temps d'adaptation, c'est-à-dire leur temps de réaction aux stimulus.

Les corpuscules de Pacini et de Meissner sont à adaptation rapide : ils réagissent vite aux vibrations de la peau lors d'un mouvement, mais cessent rapidement d'être excités. En revanche, les corpuscules de Ruffini et les récepteurs de Merkel sont à



1. DES FIBRES SYNTHÉTIQUES OU NATURELLES, telles celles de coton (à gauche) sont solidarisées par une torsion pour former un fil (au centre). Celui-ci est l'élément de base d'un tissu (à droite) qui résulte

de l'entrecroisement de fils dans deux directions perpendiculaires, selon un schéma d'organisation nommé armure. Les fils de trame sont passés entre les fils de chaîne tendus sur un métier à tisser.



2. LA PEAU GLABRE contient quatre types de récepteurs nerveux responsables du sens du toucher : les corpuscules de Pacini et de Meissner sont sensibles aux vibrations de la peau lors d'un mouvement, les corpuscules de Ruffini et les récepteurs de Merkel détectent les défor-

mations de la peau. Ces corpuscules sont des terminaisons nerveuses enveloppées dans du tissu conjonctif, tandis que les récepteurs de Merkel sont composés d'une extrémité nerveuse aplatie en disque, adjacente à une cellule sensible de l'épiderme (*en bleu*).

adaptation lente : ils réagissent plus tardivement, mais de façon durable, aux déformations statiques de la peau. Ainsi, une main en mouvement apprécie mieux la texture d'une surface qu'une main au repos, puisqu'elle sollicite les quatre types de récepteurs, et non deux seulement.

Grâce à ses récepteurs, la peau est sensible à des vibrations comprises entre 5 et 1 000 hertz (ou vibrations par seconde). Par exemple, à une vitesse de 16 centimètres par seconde, le tissu d'un jean stimule la peau à environ 300 hertz, et la soie d'un foulard à 800 hertz.

Les corpuscules de Pacini sont les plus profondément enfouis sous la surface de la peau ; ce sont les plus sensibles aux hautes fréquences. Ils sont également les plus sensibles à des vibrations de faible amplitude : moins d'un micromètre (millième de millimètre) pour des fréquences comprises entre 100 et 300 hertz. Les corpuscules de Meissner, excités par des fréquences inférieures (de 20 à 40 hertz), détectent les détails minces d'une surface pendant un mouvement. Les récepteurs de Merkel rendent compte des irrégularités de la surface, même quand la main est immobile. Enfin, les récepteurs de Ruffini captent les déformations latérales de la peau et leur direction : presque insensibles à la rugosité, ils perçoivent la vitesse de déplacement.

Ainsi, lors des mouvements lents, seuls les corpuscules de Ruffini et les récepteurs de Merkel sont stimulés. Puis, lorsque la vitesse augmente, les corpuscules de Meissner sont sollicités. Enfin, quand le mouvement est devenu rapide, tous les corpuscules sont excités.

La durée du stimulus n'est généralement pas une limite à l'évaluation d'une étoffe, car on peut la garder en main aussi longtemps qu'on le souhaite. Toutefois, les récepteurs se fatiguent, c'est-à-dire qu'ils deviennent moins sensibles au bout de quelques secondes.

Outre l'amplitude et la fréquence des vibrations, la sensation perçue dépend de la discrimination spatiale de la pulpe des doigts, c'est-à-dire la distance minimale entre deux stimulus contigus et continus pour qu'ils soient perçus indépendamment. Deux aiguilles très proches ne sont pas distinguées. Égale à deux millimètres, la discrimination spatiale est limitée par la distance entre les récepteurs. La discrimination spatiale, mesurée lors d'un contact statique, ne rend pas compte des récepteurs de Pacini, qui ne sont pas stimulés. La précision de la localisation d'un stimulus tactile est de l'ordre du millimètre, et un déplacement d'un dixième de millimètre du stimulus est détecté. La pulpe

des doigts détecte une pression de 20 pascals, soit deux milligrammes par millimètre carré, c'est-à-dire l'équivalent de 20 centimètres carrés de papier posé sur un doigt. Par ailleurs, la loi des physiiciens allemands Ernst Weber et Gustav Fechner stipule que l'intensité de la sensation est proportionnelle au logarithme de l'intensité du stimulus. La sensation perçue est également caractérisée par le seuil différentiel, c'est-à-dire la plus petite différence perceptible entre deux stimulus. Par exemple, pour la pression cutanée, le seuil différentiel est de cinq pour cent de l'intensité d'un stimulus initial.

Les neuro-physiologistes connaissent bien le mode de transmission de l'influx nerveux de la main au cerveau ; en outre, ils savent que les récepteurs de la main sont projetés sur une des plus grosses zones sensorielles du cerveau. En revanche, le détail du traitement de l'information tactile par le cerveau est encore peu connu. La taille de la zone cérébrale activée par chaque partie du corps est proportionnelle à la densité d'informations sensorielles reçues et, donc, à l'importance qui leur est accordée : la peau, particulièrement celle de la main, est donc un organe sensoriel important. Elle constitue le dernier rempart de l'intégrité de notre corps après la vue, l'ouïe, l'odorat et le goût. Chez l'être humain, les cinq sens sont également en charge de l'instruction des qualités esthétiques de notre environnement, que notre cerveau juge.

La perception des textures

Selon certains physiologistes, la fréquence vibratoire est l'élément majeur de la perception de la rugosité. Toutefois, pour d'autres, l'intensité des vibrations est primordiale.

La perception de la rugosité est souvent étudiée grâce à des surfaces, nommées grilles, gravées de rainures rectilignes et parallèles, dont on peut facilement modifier les dimensions, telles la largeur, la profondeur et la distance entre des rainures successives. En 1972, au Canada, Susan Lederman et Martin Taylor ont montré que la rugosité perçue augmente avec la largeur des rainures, alors qu'elle diminue quand la distance entre deux rainures augmente.

RÉCEPTEURS	MEISSNER	PACINI	MERKEL	RUFFINI
Adaptation	Rapide	Rapide	Lente	Lente
Profondeur	Derme	Épiderme	Épiderme	Derme
Nombre de récepteurs par fibre	12 - 17	1	4 - 7	1
Nombre de récepteurs par centimètre carré	140	21	70	49
Taille des champs récepteurs (en millimètres carrés)	12,6	101	11	59
Fréquences (en hertz)	3 - 300	30 - 1 000	?	?
Sensibilité maximale (en hertz)	20 - 40	100 - 300	< 8	< 8

3. LE TABLEAU récapitule les propriétés des quatre types de récepteurs de la peau glabre.

La fréquence de vibration n'explique donc pas à elle seule la rugosité perçue, puisque la largeur et la distance entre deux rainures ont des influences opposées. S. Lederman a également constaté que ni la somme de la largeur d'une rainure et de la distance entre deux rainures, nommée période spatiale, ni le quotient de la largeur de la rainure par la distance entre deux rainures ne déterminent la rugosité perçue. Néanmoins, l'être humain peut différencier des grilles dont les périodes spatiales diffèrent de 45 micromètres. Le paramètre déterminant de la rugosité est la largeur des rainures.

De plus, la pression exercée par le doigt, la vitesse de déplacement, ainsi que la température, influencent la rugosité perçue. Pour chaque doigt médian (l'index, le majeur et l'annulaire), l'aire de contact moyenne d'un doigt est d'environ 1,6 centimètre carré, et la pression moyenne est comprise entre un et huit kilopascals, selon le nombre de doigts utilisés pendant les expériences. Pendant nos expériences, la main effectue un mouvement de va-et-vient, à une fréquence moyenne de quatre hertz et à une vitesse moyenne de 16 centimètres par seconde. En 1925, David Katz a montré que la vitesse ne détermine pas la rugosité perçue lorsqu'elle reste inférieure à 25 centimètres par seconde : le changement de vitesse de la main modifie peu la rugosité perçue. En revanche, lorsque la main se déplace à plus de 25 centimètres par seconde, la surface testée paraît plus lisse, car la peau, limitée par son élasticité, n'a plus le temps de s'adapter à la surface.

Des expériences ont montré que, quand la largeur des rainures est supérieure à 0,625 millimètre, la pression qu'exerce naturellement la main augmente avec la largeur des rainures, et donc, avec la rugosité. De même, une augmentation de la pression augmente la rugosité perçue. Cette dernière s'exprime en fonction du produit de la force exercée par le doigt par la largeur de la rainure élevée à la puissance quatre lorsque celle-ci est supérieure à 0,25 millimètre ; lorsqu'elle est inférieure, la sensation est identique que nous soyons énervés ou calmes !

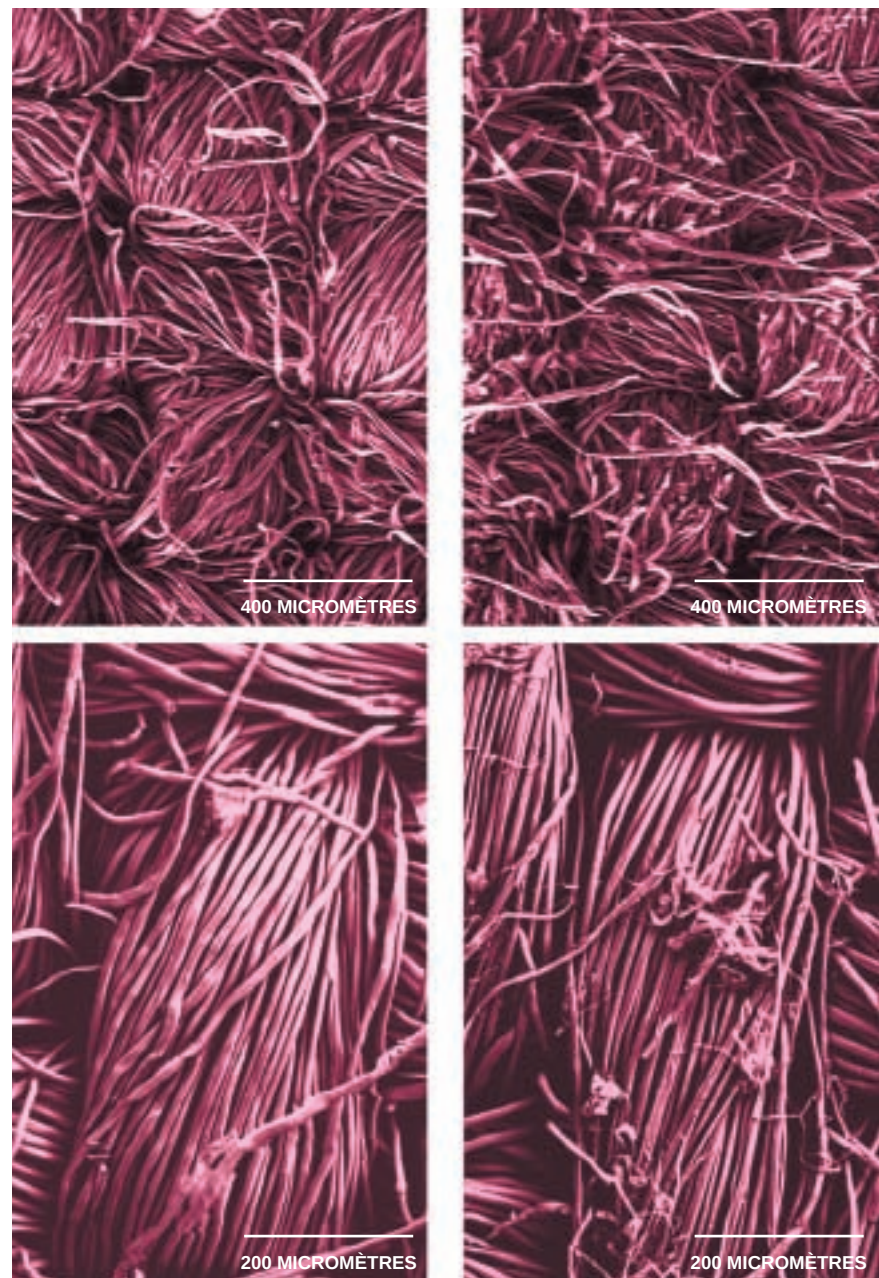
En influençant l'élasticité de la peau, la température modifie la rugosité

perçue. Quand la température est inférieure à 32 degrés, une surface lisse semble encore plus lisse, tandis qu'elle paraît plus rugueuse lorsque la température est supérieure. En revanche, la température n'a aucune influence sur la perception des surfaces rugueuses.

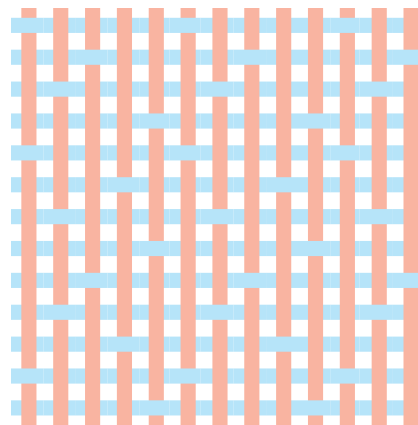
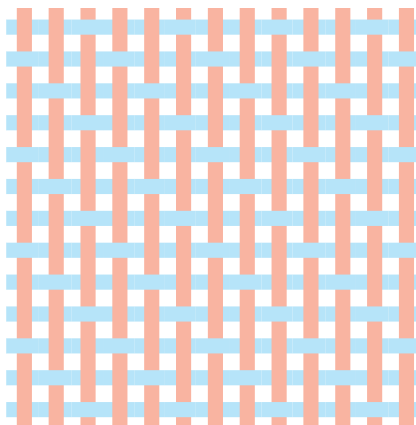
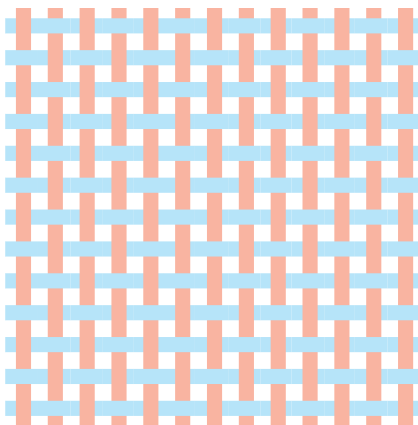
Comment les forces de frottement, que nous avons jusqu'à présent négligées, interviennent-elles ? Le frottement entre deux surfaces, par exemple entre une main et une étoffe, dépend de la

rugosité des surfaces et des propriétés physico-chimiques de l'interface. Ces dernières modifient la force tangentielle entre l'étoffe et le doigt : cette force diminue soit par l'utilisation d'un matériau plus glissant, soit par l'ajout d'un lubrifiant, tel un adoucissant.

Pouvons-nous appliquer nos connaissances de l'influence des paramètres sur la sensation perçue pour améliorer la douceur au toucher d'une étoffe ?



4. UNE ÉTOFFE peut être rendue plus douce au toucher par la création d'une pilosité de surface. Par exemple, le passage d'un papier d'émeri sur une toile de coton (*en haut, à gauche*) crée des petits poils (*en haut, à droite*). Pour des fibres de Lyocell® en cellulose (*en bas, à gauche*), un traitement mécanique suivi d'une dégradation enzymatique laisse quelques nanofibres (*en bas, à droite*) qui augmentent la douceur au toucher.



5. L'ARMURE, ou la façon d'entrecroiser les fils de chaîne (ceux qui sont tendus sur le métier à tisser) et les fils de trame (ceux qui sont passés perpendiculairement) influe sur la douceur au toucher d'une

étoffe. La toile (à gauche) est plus lisse que le sergé (au milieu), qui a des côtes en diagonales (au centre). En revanche, le satin est très lisse, car les fils de chaîne passent au-dessus de quatre fils de chaîne.

Vers la douceur parfaite

Une étoffe est constituée de fibres qui atteignent jusqu'à dix centimètres de longueur, ou de filaments continus. Lors du procédé de filature, les fibres sont assemblées en fil par une torsion importante, alors qu'un ensemble de filaments est rendu solidaire, le plus souvent par un faible mouvement de torsion. On obtient l'étoffe après le tissage de nombreux fils, en respectant un schéma d'entrecroisements, nommé armure, qui indique l'assemblage des fils de chaîne, c'est-à-dire les fils tendus sur le métier à tisser, et les fils de trame, placés transversalement aux précédents. L'étoffe est ensuite ennoblie : par un blanchiment, une teinture ou une impression, elle obtient son aspect final ; par un adoucissage, un émerisage, un grattage ou des traitements enzymatiques, elle acquiert son toucher final ; et, par des interventions spécifiques, elle devient par exemple imperméable. De la morphologie des fibres aux traitements d'ennoblissement, ce long processus de fabrication offre de nombreuses possibilités d'amélioration du toucher.

Pour paraître plus lisses au toucher, les aspérités d'un tissu, qui sont dues à l'ondulation des fils de chaîne et de trame, ne doivent pas être perçues individuellement. La largeur des rainures est réduite lorsque les fils ont une section plate, par exemple avec des fils de filaments plus déformables que les fils de fibres. On peut ainsi écraser la section par glissement des filaments les uns par rapport aux autres.

Pour rendre un tissu plus doux au toucher, une technique consiste à

composer une étoffe lisse. Une armure adéquate permet de réduire la rugosité (voir la figure 5). Par exemple, l'armure du satin confère au tissu une surface très lisse. En outre, plus les fils sont fins, plus les étoffes sont lisses.

Les armures qui forment des rainures, telles celles en diagonale du sergé des tissus de jeans, seront écartées. De plus, les armures pour lesquelles les fils de chaîne sont très visibles sur la face endroit de l'étoffe seront préférables : les fils de chaînes, souvent plus fins et plus tendus que les fils de trame, engendrent moins d'aspérités et, donc, une distance réduite entre les rainures. Enfin, on évitera les armures avec des grosses côtes, telles celles du velours côtelé, constituées de plusieurs dizaines de fils.

Une autre technique est la création de fibres émergentes, plus fines que les fils, qui empêchent le contact des doigts avec la structure principale de l'étoffe. Par exemple, le grattage, qui crée une pilosité superficielle, confère à la fourrure polaire son toucher et son pouvoir isolant. L'abrasion, nommée émerisage, avec un papier d'émeri est fréquemment utilisée pour les tissus de jeans de couleur (voir la figure 4).

Ces deux techniques peuvent être couplées. Par exemple, on tisse une étoffe très lisse avec des fibres, nommées microfibras, dont le diamètre est inférieur à dix micromètres, puis on crée une pilosité de surface par un émerisage.

Nos travaux se sont restreints aux limites de la perception humaine, car il est inutile de composer une étoffe dont la structure fibreuse dépasse la sensibilité de la main. La recherche d'une structure lisse ou d'une pilosité

de surface sont deux objectifs opposés : dans le premier cas, on tente de se placer sous le seuil de sensibilité de la main, tandis que, dans le second, on compte sur sa sensibilité pour percevoir les fibres émergentes.

D'après l'étude de Ian Darian-Smith, de l'Université de Melbourne, lorsque le nombre de fils par centimètre est supérieur à 13, les fils ne sont pas individualisés par la main. Néanmoins, la surface ne paraît pas forcément lisse, car une différence de période spatiale de 45 micromètres est perceptible. Le tissu le plus lisse a donc une période spatiale inférieure ou égale à 45 micromètres, soit au moins $10\,000 / 45 = 222$ fils par centimètre. Un tissu classique a de 20 à 40 fils par centimètre, mais certaines étoffes très fines ont plus de 100 fils par centimètre. Elles sont proches de la limite !

Outre la structure de l'étoffe, un tissu est plus doux lorsque la pilosité superficielle est augmentée. La pilosité est caractérisée par le nombre de fibres émergentes, par leur longueur et leur section, et par leurs propriétés mécaniques, qui déterminent leur toucher : des poils courts et droits ont un toucher différent de celui des poils longs et couchés.

Avec une vitesse de un centimètre par seconde – nous considérons qu'il s'agit de la vitesse minimale pour apprécier une étoffe –, la main est sensible jusqu'à 1 000 vibrations de dix micromètres d'amplitude par seconde, soit 1 000 vibrations par centimètre : une étoffe ayant 1 000 poils de dix micromètres de diamètre apparaîtra complètement lisse (lorsque la fibre est couchée à la surface du tissu, son

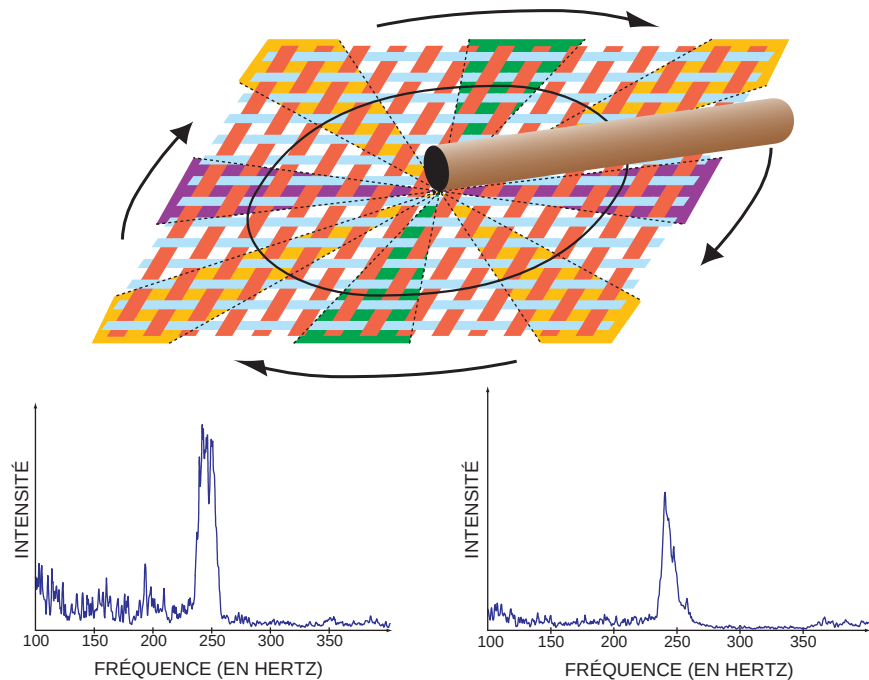
diamètre devient la hauteur des aspérités et détermine l'amplitude des vibrations). Il est inutile d'en obtenir plus ! Cette pilosité existe dans les étoffes de microfibres dont on a « usé » la surface avec un papier d'émeri.

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 microfibrilles, 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 microfibrilles 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 microfibrilles, 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 RENNER 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.

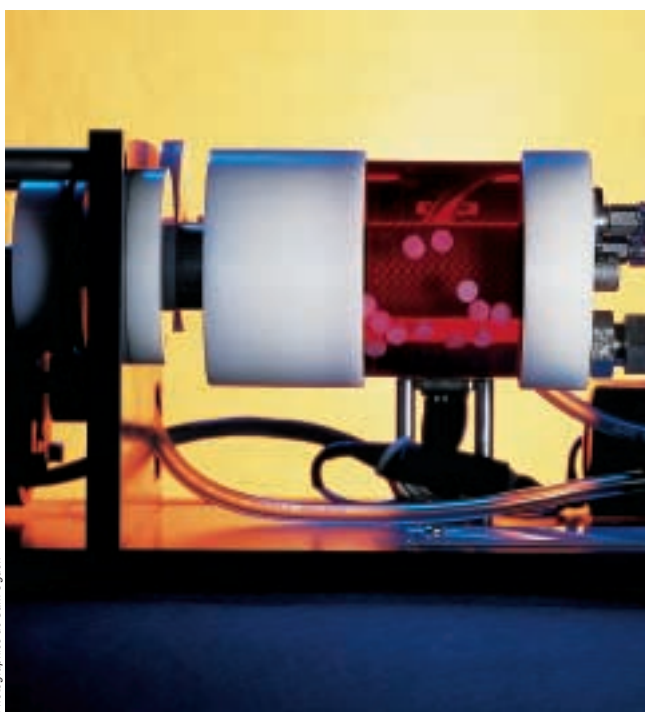
Aujourd'hui, des expériences variées ont démontré que l'on peut fabriquer des tissus artificiels, mais la recherche devra résoudre bien des problèmes avant que des chirurgiens ne greffent des organes artificiels fonctionnels à des patients.

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

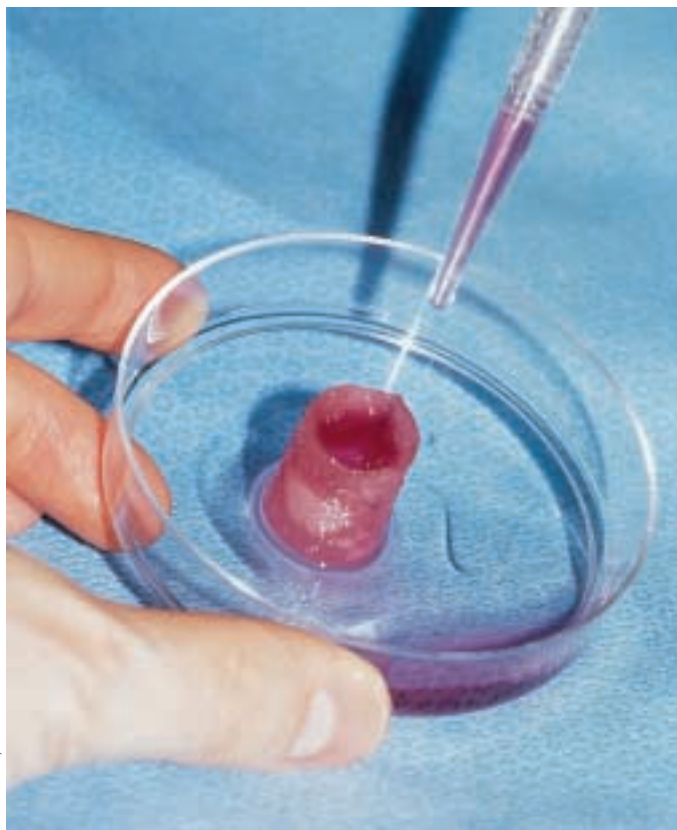
Massachusetts, Gordana Vunjak-Novakovic et Lisa Freed ont résolu le problème en cultivant des chondrocytes sur une matrice tridimensionnelle de polymère (voir la figure 1).

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.

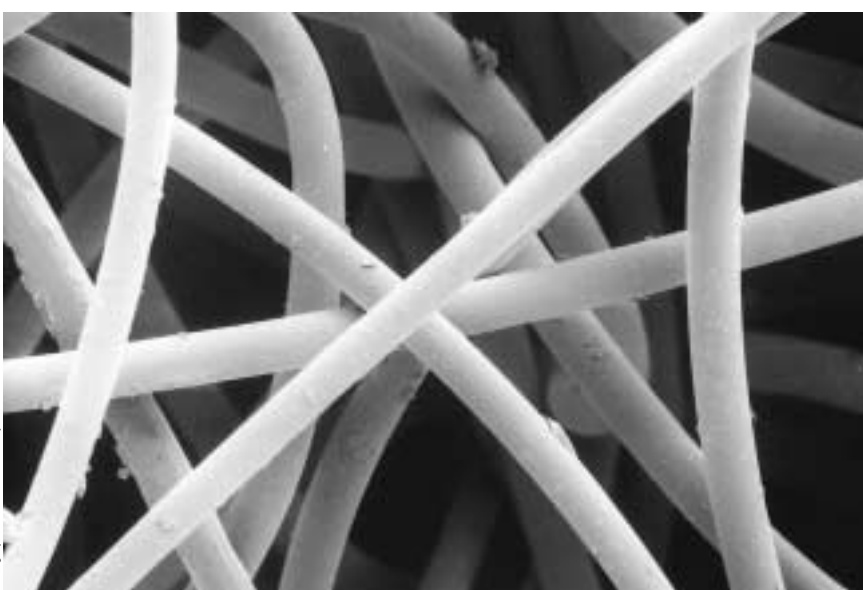
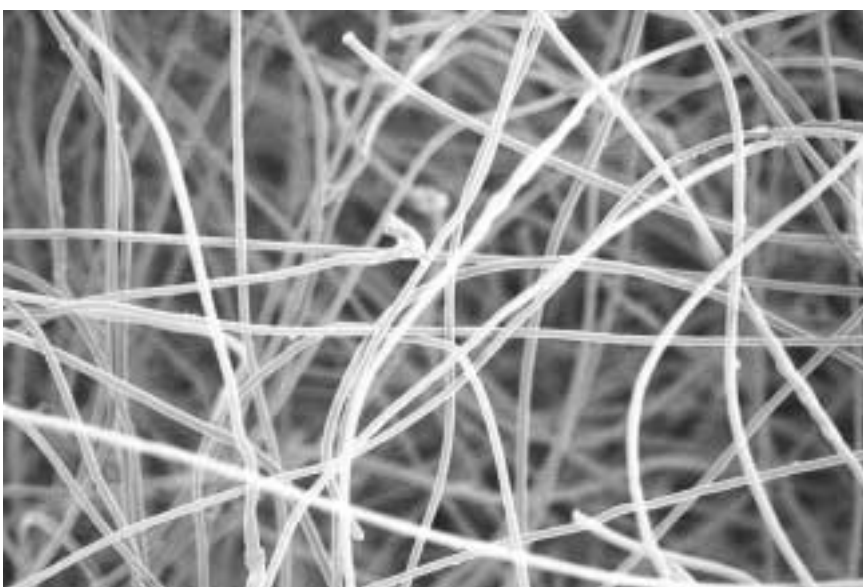
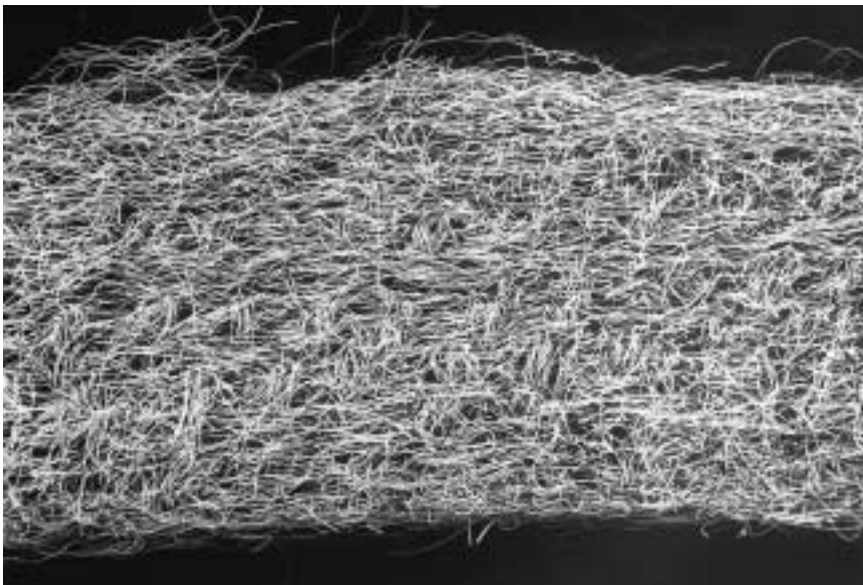
Tissus sur mesure

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



Ulrich A. Stock, Harvard Medical School

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.



Photographies de Gordana Vunjak-Novakovic et Lisa Freed, MIT

biochimiques ont lieu simultanément, et l'activité biochimique d'une cellule dépend souvent de ses interactions avec d'autres cellules et avec le réseau de la matrice extracellulaire. Des hépatocytes produisent des quantités variables des diverses protéines selon l'adhérence du support sur lequel ils poussent. Pour obtenir un foie artificiel, on devra mieux maîtriser les conditions de culture des hépatocytes et des autres cellules du foie, afin d'optimiser leurs capacités à remplir leurs rôles physiologiques.

On devra aussi comprendre comment les organes et les tissus artificiels se réorganisent dans l'organisme où ils sont greffés. Les expériences ont montré que les tissus artificiels greffés stimulent parfois la croissance des cellules et des tissus du receveur ; parfois, ceux-ci remplacent même les polymères artificiels et les cellules transplantées. Ainsi, notre équipe a montré qu'une valve cardiaque, réalisée à partir de polymères de synthèse, de cellules épithéliales et de myofibroblastes d'agneau (les myofibroblastes sont des cellules qui participent à la cicatrisation) devenait plus résistante, plus élastique et plus mince après transplantation sur un mouton. Après 11 semaines, cette valve ne contenait plus de polymères ; elle s'était réorganisée et ne comportait plus qu'une matrice extracellulaire de mouton. Les signaux biochimiques et les facteurs de croissance qui commandent cette réorganisation demeurent en grande partie inconnus.

Ces observations font espérer que l'on parviendra à créer des matériaux biodégradables, qui ne forment pas de cicatrices. La plupart des matériaux utilisés comme support de tissus artificiels sont soit des matériaux synthétiques, tel le matériel de suture biodégradable, soit des matériaux naturels, tels le collagène et l'alginate (une substance dérivée d'algues qui forme des gels). Les matériaux de synthèse peuvent être construits sur mesure :

3. DES RÉSEAUX DE POLYMÈRE biodégradable (photographiés, de haut en bas, à des grossissements de plus en plus forts ; le grossissement est égal à 5 000 au milieu) sont utilisés comme supports de fabrication des organes et des tissus artificiels. Les biologistes cherchent de nouveaux matériaux afin de moduler les propriétés biologiques et physiques des produits fabriqués.

lors de leur fabrication, on peut régler leur résistance, leur vitesse de dégradation, leur microstructure ou leur perméabilité. En revanche, les cellules adhèrent en général mieux aux matériaux naturels.

Aujourd'hui, on cherche à combiner les avantages des deux types de matériaux. Certaines équipes fabriquent des polymères biodégradables aux activités biologiques proches de celles de matrices extracellulaires naturelles. L'un de ces polymères contient la séquence RGD, c'est-à-dire une partie d'une protéine de la matrice extracellulaire : la fibronectine. L'abréviation RGD décrit la composition en acides aminés de la séquence : arginine (R), glycine (G) et asparagine (D). De nombreux types de cellules adhèrent à la fibronectine en s'associant à la séquence RGD : les polymères qui contiennent cette séquence pourraient donc constituer un environnement plus naturel pour la croissance des cellules.

D'autres équipes tentent de créer des polymères conducteurs d'électricité, pour faire croître des nerfs artificiels. D'autres encore explorent des polymères qui gélifieraient rapidement : on constituerait ainsi des produits bioartificiels injectables qui serviraient, par exemple, à combler un os brisé.

De nombreux organes artificiels – en particulier les pancréas, les foies et les reins – ne subsisteront après greffage que s'ils sont bien irrigués par les vaisseaux sanguins. Aussi doit-on se préoccuper de stimuler la croissance de vaisseaux sanguins, ou angiogenèse, dans ces organes. Des biologistes ont déjà réussi à stimuler l'angiogenèse de tissus artificiels en recourant de facteurs de croissance le réseau de polymères qui porte ces tissus. On cherche aujourd'hui à mieux régler la libération et l'activité de ces facteurs de croissance, afin de former des vaisseaux sanguins aux endroits et aux moments appropriés.

Comment, enfin, conserver les tissus artificiels lors de leur transfert, du lieu de fabrication à la salle d'opération, puis pendant la transplantation ? Les chirurgiens savent que les lésions des organes transplantés apparaissent surtout pendant la reperfusion, lorsque le sang du receveur emplit l'organe greffé. La reperfusion provoque la formation de molécules

très réactives – les radicaux libres – qui endommagent les membranes cellulaires et détruisent les cellules. Pour éviter ces dégâts, les chirurgiens ajoutent au liquide de conservation des substances qui piègent les radicaux libres. On doit donc chercher des molécules protectrices adaptées aux tissus artificiels : elles éviteraient les lésions provoquées par la reperfusion ou par l'ischémie (le manque d'oxygène) qui se produit quand le débit sanguin est insuffisant. On étudie aussi les techniques de cryoconservation, afin de garder les organes et les tissus artificiels sous forme congelée, aussi longtemps que nécessaire ; on cherche à adapter les méthodes utilisées pour les cellules aux tissus et aux organes.

Évidemment, l'usage des tissus et des organes artificiels doit être réglementé. Les tissus et les organes artificiels comportent des cellules vivantes et, de ce fait, produisent des substances biologiques qui agissent comme des médicaments. L'administration américaine considère que les produits obtenus par ingénierie des tissus doivent subir la longue série des tests d'homologation appliqués aux médicaments ; la législation sur ces tissus artificiels devra être uniformisée au plan international quels que soient les obstacles à surmonter. Un jour viendra où l'on greffera des tissus et des organes artificiels, tout comme on réalise aujourd'hui des pontages coronariens.

Robert LANGER est professeur d'ingénierie chimique et biomédicale à l'Institut de technologie du Massachusetts. Joseph VACANTI est professeur de chirurgie à la faculté de médecine de l'Université Harvard et directeur du Laboratoire d'ingénierie des tissus et de fabrication d'organes de l'Hôpital général du Massachusetts.

Robert LANGER et Joseph P. VACANTI, *Tissue Engineering*, in *Science*, vol. 260, pp. 920-926, 14 mai 1993.

Robert LANGER et Joseph P. VACANTI, *Les organes artificiels*, in *Pour la Science*, novembre 1995.

M.J. LYSAGHT, N.A.P. NGUY et K. SUL-LIVAN, *An Economic Survey of the Emerging Tissue Engineering Industry*, in *Tissue Engineering*, vol. 4, n° 3, pp. 231-238, automne 1998.

La peau reconstruite

MARCELLE RÉGNIER • MARIE-JEANNE STAQUET

Aujourd'hui, on sait préparer des peaux de substitution qui contiennent tous les types de cellules de la peau. De plus en plus, on teste les substances cosmétiques et pharmacologiques sur ces modèles de peau.

La peau est un organe vital. Les lésions de la peau, tels les ulcères ou les escarres, sont invalidantes, et l'absence de peau sur de larges surfaces, notamment à la suite de brûlures graves, est mortelle. Pour éviter les risques de déshydratation et d'infection, tout autant que la douleur qui suivent une brûlure, on a mis au point des épidermes de culture que l'on greffe aux personnes brûlées. En laboratoire, on utilise des substituts qui ressemblent de plus en plus à la peau pour évaluer l'activité des nouvelles substances pharmaceutiques et cosmétiques. Nous avons mis au point des modèles qui ont un avantage notable : ils évitent de faire une partie des évaluations indispensables sur des modèles animaux ou sur des volontaires. Sur ces modèles, on peut suivre les cellules quasiment une à une et décrypter les mécanismes de différenciation cellulaire et de migration sous l'effet d'agents tels que le soleil ou des substances allergisantes.

Le revêtement cutané est constitué de l'épiderme, en contact avec le monde extérieur, et du derme, dont il est séparé par la membrane basale. En profondeur se trouve l'hypoderme, un tissu graisseux sous-cutané qui contient les adipocytes (les cellules qui stockent les graisses). L'épiderme est constitué de 90 pour cent de kératinocytes, cellules qui assurent le renouvellement cutané et la cicatrisation. Il contient aussi des structures spécialisées, tels les glandes sudoripares et sébacées, et les phanères (poils et ongles).

La couche cornée, superficielle, composée de kératinocytes vieillissants, dépourvus de noyaux et nommés cornéocytes, recouvre l'épiderme : elle constitue une barrière contre les agressions de

l'environnement. L'épiderme contient trois autres types de cellules : les mélanocytes produisent un pigment, la mélanine, qui détermine la couleur de la peau et protège contre les rayonnements du soleil ; les cellules de Langerhans, sentinelles immunitaires, capturent les substances étrangères et les transportent jusqu'aux lymphocytes *T* présents dans les ganglions ; les cellules de Merkel, minoritaires, sont généralement en contact avec les terminaisons nerveuses. Le derme est composé d'une matrice faite de fibres de collagène et d'élastine, synthétisées par les fibroblastes, les principales cellules de cette couche cutanée. Les vaisseaux sanguins, les glandes, les fibres nerveuses assurent à la peau ses fonctions tactiles et sensorielles.

Depuis une vingtaine d'années, on sait cultiver les kératinocytes en grande quantité : en 1975, une équipe américaine a réussi à faire survivre ces cellules en les plaçant en présence d'une couche de cellules dermiques nourricières prélevées sur des souris

et placées dans un milieu enrichi en facteurs de croissance. Elle a obtenu un épiderme stratifié, constitué de plusieurs couches de kératinocytes humains en culture. Ce substitut de l'épiderme se présente sous forme de lambeaux épidermiques (voir la figure 2).

Une patiente reconstruction

Aujourd'hui, on utilise de telles cultures de kératinocytes pour accélérer la cicatrisation des plaies des grands brûlés et des ulcères. Comme de nombreuses greffes, celles de l'épiderme sont rejetées quand les kératinocytes ne proviennent pas de la personne à traiter. Ainsi, en cas de brûlures graves, on prélève un lambeau de peau saine sur la personne brûlée, et l'on en fait la culture dans des conditions bien contrôlées pour obtenir des lambeaux d'épiderme suffisamment étendus pour recouvrir les plaies : à partir d'une biopsie de peau de deux centimètres

