

Décembre 1999

SCIENCE

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Fibres textiles et tissus biologiques

BLOC-NOTES de Didier Nordon

5

JEU-CONCOURS par Pierre Tougne

6

Héritage diophantien**TRIBUNE DES LECTEURS**

7

POINT DE VUE

8

Séisme en Turquie

par M.-P. Bouin et J. B. de Chaballier

SCIENCE ET GASTRONOMIE

10

Quiches, petits choux et pains à l'union
par Hervé This**PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES**

12

- L'apocalypse? Pas pour cette fois ■ La mémoire en photos
- Énigme chimie interstellaire ■ Retard mental
- La montée du célibat ■ Magiques les noyaux?

LOGIQUE ET CALCUL**Promenade au pays des indécidables**

196

de Jean-Paul Delahaye

IDÉES DE PHYSIQUE**La gravité sans pesanteur**

202

de Roland Lehoucq

ANALYSES D'ŒUVRES

202

■ Le cas Spengler. Religion, science et politique

de Daniel Becquemont et Laurent Mucchielli

■ Les rythmes du vivant (Origine et contrôle des rythmes biologiques) de Jean Boivin et Bernard Canguilhem

INDEX ANNUEL 1999

206

Les lecteurs trouveront, pages 69 à 81, un dossier 1999 : Année internationale de la chimie, réalisé avec l'aide du ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie.

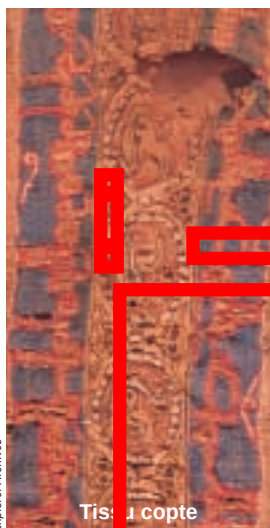


INTRODUCTION

Fibres, fils et tissus, par Theo Tervoort et Paul Smith

20

Les recherches portent à la fois sur la conception de fibres dont la structure physico-chimique confère des qualités souhaitées aux fils et sur leur fabrication.



Tissu copte

L'HISTOIRE DES TEXTILES

Les textiles des princes celtes, par Christophe Moulherat

36

Les textiles des sépultures aristocratiques de l'Europe celtique étaient très élaborés.

L'art de la soie, par Claudio Zanier

44

Au début du XIX^e siècle, la France a supplanté le Piémont dans la manufacture du fil de soie.

Les teintures naturelles, par Dominique Gaudon

50

Les teintures naturelles suscitent l'intérêt des industriels, des chimistes et des archéologues.

L'avènement des colorants synthétiques, par G. Bram et Nguyễn T. Anh

56

Dès le milieu du XIX^e siècle, les colorants synthétiques balayèrent les colorants naturels.

Du coton naturellement coloré, par James Vreeland

62

Pendant 5 000 ans, les Indiens d'Amérique ont cultivé du coton naturellement coloré.

PHYSIQUE ET TEXTILES

La mécanique des tissus, par J.-F. Ganghoffer et M. Magno

88

Une analyse des tissus modélisés rend compte des déformations dues aux tractions.

Des tissus aux couleurs changeantes, par S. Berthier et J. Lafait

94

Des tissus aux couleurs iridescentes auraient la structure des ailes de papillons.

Halte aux taches, par Kenneth Wong et Daniel Joubert

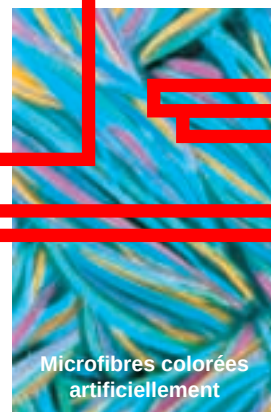
102

Les détachants modernes foisonnent d'astuces physico-chimiques conçues pour ôter les taches.

L'ensimage, par David Quéré

108

La vitesse de tirage d'un fil hors d'un bain détermine la quantité de liquide entraîné.



Microfibres colorées artificiellement

Science Photo Library

CHIMIE ET TEXTILES**Les fibres artificielles résistantes**, par D. Sikkema et M. Northolt **112**

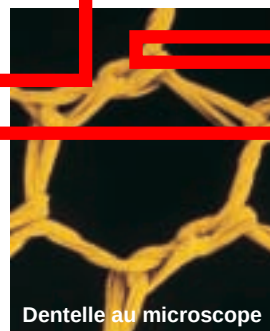
De la compréhension à la fabrication des fibres résistantes.

L'ennoblissement des textiles, par Pierre Viallier **118**

L'étude physico-chimique des fibres et celle des teintures ou des apprêts améliore les traitements.

Du crustacé au tissu, par Alain Domard **124**

On utilise la chitine de la carapace de crustacés pour confectionner des tissus.



Dentelle au microscope

R.E. Litchfield/Science Photo Library

BIOLOGIE ET TEXTILES**Les textiles antimicrobiens**, par F.N.R. Renaud et J. Freney **134**

Ces textiles contiennent des substances qui régulent la multiplication des bactéries.

Pour un mohair de qualité, par Daniel Allain **142**

Les éleveurs sélectionnent les chèvres angoras dont la laine est de qualité supérieure.

De l'étoffe à la main, par M.-A. Bigué-Bueno et M. Renner **144**

La connaissance théorique du toucher des textiles progresse.

La confection de tissus vivants, par Robert Langer et Joseph Vacanti **150**

La fabrication d'organes à partir de cellules et de polymères de synthèse est envisageable.

La peau reconstruite, par Marcelle Régnier et Marie-Jeanne Staquet **154**

Aujourd'hui, les peaux de substitution contiennent tous les types de cellules de la peau.

Les cellules encapsulées, par Michael Lysaght et Patrick Aebischer **160**

Des implants contenant des cellules vivantes pourraient libérer des molécules thérapeutiques.

Les organes artificiels, par David Mooney et Antonios Mikos **168**

Faute d'organes que l'on peut greffer, on construit des organes vivants, en partie synthétiques.



Substitut de peau

L. Ortol

TECHNIQUE ET TEXTILES**Les textiles techniques**, par Klaus-Dieter Linsmeier **176**

Ils sont utilisés dans les films d'emballage ou les coussins de protection pour automobiles.

Des textiles à trois dimensions, par Jürgen Brandt et Klaus Dreschler **178**

Grâce à de nouvelles techniques de tissage, les textiles deviennent tridimensionnels.

Les renforts textiles brodés, par Konrad Gliesche **182**

On améliore la résistance des composites en ajoutant des fils sur leurs tissus de renfort.

Les fibres naturelles dans les composites, par A. Bledzki et J. Gassan **184**

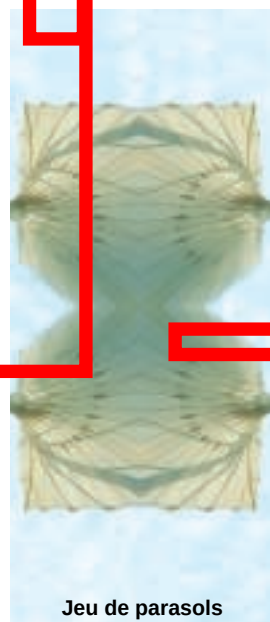
Biodégradables et peu coûteuses, les fibres naturelles commencent à s'imposer dans les composites.

Des composites à partir de textiles, par Dominique Loubinoux **188**

On obtient des composites en fondant des filaments de verre et de matière plastique.

Textiles et enzymes de l'extrême, par Y. Gueguen et J. Dietrich **190**

Les enzymes des micro-organismes des sources chaudes résistent à certains procédés industriels.



Jeu de parasols

Sonderkonstruktionen und Leichtbau - Leinfelden

Par Didier Nordon

Arbitrage défectueux

Ayant proposé un article à une revue, un chercheur a reçu la réponse suivante : « L'article contient de longs calculs qu'on peut trouver dans de nombreux livres de cours. La seule idée nouvelle (mais pas très originale) pourrait être développée de façon bien plus rapide. Le lectorat potentiel de cet article semble très limité. »

Se faire embarrasser aussi sèchement, serait-ce « perdre la face » ? Point. La revue avait demandé l'opinion d'un autre rapporteur. Lequel a conclu : « L'article est la première application profonde, complètement développée et avec plein succès du programme de Colombeau. Il est à coup sûr hautement original dans son approche. Cet article est très important et peut devenir sériel. »

Non, il n'y a pas d'erreur. Les deux avis portent bien sur le même article. Pour l'éducation des naïfs qui veulent croire à une possibilité de jugement objectif en ce bas monde, signalons que l'article relève d'un domaine qui représente sans doute le *nec plus ultra* de l'objectivité : la physique mathématique. Et, à l'intention de ceux qui aiment les histoires se terminant bien, précisons que, finalement, l'article a été retenu pour publication. Chacun pourra donc le lire, et se faire par soi-même un jugement... objectif.

médionale, la pragmatique linguistique, la psychologie évolutionniste, la psychologie expérimentale du raisonnement, et, unifiant le tout, l'étude philosophique des fondements communs aux sciences cognitives et aux sciences sociales. »

Pour faire des portraits, Arcimboldo peignait des fruits, des fleurs, des légumes, astucieusement disposés sur ses toiles. Cette végétation luxuriante offrait-elle une représentation fidèle de la tête de ses modèles ? Espérons pour eux que non. Quant à la profusion ci-dessus de mots en -ique, en -isme et en -tique, on ne peut avoir, face à elle, que la même réaction : espérons pour Dan Sperber que l'image fleurie et joufflue ainsi donnée de son esprit n'est, elle non plus, pas un portrait fidèle.

Fais ce que je ne dis pas...

Au cours d'une société n'est plus darwinienne que les États-Unis, aucune n'a été si évidemment selon le processus de sélection par expérimentation et élimination constante des erreurs. En Amérique, les sociétés naissent et meurent aussi sûrement que les espèces animales. Les prédateurs éliminent les faibles. La société offre peu de garanties à l'individu entre le succès et l'extinction sociale. Le succès économique de l'Amérique s'explique par le fait que les États-Unis ont une approche darwinienne de la vie économique, alors que leurs rivaux européens excellent à considérer Darwin en tant que philosophe.

(Herald Tribune, 21-22 août 1999.)

Autorisons-nous un brin de psychanalyse sauvage : peut-être l'observation ci-dessus fournit-elle une piste aidant à comprendre pourquoi les États-Unis ont tendance à rejeter la théorie de l'évolution,

voire à interdire son enseignement. Serait-ce simplement que, miroir trop fidèle, elle refléterait une image trop déplaisante ?

Harnoo sur le Nobel

Que signifie le mot harnoo ? Pour vous aider à deviner, sachez que c'est la transcription d'un mot prononcé en anglais par un homme dont la langue maternelle était l'allemand. Vous ne trouvez pas ? Eh bien, dans la bouche d'Einstein, émigré aux États-Unis, harnoo était la façon dont il prononçait *hü* (achenu).

Cette histoire est racontée par l'Américain Ralph Boas. Parmi les nombreux scientifiques européens qui ont émigré ou séjourné aux États-Unis, Boas en a rencontré un seul (le mathématicien Lars Ahlfors) qui, en arrivant, ait eu le bon sens de se faire expliquer par un collègue américain comment on prononce dans sa langue les termes techniques. Les autres se sont contentés de leurs souvenirs scolaires. Autrement dit, ils parlaient une langue qu'ils ne savaient pas parler, puisque l'école n'enseigne pas la langue scientifique. Comme leurs interlocuteurs devaient bien les comprendre !

Dans doute Descartes se trompait-il lorsqu'il affirmait que le bon sens est la chose du monde la mieux partagée. Mais, après tout, partager le bon sens commun, ce n'est pas cela que nous attendons d'un scientifique hors du commun.

Six milliards de sabords...

Le six milliardième être humain devait naître le 16 juin 1999. La preuve : l'ONU avait retenu ce jour-là pour célébrer sa naissance. Mais l'ONU a reporté la célébration au 12 octobre. Les hommes auraient-ils soudainement ralenti leur rythme de reproduction ? Les démographes auraient-ils commis quelque stupide erreur de calcul ? Du tout. L'ONU a été contrainte à ce report pour cause de surcharge de travail en juin (Hervé Le Bras, *Libre arbitre et lois statistiques*, Editions de l'Épure, 1999).

Entre ces deux dates sont nés plus de trente millions d'êtres humains, note H. Le Bras. Ainsi, l'incertitude quand on annonce des chiffres de population mondiale est de l'ordre d'une demi-France. Vu de notre petit village, cela paraît beaucoup. Mais vu de l'ONU, brouillilles.

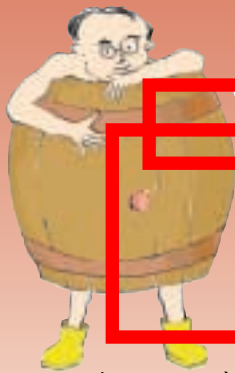
Trop c'est trop

Voici comment fut présentée Dan Sperber dans *Des idées qui viennent* (Odile Jacob 1999), ouvrage dont il est un des auteurs. « Après des études de sociologie et d'anthropologie, ses recherches ont porté sur la théorie anthropologique, l'ethnographie de l'Éthiopie

Pléthorique park

Au panarès des mystères scientifiques, la cause de la disparition des dinosaures occupe le numéro un. Non que les hypothèses manquent. Au contraire, il y en a trop. Seulement, aucune ne réussit à s'imposer. Les astronomes songent à une collision de la terre avec un astre errant. Les climatologues imaginent une variation mortelle de la température terrestre. Les évolutionnistes envisagent une inadéquation des dinosaures aux problèmes posés par l'émergence d'une nouvelle espèce. Les géologues s'attachent à...

Qu'y a-t-il de commun à ces explications en apparence disparates ? Ceci : chaque spécialiste est convaincu que la clé du mystère gît au sein de sa spécialité. Là, comme toujours, chacun veut être au centre du monde – ce centre du monde fût-il un anéantissement ! Tant que le savoir humain restera éclaté en spécialités rivales, nous n'aurons aucune chance de savoir pourquoi les dinosaures ont disparu.



JEU-CONCOURS N° 66

PIERRE TOLLU

HÉRITAGE DIOPHANTIE

Un vigneron possède 45 tonneaux de vin dont 9 sont pleins, 9 sont emplis aux trois quarts, 9 emplis à moitié, 9 emplis au quart et 9 vides. Il décide de donner son héritage à ses six enfants de façon équitable, mais sans transvasement et de telle sorte que chacun reçoive autant de vin et le même nombre de tonneaux, et que, de plus, chacun reçoive au moins un tonneau de chaque sorte et qu'il n'y ait pas deux qui reçoivent le même nombre de chaque sorte de tonneau. Pourriez-vous aider ce vigneron à faire ce partage en trou-

vant les trois répartitions fondamentales et différentes (c'est-à-dire aux permutations près entre ses enfants) possibles?

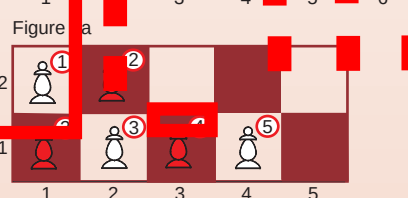
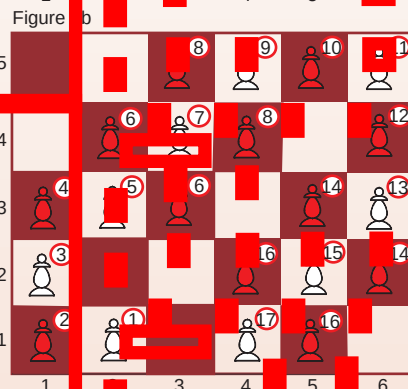
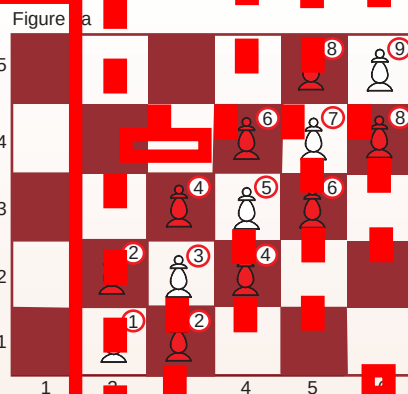
Envoyez vos réponses aux questions à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de décembre 1999, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 64

Commençons par le plus simple, le damier $n \times n$. Le premier joueur gagne en jouant sur une case quelconque des diagonales. En effet, quelle que soit la case jouée par le deuxième joueur, le premier peut toujours jouer sur une case diagonale contiguë et emmener son adversaire vers un coin du damier où celui-ci n'aura pas de case de sortie.

Sur le damier 5×6 , il y a plusieurs stratégies, gagnantes pour le premier joueur, toutes fondées sur la « diagonale infernale ». En voici une partant de la case 1×2 (ligne puis colonne) montrée sur les figures 1a et 1b. Les coups du premier joueur sont notés en gras par des nombres impairs, tandis que ceux du deuxième joueur sont notés par des nombres pairs (éventuellement doublés s'il y a deux coups équivalents). Remarquez que dans le cas 1a, l'adversaire entre d'emblée dans une « diagonale infernale » sur un sous-damier 5×5 et que s'il veut l'éviter (cas 1b), le premier joueur l'emmène sur une « diagonale infernale » sur un sous-damier 3×3 et c'est l'idée sous-jacente de toute stratégie sur un damier $n \times m$.

Pour le damier $1 \times n$, remarquons, d'une part, que si l'on numérote les coups à partir de 1, le premier joueur ne joue que des coups impairs et, d'autre part, que le joueur gagnant est celui jouant le dernier. Par conséquent, si $n = 2p + 1$, le premier joueur est assuré de gagner en jouant son premier coup sur la première case du damier (à droite ou à gauche), car le dernier coup jouable sera $2p + 1$. Si $n = 2p$, après le premier coup, le damier sera scindé en deux damiers $1 \times k$, $1 \times m$ avec $k + m = 2p - 1$ donc l'un des deux entiers k ou m sera impair et le deuxième joueur en jouant dans



ce damier impair gagnera en suivant la stratégie précédente.

En ce qui concerne le damier $2 \times n$, étudions le cas $n = 3p + 2$ où le premier joueur joue dans la case en haut et à gauche. Alors quel que soit le coup du deuxième joueur, le premier joueur peut atteindre la case 5 (voir figure 2a) et se retrouver au début d'un damier $2 \times (3p + 1) + 2$ et ainsi de suite jusqu'au damier 2×2 sur lequel il gagne. Si $n = 3p + 1$ ou $3p$, le premier joueur doit éviter de jouer sur une case laissant à droite ou à gauche un damier de la forme $2 \times 3k + 2$, auquel cas le deuxième joueur pourrait appliquer la stratégie précédente et gagner. Si $n = 3p$, le premier joueur peut toujours jouer sur une case laissant de part et d'autre des damiers $2 \times 2k + 1$ et $2 \times 2m + 1$ et forcer le deuxième joueur à lui laisser un damier $2 \times (3k - 1) = 2 \times (3k - 1) + 2$, comme le montre la figure 2b. Si $n = 3p + 1$, le premier joueur ne peut éviter de laisser un damier $2 \times 3k + 2$ en jouant sur une case laissant deux damiers $2 \times 3k$ et $2 \times 3m$, mais alors le deuxième joueur en jouant sur la case de la même couleur le force au coup suivant à laisser un damier $2 \times 3k - 1$ ou $2 \times 3m - 1$ sur lequel il gagne (comme premier joueur). En résumé, si $n = 3p + 1$, le deuxième joueur gagne et dans les autres cas c'est le premier joueur.

Plus généralement, il semble que sur un damier $2n \times 2n$, quelle que soit la case de départ, le premier joueur gagne. En revanche, sur un damier $2n + 1 \times 2n + 1$, les quatre cases adjacentes à la case centrale sont perdantes pour le premier joueur. Sur un damier $n \times m$ avec $n, m \geq 3$, il semble aussi que le premier a une stratégie gagnante, mais les cases de départ gagnantes sont moins nombreuses. Ainsi sur le damier 5×6 , seules 18 cases sur 30 sont gagnantes.

Casus Belli

On peut être tenté de provoquer la pluie sur tel ou tel pays défavorisé (voir *Pour la Science*, août 1999). Outre le fait que l'on n'a pas démontré que cela fonctionnait, on doit s'interroger sur la réaction des pays voisins qui verraient sûrement d'un mauvais œil disparaître des nuages dont ils auraient pu profiter. On introduirait là un nouveau *casus belli*, dont ces pays instables n'ont sûrement pas besoin.

Jean-Paul HERMANN, Massy

Le dobésilate

L'article «Pour prévenir les complications de la rétinopathie diabétique» (voir *Pour la Science*, septembre 1999) rapporte que des spécialistes réunis lors d'un symposium international à Genève ont clairement reconnu l'intérêt thérapeutique du dobésilate. Parallèlement, les experts de l'Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé ont classé le Doxium® parmi les médicaments «inutiles». Or, le principe actif du Doxium® est le dobésilate. Quelle explication donner à cette apparente discordance?

Pierre ALLAIN, Angers

Réponse de Gérard A. Normier

Doxium® (dobésilate de calcium) est un régulateur des fonctions des capillaires sanguins. Il est indiqué dans les micro-angiopathies (rétinopathie diabétique) et dans les manifestations cliniques de l'insuffisance veineuse chronique. Doxium® est enregistré et commercialisé en Europe depuis 1967. Il est vendu dans plus de 60 pays.

Plusieurs publications scientifiques ont montré l'efficacité clinique de Doxium®. Actuellement, et afin de moderniser le dossier d'enregistrement, de nouvelles études cliniques, effectuées selon les normes de bonnes pratiques cliniques et en double aveugle, sont en cours utilisant les techniques les plus modernes telles la fluorophotométrie et l'analyse de l'épaisseur de la rétine pour la rétinopathie diabétique. Une de ces études se déroule actuellement en Europe, incluant 600 patients, et avec un suivi de cinq ans.

Pour l'insuffisance veineuse chronique, une nouvelle étude européenne contrôlée sur 286 patients, fondée sur une méthodologie répondant aux derniers critères de qualité, vient de se terminer. L'analyse préliminaire confirme l'efficacité du Doxium® sur des paramètres objectifs.

Les experts de l'Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé, et selon l'article du *Monde* du 18 septembre 1999, ont défini la classe thérapeutique veinotonique (contenant 14 médicaments) comme médicaments «inutiles». Doxium®, faisant partie de cette classe thérapeutique, est actuellement sous évaluation auprès de l'Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé pour son Service médical rendu. La commission de la transparence n'a pas encore rendu les résultats.

Le symposium international à Genève, a traité le sujet «Pour prévenir les complications de la rétinopathie diabétique». Les experts, en majorité des ophtalmologistes, ont montré le rôle thérapeutique du Doxium® dans le ralentissement de l'évolution de la rétinopathie diabétique, une complication du diabète qui met l'acuité visuelle en danger et pour laquelle une alternative thérapeutique est quasi inexistante.

Gérard NORMIER, OM Pharma

Karl Marx

Dans notre dossier *Les mathématiques sociales*, au sein du premier article, la légende d'un encadré indiquait, à propos de Karl Marx, que l'application de ses théories avait abouti à un échec.

La formule «l'application de ses théories» dénote par rapport à la rigueur et la qualité de *Pour la Science*. Je suppose que l'auteur de l'article, qui a soigné son texte, n'en est pas responsable. J'imagine que la formulation utilisée résulte du manque de vigilance à l'égard d'une expression, «appliquer une théorie», malheureusement répandue, qui véhicule une conception vulgaire et fautive de ce qu'est une théorie, et, qui est facteur d'illusion sur le rôle et le pouvoir de l'activité théorique.

Une telle formulation doit heurter tout scientifique ou épistémologiste qui étudie une réalité d'un domaine de la réalité pour en déduire une théorie. En mathématiques, il existe une théorie des groupes. Elle énonce les propriétés des ensembles qui en vérifient les axiomes, mais «appliquer la théorie» des groupes à un ensemble n'a pas de sens. Un ensemble est un groupe ou non. S'il n'en est pas un, la théorie ne le transforme pas en groupe. Une théorie ne modifie pas la réalité.

Un théoricien cherche à élaborer une théorie de la réalité, en partant des données factuelles sélectionnées par une théorisation précédente devenue insatisfaisante. Je pense qu'une théorie est une représentation (modèle, interprétation, description, trans-

cription...). Le choix du terme exact est ouvert au débat épistémologique d'une réalité. Par conséquent, une construction intellectuelle qui ne représente pas une réalité existante, n'est pas une théorie puisqu'elle n'est pas une théorie d'une réalité.

Si on admet l'existence d'une réalité en soi, objective (c'est ce qu'on suppose en considérant qu'une théorie est communicable, même imparfaitement, d'un individu à l'autre), on admet que la réalité ne dépend pas de la théorie. Tenter de conformer de force la réalité à une théorie importée d'ailleurs, n'est pas respecter l'élaboration théorique. Vouloir construire la «réalité d'une théorie» c'est confondre théorie et projet. On réalise un projet, pas une théorie.

Mais Karl Marx n'a rien écrit qui soit un «projet de société (future)» et il s'est au contraire distingué des «socialistes utopiques». Il a seulement élaboré une théorie du «capital». On peut débattre de sa validité ou même de sa scientificité. On peut discuter de la validité d'une «théorie de la société (actuelle)», mais renverser, par chiasme, le génitif de cette formule, c'est abandonner le terrain de la théorie.

Réaliser un projet de société ou une réforme de société, suppose néanmoins de prendre en compte les données actuelles et les prévisions mises en forme par une théorie satisfaisante (pour ne pas tomber dans l'utopie). Mais cette prise en compte ne garantit pas une fidélité à cette théorie ni à sa méthode. La réalité obtenue doit elle aussi faire l'objet d'une théorie qui n'est pas écrite d'avance. Un projet est lui-même une réalité, le résultat d'une activité intellectuelle basée sur des données factuelles et des prévisions) dont on peut tenter la théorie. La méthode utilisée par Marx pour étudier le capitalisme peut évidemment être transposée pour tenter de théoriser d'autres sociétés, soit des antérieures ou sociétés contemporaines (incluant ou non une économie de marché), mais le résultat n'appartient pas à Marx puisqu'il n'a pas fait ou n'a pas pu faire cette élaboration. Rendons à Marx ce qui est à Marx et seulement ce qui est à Marx.

Pierre ROUSSAIE, Pau

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pouirlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pouirlascience.com.



Séisme en Turquie

MARIE-PAULE BOUIN • JEAN BERNARD DE CHABALIER

La part des scientifiques dans une responsabilité collective.

Des deux tremblements de terre très destructeurs (Turquie et Taiwan) qui se sont produits ces derniers mois, celui du 17 août dernier dans la région d'Izmit était le plus « attendu » par la communauté scientifique de spécialistes. Ce séisme s'inscrit dans une série de tremblements de terre qui rompent successivement la faille nord-anatolienne d'Est en Ouest depuis 60 ans. Chaque secousse a déclenché la suivante, en cascade, décrivant ainsi une séquence unique dans les annales selon un mécanisme bien compris. Un séisme résulte du relâchement soudain des contraintes accumulées sur un segment de faille, chaque séisme met sous contrainte les segments de faille adjacents qui n'ont pas encore rompu. Des travaux récents (1997 et 1998) de scientifiques turcs, américains et français, publiés dans des revues scientifiques internationales, avaient montré que, selon ce scénario, les failles traversant la région d'Izmit étaient des candidates idéales pour une rupture majeure à moyen terme. Ces failles avaient été bien cartographiées après des campagnes de terrain et l'analyse des images satellitaires; nous connaissions leur parcours et leur potentiel destructeur. Donc nous savions. Nous savions où, nous savions comment, mais nous ne savions pas quand...

En revanche, sur place, la population avait été maintenue dans un état d'ignorance totale. La prise de conscience fut brutale. Quinze jours après le séisme, une grande chaîne populaire turque organisait un débat télévisé réunissant sur un même plateau architectes, entrepreneurs, journalistes, médecins scientifiques et habitants de la région d'Izmit épargnés par le drame. Cette émission aurait pu tourner à l'émeute tant le décalage était grand entre, d'une part, le discours posé des acteurs de la vie publique qui essayaient de justifier leur attentisme, et d'autre part, la colère des survivants qui réalisaient qu'ils avaient été les seuls composants de la société à avoir ignoré l'inéluctabilité de ce drame. Ce paradoxe est intolérable; il met en évidence

les dysfonctionnements d'une société toute entière et pose le problème du rôle social de chacun dans la prévention des séismes. Où s'arrête la fonction des géophysiciens et leur responsabilité?

Ce séisme a constitué une véritable catastrophe, engendrant un traumatisme social et ravageant l'économie nationale. Plusieurs raisons, dont on a débattu, expliquent une telle situation: une région en développement économique très rapide, la spéculation immobilière en Turquie, le fait qu'il n'existe pas de contrôle des normes parasismiques des constructions récentes, ni de sanction, l'absence d'une volonté politique à préparer les populations.

La situation actuelle est la suivante: la ville d'Istanbul est menacée. Le séisme d'Izmit a mis sous tension les failles adjacentes, augmentant le risque de rupture, comme le montre le tremblement de terre du 12 novembre dernier. Or à l'Ouest, les segments de faille mis sous contrainte courent au fond de la mer de Marmara et certains passent à dix kilomètres au Sud de la ville. Ces segments n'ont pas rompu depuis le milieu du XVIII^e siècle; ils sont pris en étau entre la rupture d'Izmit à l'Est et celle de 1912 à l'Ouest de la mer de Marmara. Ceci place Istanbul dans une situation encore plus critique que Tokyo ou Los Angeles en termes de risque sismique: le séisme à venir bruchera le cycle sismique. L'étude des séquences historiques nous montre que la période d'occurrence des séismes le long de cette faille est de quelques mois à 30 ans. Mais si la population est maintenant convaincue de la nécessité d'une protection parasismique, il est actuellement impossible de discuter de la situation d'Istanbul sans créer de mouvements de panique.

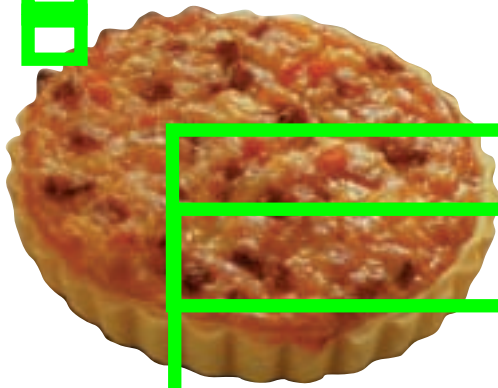
Pour sortir de cette impasse et avancer, l'état d'ignorance alimentant la terreur, il faut dès maintenant informer les populations. L'exposition au risque sismique doit être librement consentie: les citoyens doivent être responsabilisés

pour que le jeu des contre-pouvoirs démocratiques ne soit paralysé. Il n'y a pas d'alternative: le gouvernement turc doit reconnaître son rôle et s'engager dans un processus de réformes structurelles en matière de construction parasismique, de contrôle non seulement des constructions à venir mais aussi du bâti existant, d'information et de préparation de la population, de formation des professionnels des travaux publics.

Sur le terrain, l'engagement était pris par les autorités, les scientifiques trouvaient alors naturellement le cadre où ils pourraient remplir leurs rôles: leur rôle pédagogique, de l'éducation scolaire à la formation universitaire; leur rôle de chercheurs dans l'élaboration des cartes de risques et des normes parasismiques au côté des ingénieurs et techniciens. Quant au rôle social d'information, il passe nécessairement par l'intermédiaire des médias. Ce rôle est primordial pour permettre la diffusion de l'information scientifique auprès des citoyens, alimenter les débats, développer l'intelligence critique vitale pour assurer un bon fonctionnement de la société.

L'analyse a posteriori de beaucoup de catastrophes, au regard des connaissances scientifiques de l'époque, montre souvent que bien des drames auraient pu être évités si des mesures avaient été prises à temps. Ce constat est vrai aussi bien pour les catastrophes naturelles que pour celles de santé publique. Le rôle social des scientifiques est tributaire de la bonne volonté des intermédiaires institutionnels: policiers et priués, les géophysiciens turcs se sont heurtés à un mur d'indifférence au cours des dix dernières années. Puis le drame d'Izmit révéla les consciences de tous les acteurs de la vie publique pour que dès aujourd'hui se mettent en place les processus qui éviteront demain à Istanbul le sort d'Izmit.

Marie-Paule BOUIN et Jean-Bernard de CHABALIER sont sismologues à l'Institut de Physique du Globe de Paris.



Quiches, petits choux et pains à l'anis

HERVÉ THIS

Leur gonflement n'est qu'indirectement dû aux œufs qu'ils contiennent et la cuisson vaporise l'eau qui gonfle la pâte

La quiche ne doit pas trop cuire, sans quoi elle perd de sa tendreté ; elle n'est pas «chevelotte», disent les Lorrains. D'où la règle culinaire : on doit arrêter la cuisson quand on la quiche commence à gonfler. À gonfler ? Pourquoi ce gonflement ? Et pourquoi serait-il l'indication d'une juste cuisson ?

Pour répondre à la question, examinons un autre plat qui gonfle également : la quenelle. Qu'elle soit de poisson ou de viande, c'est généralement de la chair qu'on a malaxée avec de la crème, des œufs et une panade, c'est-à-dire une pâte obtenue en travaillant de la farine dans de l'eau bouillante. Une fois pochée, les quenelles sont mises dans une sauce et, dans les bons cas, elles gonflent, même quand les œufs n'ont pas été battus.

La quenelle et la quiche ont donc en commun la crème et les œufs : lequel des deux ingrédients est le responsable du gonflement ? Si la crème chauffée ne gonfle pas, l'examen des recettes de petits choux, composés de panade et d'œufs, montre que l'œuf est le dénominateur commun des plats qui gonflent. Certains chefs le savent : dès 1905, dans un *Manuel culinaire*, l'auteur (anonyme) écrivait que «les plats qui contiennent des œufs peuvent souffler».

Pourquoi cette vertu gonflante des œufs ? Des expériences de confection de quiches, avec diverses proportions de blancs, de jaunes, de crème ou de lard ne donnent pas la solution que procure un peu de réflexion : il n'existe aucune raison pour que des bulles d'air nais-

sent spontanément dans la pâte, mais ce dernier contient de l'eau (90 pour cent dans le blanc, 60 pour cent dans le jaune) qui peut être évaporée pendant la cuisson. D'ailleurs, toute personne qui a déjà observé la cuisson d'un œuf sur le plat a vu le blanc se soulever, poussé par de l'eau ou blanc qui était évaporée au contact de la poêle et piégée sous la couche coagulée.

Connaisant l'origine du gonflement, comment l'optimiser ? Si l'on chauffait un blanc d'œuf par le sommet, ce serait l'eau de la face supérieure qui serait évaporée et s'échapperait sans faire gonfler. En revanche, si l'on chauffe par le fond, comme qu'on fait un œuf sur le plat, on observe le gonflement précédemment décrit. On conclut ainsi que les produits qui sont censés gonfler doivent être chauffés par le fond. Un soufflé ? Posons-le sur la sole du four. Des macarons, des petits pains à l'anis ? Posons-les sur une plaque métallique. Des quenelles ? Évitions leur le gril et préférons-lui une plaque chauffée par le dessous...

Continuons sur la voie de l'optimisation : la cuisson du produit qui contient de l'œuf peut-il gonfler sous l'action de la seule vaporisation de l'eau ? Comme un blanc d'œuf pèse environ 30 grammes et qu'il contient donc environ 27 grammes d'eau, il peut engendrer un volume de vapeur supérieur à 30 litres ! Pourquoi alors les gonflements limités des soufflés, macarons, pains à l'anis, gougères, etc. ? Parce qu'une partie notable de la vapeur for-

mée par le produit est utilisée pour cuire le produit : un examen attentif de la cuisson de ces produits montre d'ailleurs que les bulles qui s'échappent. Pour obtenir un gonflement maximal, il faudrait d'abord confondre une couche supérieure imperméable à la vapeur.

Revenons à la quiche. Pourquoi son gonflement serait-il un indice de cuisson juste à point ? Le liquide coulé dans la pâte autour des lardons, est essentiellement composé de matière grasse, d'eau et de protéines. Or les protéines qui coagulent forment un gel et, en s'assemblant, elles établissent un réseau qui piège l'eau et la matière grasse. Plus l'eau est abondante, plus le gel est tendre (a contrario, une viande ou un poisson ou un œuf dont l'eau a été complètement évaporée sont des solides secs). Naturellement, l'évaporation de l'eau, si elle fait gonfler une quiche, révèle aussi le début de sa perte de tendreté. Le dicton lorrain a du bon.

Est-il suffisant ? Non, car le gonflement ne se produit que si l'on cuit la quiche en la chauffant par dessous. Nous devons donc corriger le dicton traditionnel : une quiche est cuite quand, chauffée par le fond, elle commence à gonfler.

Et c'est ainsi que la quiche est chevelotte.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 28 décembre 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Alban Gaillard

L'apocalypse? Pas pour cette fois

Les craintes que l'accélérateur en construction à Brookhaven engendre des particules destructrices sont infondées.

Après l'éclipse de la fin du monde et la station *Mir* qui menaçait de nous tomber sur la tête, les prévisions apocalyptiques à l'horizon de l'an 2000 fleurissent. L'une des dernières en date, la création par le collisionneur de Brookhaven d'un trou noir miniature ou d'une particule étrange qui dévorait la Terre, est reportée *sine die*. Une équipe de physiciens vient de le confirmer : il est impossible de créer de telles entités destructrices dans un collisionneur à ions.

Tout a commencé par une interrogation. Y avait-il un risque, même infime, que la Terre disparaisse, dévorée par une particule qui n'y a encore jamais existé ? Le nouvel accélérateur fera entrer en collision des noyaux d'or à des énergies jamais atteintes auparavant. Les physiciens espèrent que ces collisions de très haute énergie recréeront, durant un court instant, le plasma de quarks et de gluons qui emplissait l'Univers à ses débuts. Plusieurs personnes se sont interrogées sur la possibilité que ces événements engendrent un trou noir miniature qui tomberait au centre de la Terre et dévorerait notre pla-

nète en quelques minutes. L'angoisse d'une apocalypse se répandit comme une traînée de poudre sur le réseau *Internet* et des titres alarmants firent la une de plusieurs journaux. L'inquiétude n'est pas nouvelle : lors de l'explosion de la bombe atomique à Los Alamos, en 1945, les physiciens avaient craint que l'atmosphère de la Terre ne s'embrase.

Les physiciens répondaient que les conditions qui régneraient au moment des collisions seraient inférieures à celles indispensables à la formation d'un trou noir, et ce beaucoup : pour qu'un trou noir soit créé, une densité 10^{60} fois supérieure à celle qui sera produite serait nécessaire. Toutefois, un autre scénario catastrophe était plus connu et relayé : ces collisions auraient pu engendrer une nouvelle forme de matière, une boule de quarks étrange nommée « strangelets ». Ce regroupement contiendrait les trois espèces de quarks, les quarks *haut* et *bas*, présents dans les protons et dans les neutrons, et des quarks *étrange* plus rares, que l'on trouve dans les particules à courte durée de vie, tels les kaons.

Les physiciens n'ont jamais observé de telles boules de quarks, de sorte que leur propriétés ne peuvent être que déduites des théories. L'éventualité la plus alarmante serait la création d'une boule étrange de grande durée de vie et de charge négative. Ce type de boule de quarks n'agirait pas comme une particule négative ordinaire : rapidement, elle grossirait, avalant tous les noyaux atomiques (chargés positivement) qui

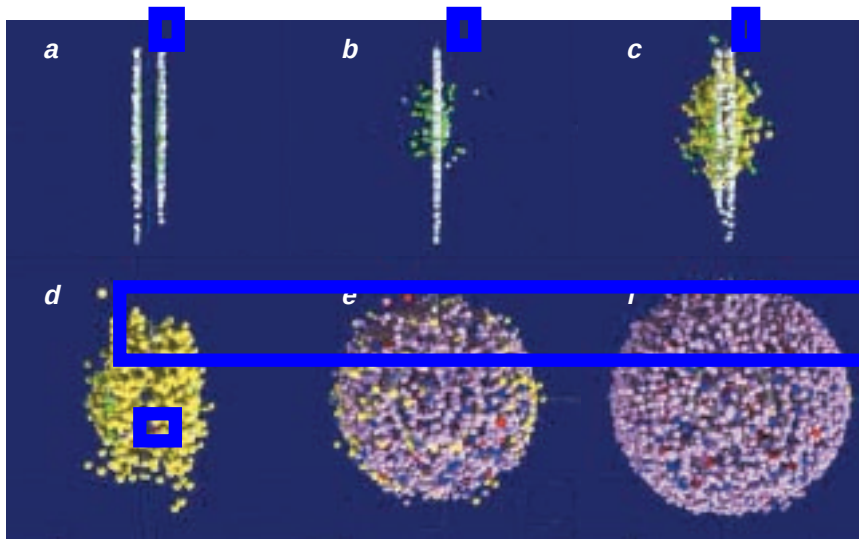
passeraient à sa portée. En quelques minutes, la Terre serait oblitérée aussi sûrement que par un trou noir, transformée en photons.

John Marburger, directeur du laboratoire de Brookhaven, certifiait qu'il n'y avait aucun risque que les expériences conduisent à un tel désastre et, pour faire taire les rumeurs de mauvais augure, il chargea un groupe de physiciens d'étudier la question. Leur conclusion est rassurante. Selon Robert Jaffe, de l'Institut de technologie du Massachusetts, les boules de particules *étrange* ne peuvent être créées qu'à très haute pression et très basse température, conditions impossibles à reproduire à l'aide d'un collisionneur. Le seul endroit connu où règnent de telles conditions est le centre des étoiles à neutrons.

Même si le collisionneur créait une boule de quarks *étrange*, elle se désintégrerait avant d'avoir pu approcher un noyau. De surcroît, en admettant qu'une boule de quarks *étrange* de grande durée de vie puisse être créée, les physiciens ont déterminé qu'elle contiendrait bien plus de quarks *haut* et de quarks *bas*, de charge positive, que de quarks *étrange*, de charge négative. Ainsi, la particule résultante serait de charge positive, donc inoffensive. Elle attirerait simplement une paire d'électrons et se comporterait comme un isotope lourd de l'hélium.

Si cet argument ne suffit pas à vous rassurer, faites le raisonnement suivant : les collisions de noyaux, analogues à celles prévues dans le collisionneur, se produisent fréquemment dans l'espace. Malgré la rareté de l'or dans le milieu interstellaire, il y a chaque année, dans chaque année-lumière cube de notre Galaxie, un milliard d'impacts de haute énergie entre noyaux d'or. Ces impacts engendrent des boules de quarks *étrange* chargées négativement, certaines de ces particules dangereuses seraient suffisamment près d'étoiles pour causer leur perte. Dans notre galaxie, ce mécanisme engendrerait près d'un million de supernovae par an, alors que les astronomes n'en ont détectés qu'une poignée au cours du dernier millénaire.

Fortes de ces conclusions, les responsables de Brookhaven prévoient la première collision de noyaux d'or avant la fin de l'année. Cette frénésie eschatologique résulte d'une idée fautive très répandue : les physiciens ne jouent pas avec la structure de l'Univers, mais reproduisent des phénomènes qui y ont lieu.



Simulation de la collision d'ions lourds. Deux noyaux d'or, aplatis par les effets relativistes, se dirigent l'un vers l'autre (a), se rencontrent (b), et se traversent (c, d). L'impact crée un plasma de quarks et de gluons (e, f).

La mémoire en photos

Pour la première fois, on a photographié les changements qu'engendre l'apprentissage dans le cerveau

Comment les souvenirs se forment-ils ? L'apprentissage modifie-t-il les connexions entre les neurones ? Comment peut-on observer le fonctionnement du cerveau ? Certaines hypothèses semblent confortées par l'expérience, mais les preuves sont souvent ténues. En réalisant à photographier les modifications qui surviennent dans un cerveau de rat lors du déclenchement artificiel des mécanismes de mémorisation, l'équipe de Dominique Muller, du département de neuropharmacologie de l'Université de Genève, a confirmé que les souvenirs se forment grâce à des modifications morphologiques du réseau de neurones.

On sait que les connexions (ou synapses) entre les neurones cérébraux d'un rat élevé dans un environnement stimulant sont notablement plus nombreuses que chez un rat élevé dans un environnement pauvre. Par ailleurs, dans l'hippocampe d'un animal (une structure cérébrale essentielle pour la mémoire), une brève stimulation répétée d'une voie nerveuse modifie le fonctionnement des synapses activées. L'efficacité de la transmission des signaux par ces synapses augmente de façon stable et durable, de sorte que les neurones réagissent davantage à toute activation ultérieure par ces mêmes voies nerveuses. Cet effet, nommé potentialisation à long terme, est une manifestation

de la plasticité cérébrale et un des mécanismes possibles mis en jeu au cours de l'apprentissage et de la mémorisation. Toutefois, si l'on supposait que les synapses se modifient lors de la potentialisation à long terme, que certaines d'entre elles subissent un renforcement qui correspond à une augmentation de leur efficacité, on n'en avait pas la preuve.

Un cerveau humain contient quelque 100 milliards de neurones, et chacun d'eux établit environ 10 000 connexions avec d'autres neurones. Comment trouver, dans cette forêt de synapses, celles qui changent au cours de l'apprentissage ? L'équipe genevoise a soumis un hippocampe de rat, placé dans un milieu de culture qui le maintient vivant, à des stimulations électriques qui déclenchent la potentialisation à long terme. Après quoi, Nicolas Toni, D. Muller et leurs collègues ont fait une cinquantaine de tranches minces (40 nanomètres d'épaisseur) de cet hippocampe. Ils ont observé les coupes au microscope électronique après les avoir traitées par une substance qui fait précipiter le calcium. Or, c'est dans les synapses activées, et dans les synapses actives. Quand, au microscope électronique, on observe une zone où le calcium est plus dense, on déduit que la synapse a été activée. Après avoir collecté les images des coupes de l'hippocampe, les biologistes ont utilisé un programme de reconstruction des images en trois dimensions et obtenu les images de synapses activées.

Sur ces images, une synapse apparaît comme la zone de contact entre la terminaison présynaptique (le neurone présynaptique, en rouge sur l'illustration, transmet les signaux au neurone postsynaptique, en gris) et une excroissance sur une dendrite (une ramification) du neurone postsynaptique. Lorsque la synapse a été activée, on constate qu'une

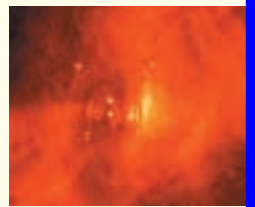
BRÈVES

Un dinosaure en Afrique

Quel animal auriez-vous pu rencontrer il y a 155 millions d'années pendant une promenade au Nord du Niger ? Selon l'équipe de Didier Dutheil, du Muséum national d'histoire naturelle, et de Bouraimou Moussa, du CNRS, des troupeaux de sauropodes (des dinosaures tétrapodes au long cou et herbivores) d'une espèce récemment identifiée, nommée *Juraria tiguidensis*, parcouraient les plaines arides de cette région, au début du Crétacé. Ces animaux avaient des dents en forme de spatules et se nourrissaient des feuilles et des petites branches de la cime des arbres. Cette découverte bouscule l'histoire admise de sauropodes africains : les paléontologues pensaient que les sauropodes à dents spatulées s'étaient éteints il y a 155 millions d'années.

Accélération subite

Les étoiles à neutrons, cadavres d'étoiles massives qui ont explosé, parsèment notre Galaxie. Leur émission radio, régulière comme une horloge, reflète la vitesse de rotation uniforme de ces astres denses. Pourtant, de temps à autre, les tic-tac réguliers de l'horloge s'accroissent, comme si l'étoile à neutrons tournait plus vite. Ces accélérations correspondent à des moments où l'étoile a subi une déformation.

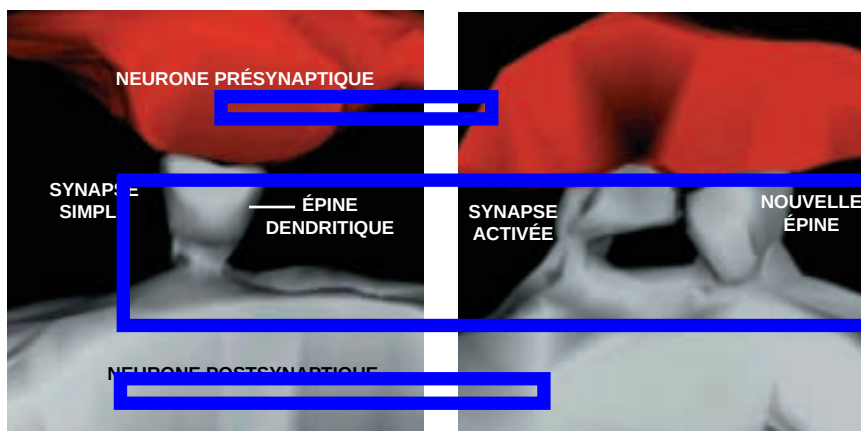


En analysant la distribution statistique de ces « sursauts » sur le pulsar Véla, des astrophysiciens américains déduisent la portion de la croûte qui glisse et diverses caractéristiques de l'étoile à neutrons, dont son diamètre. A-t-on trouvé un moyen original de sonder ces astres étranges ?

La grossesse améliore la mémoire ?

La grossesse s'accompagne de modifications hormonales ; or les hormones agissent sur le cerveau.

On s'interroge : le comportement change-t-il au cours de la grossesse ? Des psychologues de l'Université de Richmond ont testé des rates qui devaient se déplacer dans des labyrinthes. Leur intuition s'est trouvée confirmée : les rates qui portent des jeunes ont une meilleure mémoire et de meilleures capacités d'apprentissage que des rates témoins.



L'image d'une synapse a été obtenue par la reconstruction tridimensionnelle d'une série d'images de coupes ultraminces, réalisées au microscope électronique. Lorsque la synapse n'est pas activée, la connexion entre le neurone présynaptique, où arrive l'influx nerveux, et le neurone postsynaptique n'est constituée que d'une unique épine (une sorte de ventouse). Quand la synapse est activée, une deuxième épine « pousse », ce qui renforce l'efficacité de la transmission du signal incident.

Terminés les rhumes?

Une équipe du laboratoire de Brookhaven a peut-être posé les bases d'un futur traitement du rhume. Après avoir isolé la protéine par laquelle les adénovirus (un type de virus responsables de rhumes) se lient aux cellules pour les infecter et la

protéine cellulaire sur laquelle ils s'accrochent, les biologistes les ont mises ensemble dans un tube à essais. Elles forment un complexe stable qui cristallise: les physiciens ont

synchrotron de Brookhaven. Cette étude a révélé les points d'ancrage spécifiques de ces protéines. Il ne reste plus qu'à trouver des molécules qui se glisseraient au cœur de ces sites d'attachement, empêchant la fixation des virus sur leurs cibles. Finis le nez bouché et les éternuements?

Le son du soliton

Depuis une trentaine d'années, les physiciens étudient les solitons, des ondes qui se déplacent sans distorsion et qui transportent l'information, notamment dans les fibres optiques. La production de soliton acoustiques semblait plus difficile que celle des solitons de lumière, car les propriétés de propagation des ondes se prêtent mal à la formation de solitons. Pourtant, en branchant une centaine de petits tuyaux sur un tuyau plus gros, une équipe de physiciens japonais vient de créer le premier soliton acoustique dans le gros tuyau. Un dispositif du même type éviterait les ondes de choc produites lorsqu'un train pénètre à grande vitesse dans un tunnel.

Un robot antifeu

Après la catastrophe du tunnel du Mont Blanc qui a fait 41 victimes, Domenico Piatti et ses collègues de Naples ont conçu et breveté un robot cylindrique qui se déplacerait sur un rail fixé au plafond, à un mètre sous le plafond. En cas d'incendie, le robot se brancherait sur l'une des bouches d'incendie prévues sur une canalisation à l'intérieur du tunnel. Le jet d'eau dirigé sur la base du feu projetterait 3 000 litres d'eau sous pression par minute (les dispositifs usuels des pompiers en jettent environ 500 litres par minute). La carapace multicouche du robot résisterait à des températures de 1 000 °C. Contrôlé de l'extérieur, le robot se déplacerait à 50 kilomètres par heure.

épine dendritique a poussé (la synapse s'est dédoublée) établissant un deuxième contact entre les deux neurones. C'est la première démonstration que le renforcement synaptique peut être associé à la création d'une nouvelle synapse.

Les épines dendritiques portent les récepteurs des neuromédiateurs synthétisés par les neurones; quand une synapse se dédouble, le neuromédiateur est libéré par le neurone présynaptique en deux endroits (au lieu d'un), et le neurone postsynaptique reçoit ainsi un signal double: l'efficacité de la transmission des signaux, entre les deux neurones est renforcée.

Ce dédoublement observé correspond-il effectivement au renforcement synaptique lié à la potentialisation à long terme?

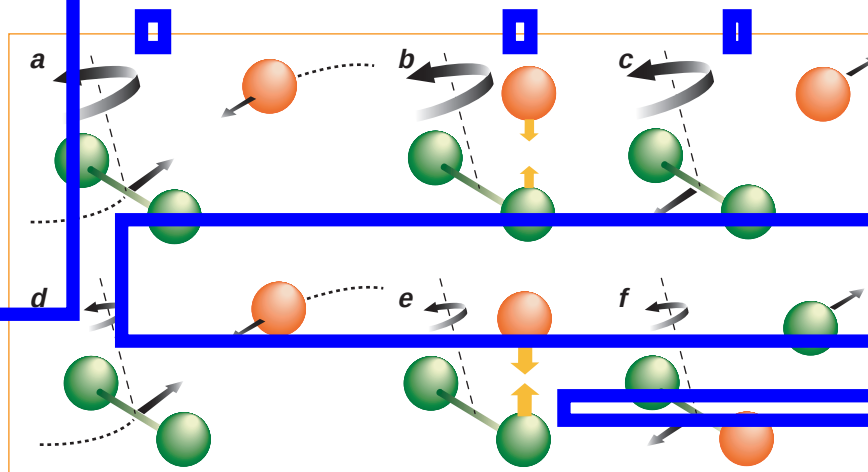
Oui, car si l'on bloque la potentialisation à long terme par des substances pharmacologiques, on empêche le dédoublement des épines dendritiques. Certaines molécules semblent intervenir dans ces modifications synaptiques. Ainsi, l'enzyme calcineurine 2 semble jouer un rôle important, car elle phosphoryle les récepteurs AMPA du glutamate: en ajoutant des groupes phosphate à ces récepteurs, elle favorise l'entrée d'ions dans le neurone postsynaptique. Pour le moment la longue chaîne qui relie l'apprentissage aux modifications morphologiques et fonctionnelles des liaisons neuronales ne comporte que quelques maillons, mais désormais une hypothèse est validée: la stimulation des neurones engendre la formation de nouvelles synapses.

Énigmatique chimie interstellaire

Dans l'espace, les réactions chimiques se déroulent plus vite à basse qu'à haute température!

L'espace profond vide de l'espace recèle une étonnante diversité: des ions, des radicaux libres, des chaînes carbonées. En tout, plus d'une centaine d'espèces chimiques y évoluent dans des conditions physiques extrêmes. Ces molécules sont au sein de nuages interstellaires géants où les densités et les températures sont faibles: environ un milliard de molécules par centimètre cube, une densité analogue à celle des vides poussés que l'on fait sur Terre), et une dizaine de kelvins. En raison de

ces conditions inhabituelles, les réactions chimiques qui s'y produisent sont essentiellement des réactions à deux corps, et l'énergie disponible lors des collisions est très faible. Aussi, les réactions chimiques qui possèdent une barrière d'activation, c'est-à-dire qui se déclenchent au-delà d'un seuil d'énergie, infarmissable à basse température, sont «gelées». De ce fait, jusqu'à récemment, seuls les systèmes faisant intervenir les espèces chargées (des ions) semblaient participer efficacement à la formation des molécules interstellaires: les réactions entre ions ne possèdent généralement pas de barrière d'activation, car l'énergie d'interaction à longue portée entre ces espèces est supérieure au seuil d'énergie d'activation. Par ailleurs, les ions sont abondants dans le milieu interstellaire, produits en permanence par le rayonnement cosmique ambiant.



Lors de la première étape d'une réaction entre une molécule et un atome (a), les forces électrostatiques à longue portée rapprochent les réactifs. Ensuite, le complexe de réaction se forme (b). À haute température (a à c), la rotation rapide du radical empêche les forces chimiques d'orientation (flèches orange) d'agir et la réaction ne se produit pas. À basse température (d à f), la rotation est plus lente: les forces d'orientation dominent et la réaction a lieu.

Toutefois, depuis 1992, des expériences de cinétique chimique en laboratoire ont montré qu'à l'instar des réactions chimiques, certaines réactions entre espèces neutres sont extrêmement rapides aux températures interstellaires. Ces réactions, qui font intervenir des radicaux libres – des espèces chimiques dont au moins un électron n'est pas apparié – contredisent la loi d'Arrhenius selon laquelle la vitesse de réaction augmente avec la température. Quel mécanisme conduit à ce comportement insolite ?

En l'absence de barrière d'activation, le mécanisme de réaction opère en deux temps : d'abord l'approche des réactifs, qui, à basse température, dépend des forces intermoléculaires à longue portée, essentiellement d'origine électrostatique ; ensuite, la formation et l'évolution des molécules formées par les deux réactifs (le complexe de réaction), à plus courte distance. La première

étape correspond à une « capture » : on suppose qu'une fois que les réactifs sont suffisamment proches, la réaction se produit. Les théories fondées sur cette approximation expliquent les réactions ioniques, mais ne justifient pas l'augmentation de la réactivité des espèces neutres à basse température : la formation et l'évolution du complexe de réaction jouent probablement un rôle clef dans la chimie des espèces neutres, mais lequel ?

À l'issue de la capture, la réaction ne se produit que si les atomes sont correctement agencés les uns par rapport aux autres. Pour le vérifier, nous avons modélisé la réaction $CN + C$ donne $CX + N$, où C représente un atome de carbone, N un atome d'azote et X n'importe quel autre atome (CN est un radical abondant dans le milieu interstellaire).

À partir d'un traitement classique du mouvement des atomes (en négligeant les effets purement quantiques), nous avons montré qu'avec l'élévation de la température, la rotation des réactifs peut les empêcher de réagir, car elle s'oppose aux forces d'orientation qui résultent des échanges et des transferts de charge des nuages électroniques des réactifs lorsqu'ils s'interpénètrent. À basse température, la réaction tourne même vite soit plus sensibles à ces forces, et leur chance de s'engager favorablement pour qu'une réaction se produise augmente. Ce mécanisme de sélectivité rotationnelle expliquerait pourquoi, dans le cas de certains systèmes chimiques, les basses températures favorisent la réactivité. Cette idée pourrait-elle être exploitée en chimie industrielle ?

Alexandre FAURE et Pierre VALIRON
Observatoire de Grenoble

Retard mental

Des anomalies d'un gène codant une protéine du système immunitaire sont responsables de déficits cognitifs graves.

Pprès de trois pour cent des enfants souffrent de retard mental et, dans près de la moitié des cas graves, l'origine du trouble est génétique.

Les garçons étant plus souvent atteints que les filles, des gènes situés sur le chromosome X semblent participer au retard mental : les garçons n'ayant qu'un seul chromosome X, quand un gène de ce chromosome est anormal, il n'existe pas de copie de « secours » (tandis qu'il en existe une chez les filles). Cinq gènes responsables de retards mentaux (sans aucun autre symptôme) ont été identifiés.

Alain Corré et ses collègues de l'équipe de Jamel Chelly, à l'Unité INSERM 129, ont découvert un nouveau gène qui agit sur l'élaboration des fonctions cognitives. Chez les enfants atteints de retard mental qui ont été étudiés par cette équipe, le gène découvert est localisé sur le chromosome X et code une protéine nommée IL1RAPL. Cette protéine ressemble beaucoup à une protéine qui participe aux défenses immunitaires, la protéine accessoire du récepteur de l'interleukine 1.

En observant des cerveaux de souris adultes, l'équipe de J. Chelly a montré que cette protéine est spécifiquement exprimée dans des territoires cérébraux précis qui participent à la mémoire et à l'apprentissage : l'hippocampe et le cortex perceptif, notamment le bulbe olfactif. L'expression

intense de la protéine IL1RAPL dans le bulbe olfactif des souris tient sans doute au fait que la perception olfactive a joué un rôle considérable dans l'évolution du comportement des petits mammifères. L'hippocampe est essentielle aux mécanismes mnésiques et une altération de la mémoire perturbe nécessairement l'acquisition des fonctions cognitives.

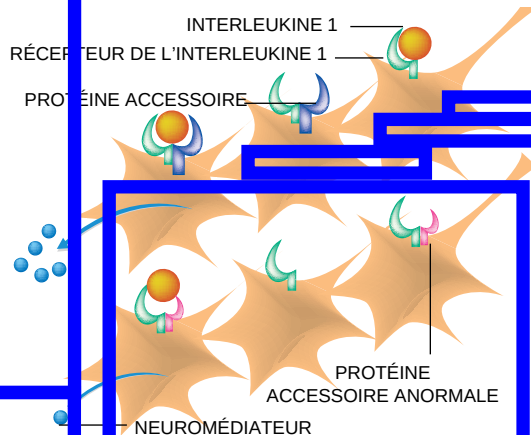
Quel est le rôle de la protéine accessoire du récepteur de l'interleukine 1 ? L'interleukine 1 n'a qu'une faible affinité pour son récepteur. En revanche, il suffit que la protéine accessoire du récepteur de l'interleukine 1 se lie à ce récepteur, pour que l'interleukine 1 s'ancre fermement sur ce complexe membranaire. Dès qu'a lieu cette liaison, elle déclenche une cascade de signaux et, notamment, la libération de substances qui commandent l'expression de nombreux gènes dont les produits interviennent dans les mécanismes de l'inflammation.

Par ailleurs, on a montré que, dans certains cas, les cytokines (la famille à laquelle appartient l'interleukine 1) auraient un effet sur de multiples fonctions neurobiologiques. Par exemple, l'interleukine 1 interviendrait dans la régulation des mécanismes d'apprentissage et des mécanismes mnésiques en modulant l'activité des neurones de l'hippocampe. Elle agirait sur ces neurones en régulant la libération de certains neuromédiateurs. Quand la protéine IL1RAPL est anormale, voire absente, la libération de neuromédiateurs qui agissent sur la structure et sur la plasticité des synapses serait inhibée.

Ainsi, la protéine découverte, qui est responsable de retards mentaux, interviendrait dans la voie de signalisation de

l'interleukine 1, au même titre que la protéine accessoire du récepteur de l'interleukine 1, ou dans une autre voie de signalisation impliquant une autre interleukine (puisque la nouvelle protéine et la protéine accessoire de l'interleukine 1 ne sont pas strictement identiques).

On connaissait le rôle de défense du système immunitaire : on savait que son efficacité diminue en cas de stress répété ; on vient d'en découvrir une nouvelle facette. Certains constituants du système immunitaire pourraient jouer un rôle de tout premier plan dans l'acquisition de fonctions cognitives.



L'interleukine 1 a une faible affinité pour son récepteur. Toutefois, cette affinité augmente notablement quand la protéine accessoire du récepteur de l'interleukine se fixe sur ce récepteur. L'interleukine se lie alors solidement à son récepteur. Quand la liaison a lieu sur un neurone, la fixation déclenche la libération de neuromédiateurs. La protéine découverte agit peut-être comme la protéine accessoire du récepteur de l'interleukine 1. Quand elle est anormale, voire absente, des déficits cognitifs graves se produisent.

La montée du célibat

Au début du XX^e siècle et jusqu'en 1940, 81 pour cent des Américaines de 35 à 44 ans étaient mariées. Après le baby-boom, cette proportion a encore augmenté, mais ensuite, elle n'a cessé de diminuer : en 1998, elle était de 67 pour cent, aux États-Unis, et de 70 pour cent en France. Dans les autres pays occidentaux, on observe la même diminution, sauf en Pologne et en Roumanie.

Divers facteurs expliquent cette évolution : on vit en couple et on a des enfants sans être marié. L'âge auquel on se marie augmente, les divorces sont de plus en plus fréquents. Aujourd'hui, le concubinage n'est plus réprouvé par la société, l'on craint que le mariage n'apporte pas toutes les satisfactions espérées. Un autre facteur peut expliquer pourquoi les femmes restent célibataires : dans de nombreux pays industrialisés, elles poursuivent leurs études de plus en plus longtemps, ce qui les incite sans doute à repousser leur mariage.

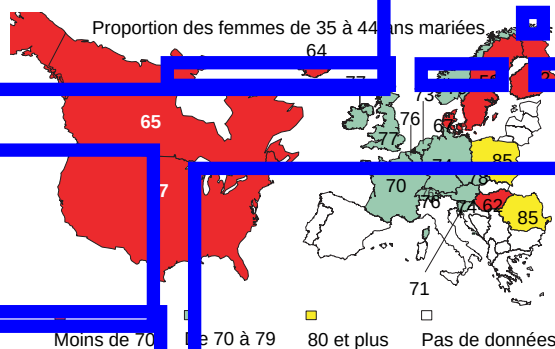
Le nombre actuel de divorces est largement supérieur à celui de 1970, probablement parce que les femmes ont acquis une indépendance financière qui leur permet de se séparer sans souci matériel : dans la plupart

des pays occidentaux, plus les femmes salariées sont nombreuses, plus il y a de divorces. L'accès à la pilule contraceptive et la légalisation de l'avortement ont entraîné une évolution du mariage.

En 1960, une femme enceinte sans être mariée et le père de l'enfant à naître se sentait obligé de l'épouser. Ces mariages contractés sous contrainte, les femmes ayant théoriquement moyen d'éviter les grossesses non désirées. Pourtant, la proportion des naissances hors mariage n'a cessé d'augmenter. Aux États-Unis, seulement 5 pour cent des mères de jeunes enfants de race blanche étaient célibataires en 1964, aujourd'hui 26 pour cent ; chez les femmes noires, cette proportion est passée de 35 à 69 pour cent.

De nombreuses études montrent que les répercussions négatives des divorces sont plus fortes chez les mineurs, mais qu'elles se manifestent plutôt à l'âge adulte.

Après une étude américaine, ce sont les hommes qui pâtiraient le plus du déclin du mariage : les célibataires trouveraient du travail moins facilement que les hommes mariés et ils seraient moins bien rémunérés.



Magiques les noyaux ?

Le nickel 48, dernier des noyaux atomiques doublement magiques, a été détecté.

De même que la répartition des électrons en couches autour du noyau détermine les propriétés chimiques des éléments, la répartition en couches des protons et des neutrons du noyau atomique en couches fixe les propriétés des noyaux.

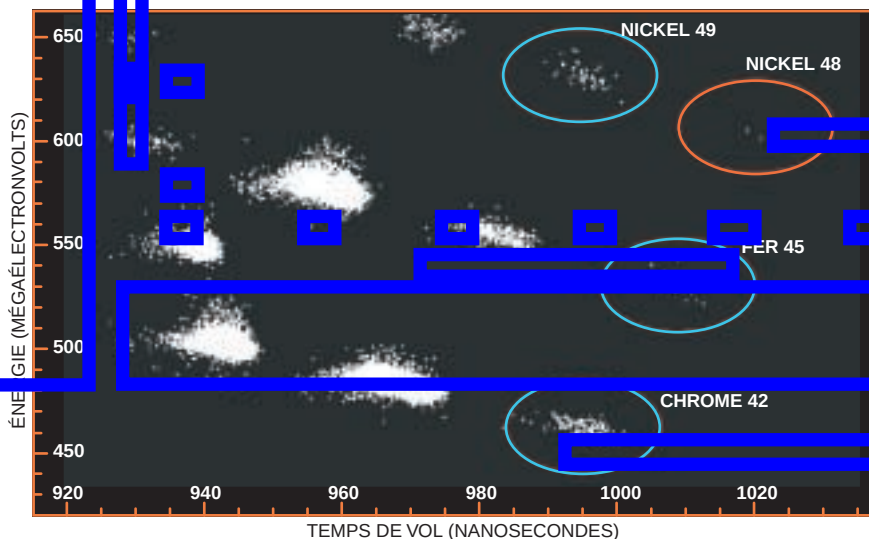
Remplissons les couches des noyaux en ajoutant des protons et des neutrons un à un. Lorsqu'une couche est entièrement remplie, c'est-à-dire qu'elle contient un nombre déterminé de protons et de neutrons, le noyau est particulièrement stable. Ces nombres (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 selon la couche concernée), découverts dans les années 1940 et justifiés théoriquement en 1949 par le modèle nucléaire en couches, sont les nombres magiques.

À la différence des couches atomiques, remplies uniquement d'électrons, deux types de particules interviennent dans le cas des noyaux : le noyau peut avoir un nombre magique de neutrons et/ou de protons. Un noyau où les protons et les neutrons remplissent complètement la couche externe est dit doublement magique. Parmi les quelque 2 500 noyaux stables ou radio-

actifs déjà observés, seuls neuf ont cette structure doublement magique. Avec ses 28 protons et ses 20 neutrons, le nickel 48 est le dixième de cette liste, et probablement le dernier (si l'on excepte les noyaux super lourds pour lesquels les nombres magiques ne sont pas connus).

La cohésion des noyaux résulte d'un équilibre subtil entre la répulsion élec-

trostatique des protons et les forces de cohésion nucléaire entre tous les nucléons (l'interaction nucléaire forte). C'est le fait d'être doublement magique, le nickel 48 a également la particularité d'être à l'extrême limite d'existence pour un noyau : son nombre de protons étant bien supérieur à son nombre de neutrons, les forces de répulsion l'emportent sur



En mesurant l'énergie et le temps de vol (le temps mis pour atteindre les détecteurs) des noyaux produits lors du bombardement d'une cible de nickel par un intense faisceau d'ions, on différencie leur nature. Outre les deux noyaux de nickel 48 (dans le cercle rouge), d'autres isotopes, légèrement moins exotiques, mais peu étudiés, ont également été identifiés (cercles bleus).

celle de cohésion. C'est un noyau exotique. Au-delà de cette limite d'existence, un noyau se désintègre par émission spontanée de particules (protons ou neutrons excédentaires). Tous les modèles utilisés, qui calculent les énergies de liaison des noyaux pour rendre compte de leur cohésion, prédisent que le noyau de nickel 48 est déjà au-delà de ces limites : il devrait se désintégrer rapidement et échapper à l'observation.

Curieusement, le fait que ce noyau existe résulterait de la force de répulsion électrostatique. Cette force, or, pour le système nucléaire, une barrière de potentiel qui tend à confiner les protons, chargés positivement, à l'intérieur du noyau. Plus il y a de protons, plus la barrière est importante. Avant que le noyau se désintègre en émettant des particules, les protons doivent franchir cette barrière. C'est probablement grâce à cet effet que nous avons observé ce noyau.

En septembre 1999, au Grand accélérateur national d'ions lourds (GSI) de Caen, avec une équipe internationale de physiciens, nous avons violemment bombardé une cible de nickel naturel avec un intense faisceau de nickel 58 (mille milliards d'ions par seconde à 120 000 kilomètres par seconde). Les noyaux produits par fragmentation des ions projectiles sont triés et finalement interceptés dans une succession de détecteurs.

Après dix jours d'expérience en continu, nous avons décelé deux noyaux de nickel 48. Le dispositif expérimental, bien qu'optimisé pour la détection du nickel 48, a également permis l'observation d'autres noyaux exotiques, très déficients en neutrons, au voisinage du nickel 48 : environ 90 noyaux de nickel 49, 40 noyaux de fer 45 et 250 noyaux de chrome 42 ont ainsi été identifiés. Cette observation confirme les résultats d'une expérience menée il y a trois ans sur l'accélérateur de Darmstadt, où ces noyaux avaient été observés pour la première fois aux nombres de 5, 3 et 12 respectivement.

Selon les résultats des mesures, la limite inférieure de la durée de vie du nickel 48 est d'environ 500 nanosecondes (500 milliardièmes de seconde). Cette durée correspond à peu près au temps que mettent les ions secondaires produits dans la cible pour parcourir la distance où les sépare des détecteurs. Ce résultat semble contredire les prédictions de plusieurs modèles nucléaires. Très efficaces pour décrire les noyaux classiques, ces modèles échouent pour les noyaux exotiques. Cependant, un si petit nombre de noyaux nickel 48 observés est encore insuffisant pour une révision des modèles nucléaires.

B. BLANK, M. CHARTIER, J. GIOVINAZZO,
CEN de Bordeaux-Gradignan



LA REINE ROUGE

BD garantie avec OGM

Le Guéré C.V., Chupeau Y.,
Le Guyader H., Legrand P.

Écologie. Été 2022.

Pourquoi a-t-on voulu faire disparaître le Professeur Lautrec ? Enquête de routine pour le commissaire MacLeek ? Non ! Il ne s'attendait pas à en apprendre autant sur les Organismes Génétiquement Modifiés.



1999, 40 p., 79 F



1999, 210 p., 295 F

LA TRUFFE, LA TERRE, LA VIE

Callot G., coord.

La production de truffières sauvages, comme celle des truffières implantées, a considérablement diminué depuis le début du siècle. A partir d'observations de terrain et d'études de laboratoire, les auteurs de cet ouvrage abondamment illustré montrent que ce phénomène est lié à la dégradation biologique du milieu et en particulier à la disparition progressive de la faune du sol, indispensable pour décompacter et aérer le sol.

LE CAVIAR

Stein V., Doré I., traduit par Bonhomme T.

Rare et mythique, le caviar est un produit de luxe dont la consommation et la fabrication se développent dans le monde entier. Pêche, traitement, qualité, étiquetage et emballage, stockage, conservation, préparation culinaire, tous les éléments techniques d'un précieux savoir-faire sont ici exposés clairement et en détail. Munis de ce manuel, les professionnels et amateurs sauront juger de la qualité d'un caviar ; ils pourront lire les différentes étiquettes, connaître les défauts potentiels du produit et même découvrir ses secrets les plus jalousement gardés.



1999, 220 p., 290 F

Pour commander

Contactez votre librairie habituelle

ou INRA Éditions - RD 10 - 78026 Versailles Cedex - FRANCE

Tél : (33) 01.30.83.34.06 - Fax : (33) 01.30.83.34.49

Minitel : 3614 INRA - web : <http://www.inra.fr/Éditions/>

e-mél : dessauva@versailles.inra.fr

FRAIS DE PORT : France-CEE : 30 F pour 1 ou 2 exemplaires et ajouter **8 F** par exemplaire supplémentaire. Franco de port pour plus de 10 ex.

Autres pays : le tarif prioritaire sera systématiquement appliqué (nous consulter).

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Fibres, fils et tissus

THEO TERVOORT • PAUL SMITH

Les recherches portent à la fois sur la conception de fibres dont la structure physico-chimique confère les qualités souhaitées aux fils, et sur leur fabrication.

Au «fil» des millénaires, les textiles ont été perfectionnés pour se substituer aux premiers vêtements faits de peaux d'animaux. Le vêtement est une spécificité humaine (les anthropologues ont-ils pensé à cette définition de l'homme?), et l'on mesure le chemin parcouru depuis la préhistoire en détaillant le large éventail des protections à base de fibres. À l'exception de certaines déviations de Paco Rabanne, les vêtements sont faits de textiles, et les tissus nous préservent des intempéries sous forme de couvertures, de tentes et de parapluies ; les emballages souples protègent les fruits, les légumes et d'autres marchandises ; les produits tissés sont les éléments essentiels dans de multiples distractions (du filet de tennis au cordage des raquettes), et des fibres spécialisées aident le corps médical à réparer le corps humain, sous forme de

pansements pour les plaies ou de fils de suture pour les vaisseaux sanguins. Moins apparent est le rôle protecteur des textiles dans d'innombrables produits industriels qui contribuent à notre sécurité : les filtres industriels, les tapis, les pneus, les câbles, les batteries, les composites légers et les gilets pare-balles sont quelques exemples des nombreuses applications qui tirent partie des qualités des textiles.

Les variétés des textiles

Les textiles (du latin *texeres*, signifiant tissage) sont des assemblages de filaments aux propriétés diverses. Ces propriétés sont déterminées par le choix des constituants, unique ou multiples, et par leur assemblage, éventuellement suivi d'un traitement. Ainsi, les textiles sont souples ou rigides, denses ou lâches, hydrophobes ou

hydrophiles, absorbants ou imperméables, isolants ou conducteurs, etc. Le constituant principal des textiles est bien sûr le fil, qui peut être de longueur infinie (fibre continue) ou composé de fibres relativement courtes, le plus souvent de taille supérieure à un millimètre de long. Le diamètre de la fibre est en général compris entre dix micromètres et un millimètre.

Les techniques de fabrication les plus courantes sont le tissage de fibres courtes ou de fils continus (qui sont souvent eux-mêmes obtenus par filage de courtes fibres), et l'entrelacement et la stabilisation de filaments courts dans des non-tissés. Les variantes de l'assemblage des fibres et des fils déterminent, pour un même type de filaments, les propriétés du produit final, comme la souplesse, le drapé, la porosité, etc.

Les fibres textiles sont classées en fibres naturelles, en fibres artificielles et en fibres synthétiques. Les différentes

1. DENIER ET TEX

L'une des caractéristiques dimensionnelles les plus importantes d'une fibre est l'aire de sa section, que l'on peut déterminer avec précision par microscopie. Malheureusement, la mesure au microscope est destructive et laborieuse. Une mesure plus accessible de la surface moyenne de la section d'une fibre consiste à diviser sa masse linéaire (masse divisée par la longueur) par sa masse volumique (masse par unité de volume). Dans l'industrie textile, on indique la masse linéaire par l'aire moyenne de la section ; dans le cas d'une section circulaire, on considère que cette masse linéaire mesure le diamètre. Deux unités de masse linéaire sont couramment uti-

lisées dans l'industrie textile pour indiquer la finesse : le denier et le tex. Le denier (du nom d'une monnaie romaine, le *denarius*, qui servait à peser les soies) est une unité ancienne : elle correspond au poids en grammes de 9 000 mètres

de fil. Il a été remplacé par le tex, qui correspond au poids en grammes par kilomètre de fil : un tex est égal à neuf deniers. Afin d'utiliser des nombres plus commodes, on utilise un sous-multiple le décitex ou dtex (1 dtex = 0,1 tex = 0,9 denier).

Le tex est aujourd'hui l'unité standard de masse linéaire des fibres textiles. Les masses linéaires vont de 1 dtex à 2 tex (10 à 50 micromètres à une densité de 1 g/cm³). On sait aujourd'hui fabriquer des filaments de 120 à 10⁻⁵ tex, ce qui correspond à 0,1 micromètre de diamètre ; 4,16 grammes seulement de ce filament suffisent pour couvrir la distance de la Terre à la Lune !



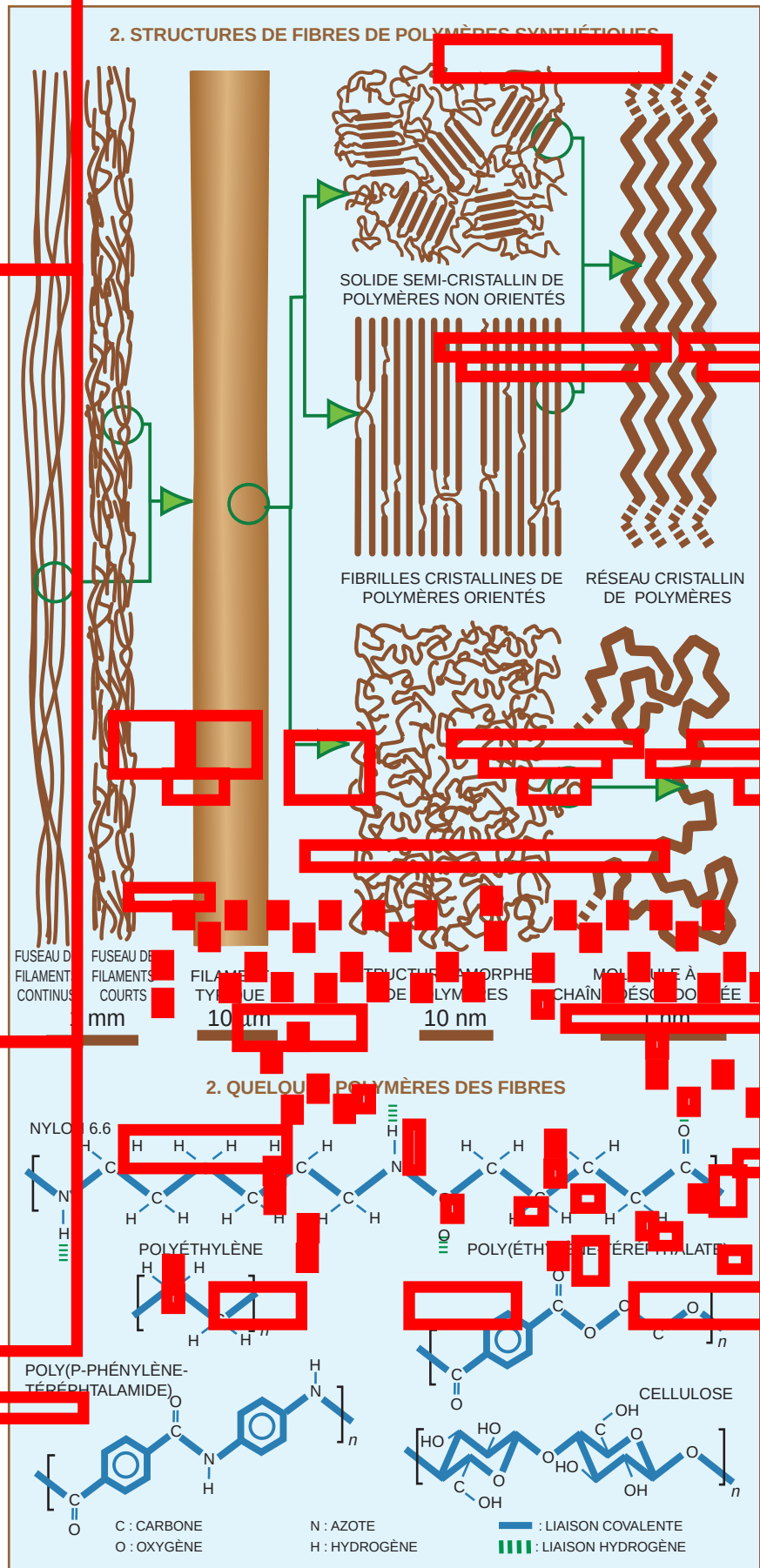
Denarius d'argent (157 av. JC)

couvrir la distance de la Terre à la Lune !

fibres naturelles sont elles-mêmes subdivisées en fibres animales, végétales et minérales. Les fibres animales les plus connues, la laine et la soie, sont constituées principalement de protéines. Les fibres végétales familières sont le coton, le lin, le jute et le chanvre, dont le principal constituant chimique est la cellulose. Une fibre minérale de sinistre mémoire est l'amiante, qui, pour des raisons de santé publique, est abandonnée, mais qui a longtemps été utilisée pour son ininflammabilité : les Anciens l'utilisaient pour en faire les mèches de lampes à huile. Ces matières fibreuses naturelles ne sont pas de longueur infinie, et elles sont entrelacées et mélangées pour produire des fibres textiles.

Les fibres artificielles et synthétiques sont réparties selon leur origine en trois groupes : minérales, animales ou végétales, et entièrement synthétiques. Le premier groupe comprend les fibres de verre, utilisées notamment pour l'isolation thermique, les matériaux composites et les télécommunications, ainsi que les fibres métalliques et les câbles. Les fibres artificielles à base de matières animales et végétales incluent, entre autres, la chitine (constituant par exemple la cuticule des coléoptères, voir *Du crustacé au tissu*, page 124), la cellulose régénérée (rayonne) et l'acétate de cellulose. Enfin, les fibres entièrement synthétiques, la grande majorité, sont faites de macromolécules obtenues par synthèse chimique. Ces très longues molécules (polymères), formées par enchaînement de sous-unités (monomères), ont plus de 5 000 atomes de diverses natures, solidarisés par des liaisons covalentes. Les atomes constitutifs des macromolécules synthétiques, comme la cellulose et la chitine naturelles, sont du carbone, de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène. D'autres éléments, comme le soufre, le chlore et le fluor, sont moins fréquents.

L'ère des « fibres tout synthétique » est née avec l'introduction par la Société Du Pont de Nemours, à l'Exposition universelle de New York de 1939, du « Nylon 6.6 ». Cette fibre, toujours de première importance, résulte de la condensation de l'hexaméthylènediamine et de l'acide adipique. Elle fut synthétisée, ainsi que des matières apparentées, en 1934 par l'ingénieur Wallace Carothers et ses collaborateurs Peterson et Coffman



(brevets américains 2.130.947 et 2.130.948). Ces chercheurs désiraient prouver l'existence (initialement très contestée) de molécules géantes à chaîne linéaire, postulées par Herman Staudinger. D'autres exemples de fibres entièrement synthétiques sont le polyéthylène téréphtalate (polyester, Dacron), le polyacrylonitrile (Orlon, Dyalon), le polypropylène isotactique et les copolymères élastomériques à base de polyéthylène glycol et de diisocyanates (Spandex, Lycra).

Les fibres synthétiques offrent aujourd'hui une extraordinaire palette de propriétés, de l'ultra-haute résistance (dix fois celle de l'acier) à d'exceptionnelles propriétés ignifuges. On ajuste les propriétés en choisissant la composition chimique des molécules de la chaîne et en les disposant judicieusement à l'intérieur de la fibre.

Structures et propriétés des fibres

Pour comprendre et choisir les propriétés des fibres, nous prendrons en compte une hiérarchie de niveaux d'organisations dont les dimensions vont de la taille d'un atome à la longueur d'un câble transatlantique.

L'élément primordial est la composition et l'organisation atomique et moléculaire, à l'échelle de 0,1 à 1 nanomètre (ou milliardième de mètre). La nature des atomes détermine les propriétés intrinsèques et les caractéristiques physiques et chimiques. Ces atomes sont regroupés dans une entité de base, le monomère, simple dans le polyéthylène, complexe dans le Nylon.

Les groupes amides ($-C(O)NH-$) du Nylon établissent des liaisons hydrogène entre les différentes chaînes ; ces liaisons relativement fortes (environ un dixième de la force des liaisons covalentes entre les atomes de la chaîne principale) font que les nylons, même ceux à chaînes relativement courtes ont des bonnes propriétés mécaniques et ne gonflent pas en présence d'eau. En outre, la régularité des groupements amides permet de colorer aisément les nylons avec des teintures ou, au contraire, de les rendre intachables, par réaction avec des composés fluorés, par exemple (voir *Halte aux taches*, page 102). En revanche, le polyéthylène

n'est constitué que d'unités $-CH_2-$ qui interagissent par des forces de Van der Waals (environ 100 fois plus faibles que les liaisons covalentes). Par conséquent, les fibres constituées de ce polymère ne sont pas affectées par la présence d'eau, sont difficiles à teindre, flue facilement et les propriétés mécaniques souhaitables n'apparaissent qu'avec des chaînes longues.

Verre ou cristal

La seconde caractéristique de la structure des fibres, et donc de leurs propriétés, apparaît à l'échelle du nanomètre. À cette échelle, les paramètres critiques sont la régularité et la flexibilité des liaisons chimiques entre les monomères du polymère. La régularité ou l'irrégularité des éléments de la chaîne déterminent notamment la capacité du polymère à s'ordonner en une structure cristalline (régulière) ou amorphe (désordonnée).

L'absence d'ordre n'est pas sans conséquence : un polymère non ordonné est généralement transparent et ne présente qu'une seule température de ramollissement au-delà de laquelle le matériau est un liquide dont la viscosité dépend de la longueur des chaînes et en dessous de laquelle le matériau est cassant. Un exemple classique de tels polymères amorphes est le polyméthacrylate de méthyle, utilisé dans les fibres optiques.

Les polymères comprenant des monomères qui se répètent régulièrement et qui sont solidarisés par le même type de liaison forment des domaines tridimensionnels ordonnés, c'est-à-dire des zones cristallines ou « cristallites » ; au-dessus de leur température de fusion, ces zones cristallines fondent et donnent une masse visqueuse. Toutefois la formation d'un ordre cristallin tridimensionnel nécessite un réarrangement complexe et souvent très lent des chaînes moléculaires, et toutes les parties des molécules ne se réarrangent pas à la même vitesse lors de la formation de la fibre (duree de l'ordre de quelques secondes). Même les polymères bien cristallisables n'engendrent que des matériaux semi-cristallins où seulement 30 à 70 pour cent de la matière est ordonnée.

Par conséquent, les fibres sont hétérogènes : elles présentent des zones cristallines dont les dimensions sont de

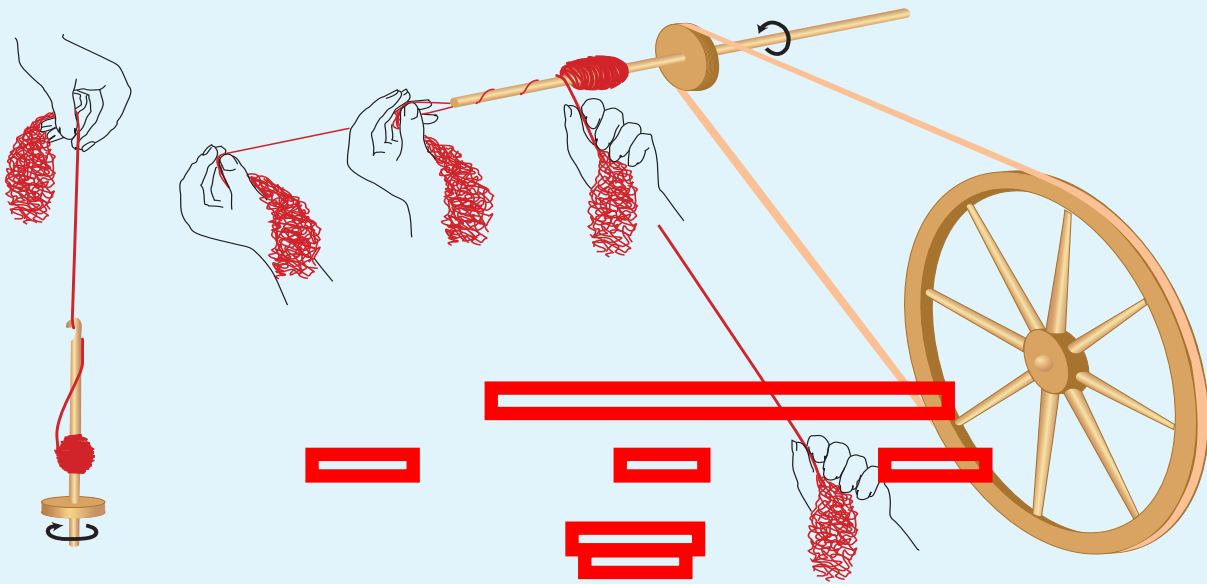


l'ordre de dix nanomètres, auxquelles des zones amorphes sont associées par liaisons covalentes.

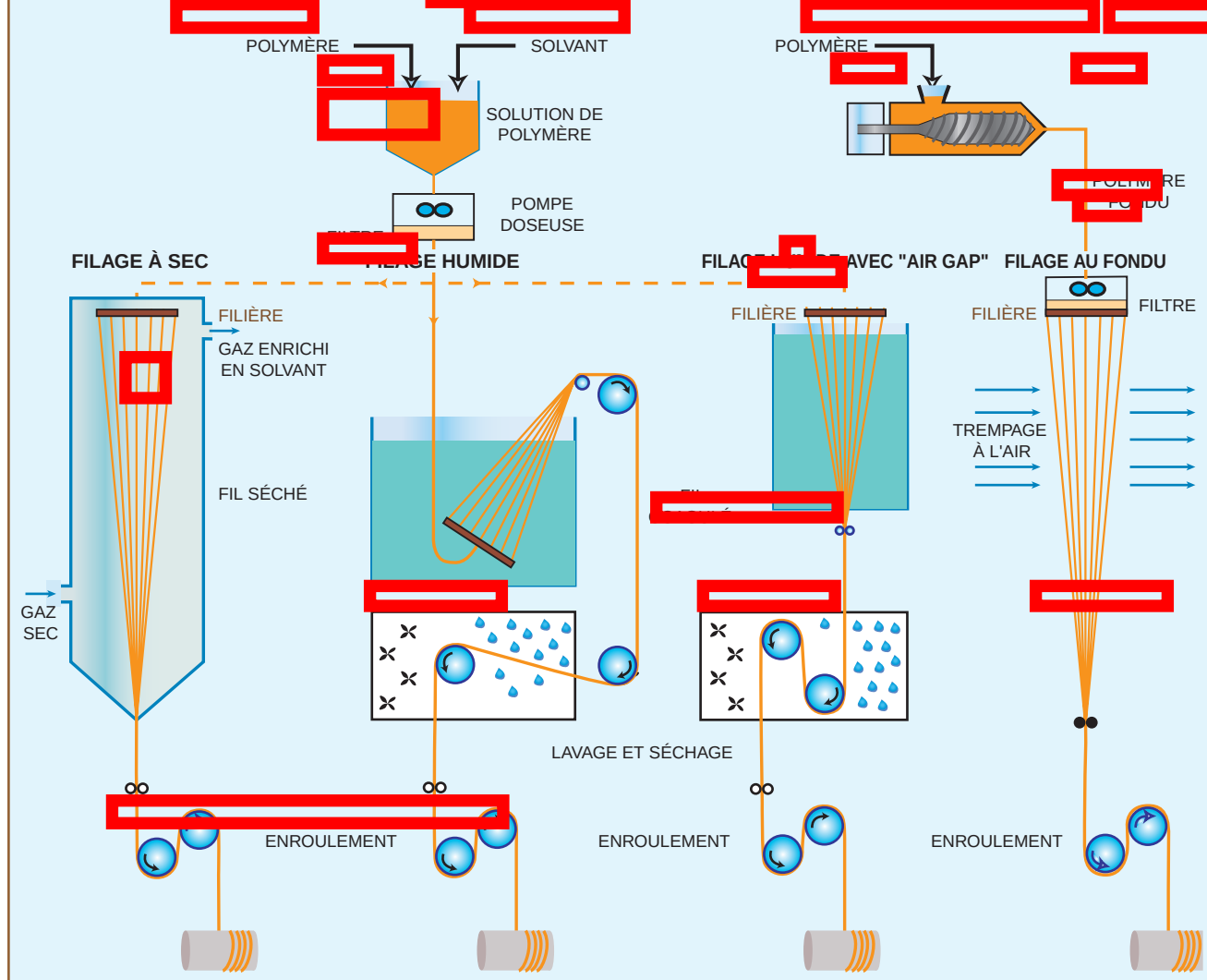
Ces matériaux semi-cristallins présentent deux températures de transition, la température de fusion cristalline et la température de transition vitreuse, située entre 0,5 et 0,8 fois la valeur de la température de fusion (en kelvins ou degrés au-dessus du zéro absolu). Entre ces deux températures, la matière est résistante et supporte d'importants allongements sans rompre. De tels polymères sont le polypropylène isotactique, les Nylons 6.6 et 6, le poly(éthylène téréphtalate) et le polyéthylène linéaire.

La plus ou moins grande flexibilité de la liaison entre les monomères de la chaîne du polymère détermine sa rigidité. Aux deux extrêmes, le Nylon 6.6 est très souple, et l'aramide poly(para-phénylène téréphtalamide) (Kevlar), utilisé dans des fibres hautes performances (par exemple, le Kevlar et le Twaron), est très rigide. En l'absence de forces extérieures (pas de cisaillements dus à un écoulement qui oriente les molécules), les polymères souples s'enroulent en pelote, alors que les polymères rigides conservent leur structure linéaire. Les polymères les plus communs sont souples. Depuis leur découverte à la fin des années 1960 par Stéphane Kwolek, de la Société Du Pont de Nemours, quelques autres macromolécules « rigides » ont été synthétisées.

3. FILAGE À L'ANCIENNE : FUSEAU ET ROUET



4. LES TECHNIQUES DE FILAGE MODERNES



La flexibilité des macromolécules a d'importantes conséquences sur leurs températures de transition thermique et, par voie de conséquence, sur leurs utilisations possibles. Par exemple, le PPTA, plutôt rigide, a une température de fusion cristalline qui dépasse 600 °C, alors que le Nylon 6.6, son homologue souple, fond déjà vers 265 °C. D'autre part ces transitions, ainsi que d'autres propriétés associées à la rigidité de la chaîne, sont d'une importance capitale pour la transformation des polymères en fibres.

Nous allons maintenant examiner la conformation et l'arrangement des macromolécules au sein de la fibre. Les caractéristiques structurales dépendent bien sûr de la longueur réelle (ou de la masse molaire) de la chaîne moléculaire, mais apparaissent en général entre 10 et 100 nanomètres.

À cette échelle, la question principale est : l'arrangement des polymères est-il isotrope ou existe-t-il une orientation préférentielle, le long de l'axe de la fibre par exemple ? Cette dernière configuration, particulière, confère aux fibres des propriétés inhabituelles, mécanique et autres. Une structure non orientée est désirable si l'on veut réaliser des fibres à propriétés isotropes, par exemple les fibres optiques.

En raison de leur processus de croissance, les molécules constituant les fibres naturelles, adoptent une configuration parallèle. Pour les polymères synthétiques, cet arrangement moléculaire résulte du processus de fabrication de la fibre.

À l'échelle macroscopique, on observe que les fils des textiles classiques sont généralement constitués de fibres entrelacées, continues ou discontinues. Les fibres ont généralement un diamètre entre cinq micromètres (ou millionième de mètre) et 50 micromètres (le diamètre d'un cheveu humain) et présentent des sections de diverses formes. Ces dernières déterminent de nombreuses caractéristiques physiques de la fibre, comme la diffusion de la lumière (brillance), l'état de surface (absorption de l'eau et adhérence), le toucher (voir *De l'étoffe à la main*, page 144), ainsi que les propriétés mécaniques (souplesse, drapé).

Un dernier commentaire quant à la porosité des fibres : la plupart des fibres qui constituent les fils naturels ou synthétiques forment des faisceaux denses d'une largeur de 5 à 10 nanomètres, séparés par des vides oblongs. Cette porosité détermine la capacité du fil à absorber des liquides. En revanche, les textiles employés dans les membranes

de dessalement de l'eau de mer ou les membranes échangeuses d'ions ont une structure poreuse différente : les fibres sont croisées, et leur paroi, d'une épaisseur de l'ordre du nanomètre, présente une perméabilité sélective pour certaines molécules.

La formation des fibres

Pour former des fils naturels, on récolte, on nettoie ou l'on traite chimiquement des fibres relativement courtes que l'on file pour former des filés de fibres ou que l'on agglomère pour obtenir des non-tissés avec ou sans additifs. Dans certains cas, par exemple le jute, on extrait les fibres des parois végétales ou de l'écorce par des procédés complexes, comme le rouissage. La formation de fibres à partir de matières naturelles fait rarement intervenir des manipulations et des arrangements au niveau moléculaire ou même à des échelles de longueur plus grandes ; les propriétés macroscopiques de ces fils sont déterminées par la nature des fibres constitutives, modifiées principalement par l'art et la manière dont elles sont assemblées pour obtenir le produit final.

En revanche, dans la production des fibres artificielles ou synthétiques, des procédés (macro) moléculaires

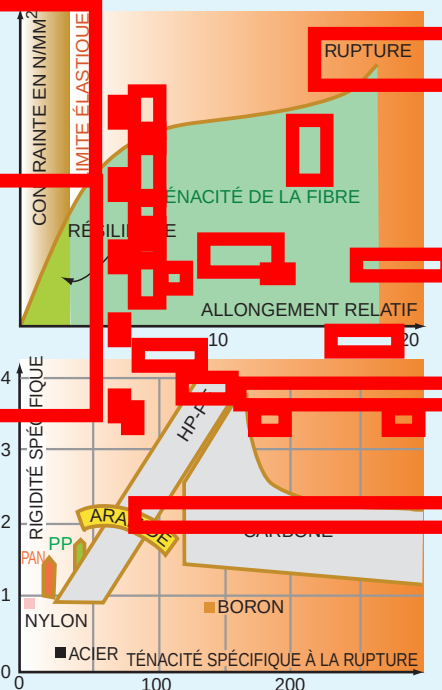
5. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES FIBRES

Les propriétés mécaniques des fibres sont habituellement mesurées en tension axiale : on mesure l'allongement en fonction de la charge. Pour supprimer l'effet de la géométrie de la fibre, les résultats de ces essais charge/allongement sont consignés en termes de contrainte (σ , force par unité de surface de la section) et d'allongement (ϵ , élongation par unité de longueur initiale). La contrainte est exprimée en newtons par mètre carré (N/m^2) ou en pascals (Pa) et souvent en MPa (10^6 Pa), tandis que l'allongement est sans dimension.

Au XVII^e siècle déjà, Robert Hooke a observé qu'un objet soumis à une charge faible (déformation élastique) s'étire proportionnellement à la force appliquée. Cette proportionnalité est la loi de Hooke : $\sigma = E \epsilon$.

La constante de proportionnalité E , ou *module d'élasticité de Young*, mesure la rigidité. Comme la déformation est sans unité, la rigidité s'exprime avec la même unité que la contrainte. La surface sous la zone d'élasticité de la courbe charge-allongement correspond à la *résilience*, la capacité de stocker l'énergie sous forme élastique. La surface sous la totalité de la courbe mesure le travail nécessaire pour casser la fibre, également dénommée *résistance mécanique*. La charge au point de rupture est la *résistance de la fibre* ou *ténacité*.

Les propriétés mécaniques des fibres sont exprimées par unité de masse linéaire et non par unité de surface de la section. Par exemple, la charge par unité de masse linéaire s'appelle *charge spécifique* et s'exprime en N/tex ou en gramme-force par denier. Une quantité spécifique, comme la contrainte spécifique, est la quantité elle-même divisée par la densité. La rigidité spécifique exprimée en N/tex est importante dans les applications où l'on cherche à gagner du poids. La même chose vaut pour la résistance spécifique d'une fibre, également dénommée *ténacité à la rupture*. Les diagrammes de la rigidité spécifique en fonction de la ténacité à la rupture pour diverses fibres sont présentés ci-contre.



jouent un rôle fondamental. La matière, organique ou inorganique, artificielle ou synthétique, n'est pas sous une forme fibreuse utilisable, mais transformée en fibres ou en filaments par diverses opérations. Au cours de ces processus, on ajuste les paramètres de fabrication pour arranger les molécules selon la hiérarchie de structures désirée.

Les fibres synthétiques sont créées à partir de tous les états de la matière, le choix de la méthode de fabrication dépendant des propriétés du matériau de base, comme sa capacité à fondre sans se décomposer, de considérations économiques et de la structure souhaitée. Nous examinerons les procédés de fabrication dans l'ordre de leur complexité croissante.

Le premier processus fait appel au chauffage de la matière première au-delà de la température de ramollissement (au voisinage de la température de transition vitreuse pour la matière amorphe et de la température de fusion pour les cristallins). On extrude ensuite la masse fondue à travers des trous de filières dont la géométrie détermine l'aire et la forme de la section, puis on refroidit les filaments liquides pour les solidifier. Les fibres fabriquées par ce processus, dénommé filage au fondu, sont les fibres en verre inorganique, les nylons, les polyesters et le polypropylène isotactique.

Évidemment, pour que ce procédé soit applicable, il faut que la matière première ne se décompose pas à la température d'extrusion, qui est souvent supérieure de 20 à 100 °C à la température de ramollissement, et que la viscosité de la masse fondue permette l'extrusion (ce qui n'est pas le cas pour des molécules extrêmement longues comme le polytétrafluoroéthylène).

Lorsque les propriétés intrinsèques des matières ne permettent pas le filage à l'état fondu, on pratique l'extrusion à partir d'une solution de polymère. Cette technique consiste à ajouter un solvant pour abaisser la température de fusion ou de ramollissement sous la température de décomposition thermique. Là encore, une masse visqueuse est créée par le mélange du polymère et du solvant, que l'on extrude ensuite à travers les trous de filières. La solidification des fibres s'effectue par évaporation du solvant (filage à sec) ou par extraction du solvant à l'aide d'un autre liquide (filage humide). Parmi les fibres

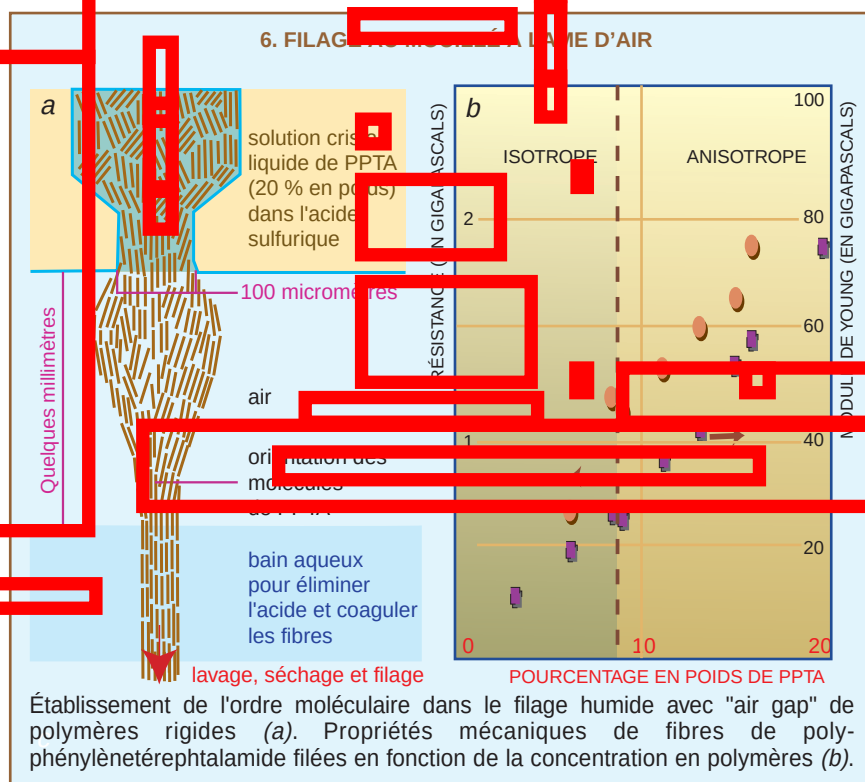
textiles courantes, des exemples bien connus de ces deux procédés sont le filage de fibres de polyacrylonitrile et d'acétate de cellulose.

Quand la matière première choisie ne peut être fondue sans décomposition ou présente une viscosité excessive pour l'extrusion et, de plus, n'est pas soluble, on a recours à des procédés plus élaborés. De telles matières sont, par exemple, la cellulose, qui se décompose à une température bien inférieure à sa température de fusion, et le polytétrafluoroéthylène ou PTFE dont la viscosité à l'état fondu est supérieure à 10 milliards de pascal seconde (la viscosité de l'eau est égale à 0,001, celle de l'huile moteur à 0,01).

Une méthode chimique élégante pour le filage de la cellulose, inventée en 1891 par Hilaire Bernigaud, comte de Chardonnet, consiste à transformer temporairement la matière première en un polymère soluble, à filer des fibres à partir de cet intermédiaire, puis à régénérer la matière désirée. Dans le cas de la cellulose, on synthétise d'abord du xanthate de cellulose en faisant réagir de la cellulose traitée à la soude avec du disulfure de carbone. Le polymère ainsi obtenu est dissous et filé dans un bain acide, puis chimiquement retransformé en cellulose pour former les fibres de

rayonnes bien connues (le mot vient du verbe « rayonner »). Depuis la découverte du N-oxyle de N-méthylmorpholine, un solvant qui ne transforme pas chimiquement la cellulose au sens strict, le procédé au xanthate, « écologiquement incorrect » parce que polluant, n'est plus indispensable. Cependant, le principe même de Bernigaud continuera à être appliqué, faute de mieux, pour des polymères comme les polyimides.

La fabrication des fibres de polytétrafluoroéthylène, utilisées par exemple dans les filtres industriels et la soie-fleche pour usage dentaire, contourne les inconvénients de la viscosité extrêmement élevée du polymère à l'état fondu : la matière est transformée en fibres à l'état solide. Dans l'un des techniques, le polymère en poudre est d'abord compressé en un bloc cylindrique et fritté à 345 °C, température supérieure à celle de la fusion cristalline. Après refroidissement à la température ambiante, les filaments sont découpés dans le bloc. Dans d'autres techniques, on extrude les fibres à partir d'une suspension ou d'une pâte de particules de polytétrafluoroéthylène d'environ 0,1 micromètre, puis on fritte la matière pour la refroidir.



Il existe d'autres procédés de formation de fibres et de tissus, comme le filage éclair, la découpe de filaments à partir de films, l'électro-filature, la filature à bout libre et la fabrication directe de voiles minces (*spun bound*) ou de membranes microperforées (par exemple le Gore-tex), mais que nous n'aborderons pas ici. Les nombreux post-traitements, comme la texturation, le crêpage, la teinture et l'apprêtage sont examinés dans ce numéro spécial (voir *L'ennoblissement des textiles*, page 118 et *L'ensimage*, page 108).

Des fibres «sur mesure»

Comme nous l'avons évoqué plus haut, l'arrangement particulier des molécules qui constituent les fibres est d'une importance primordiale pour la détermination des propriétés finales : la rigidité, la solidité et l'allongement à la rupture, la conductivité thermique et, enfin, la tendance à former des fibrilles.

L'ajustement précis de l'ordre moléculaire a permis la conception, entre 1970 et 1975, de fibres ultrarésistantes. Les textiles faits avec de telles fibres ont servi à fabriquer des gilets pare-balles ultralégers, des gants de chirurgien résistants aux coupures, des composites de haute performance et une multitude d'autres produits innovants (voir *Les textiles techniques*, page 176).

Les procédés de fabrication et de création d'un ordre moléculaire traduisent le progrès de la connaissance : nous en donnerons un aperçu pour deux catégories très différentes de fibres hautement résistantes : les fibres à base d'aramide rigide (PPTA) et le polyéthylène flexible à ultra-haut poids moléculaire (PE UHPM).

Comme nous l'avons noté, le PPTA, qui est synthétisé par polycondensation d'une solution de chlorure de téréphthaloyl et de phénylène diamine 4,4, est une macromolécule très rigide. Cette rigidité intrinsèque fait qu'un ordonnancement régulier des polymères en solution apparaît au-dessus d'une concentration minimale où le rapprochement renforce les interactions des chaînes, donc l'ordre (cristal liquide). Ce comportement a fait l'objet d'études théoriques menées, entre autres, par M. Flory, et Pierre-Gilles de Gennes a proposé une élégante théorie. Flory a montré que la

fraction volumique f de tiges nécessaire pour que se forme une phase cristalline stable est égale à $(8/x)(1 - 2/x)$ pour des valeurs élevées de x (le rapport longueur/diamètre des tiges). La phase ordonnée des aramides cristaux liquides est nématique et consiste en arrangements de chaînes à peu près parallèles.

Une propriété techniquement importante est la faible viscosité de la phase ordonnée. En général, la phase cristalline liquide, anisotrope, est transformée en fibres de haute résistance et à haut module d'Young par un procédé d'extrusion appelé filage humide avec «air-gas». Dans cette technique, dont Herbert Blades de la Société *Du Pont de Nemours* fut le premier à reconnaître l'importance, le fil fluide extrudé dans la phase cristalline liquide, est consolidé juste à la sortie de la filière, avant la coagulation des fibres qui se fait par exemple dans de l'eau. Cette dernière opération renforce l'orientation des chaînes moléculaires rigides. Les diagrammes de diffraction de rayons X par de telles fibres révèlent le haut degré d'alignement préférentiel des macromolécules dans le sens de l'axe des fibres. C'est de cet arrangement moléculaire particulier que découlent la haute résistance et la rigidité de fibres telles que le Kevlar, de la Société *Du Pont de Nemours*. Les propriétés mécaniques de ces fibres sont comparables à celles de l'acier et du verre, mais leur densité est bien moindre, de l'ordre de 1,45.

On sait également produire des fibres résistantes et de fort module d'Young, quoique plus difficilement, à partir de solutions isotropes de molécules à chaînes rigides, à condition que l'extrusion des fibres se fasse à des forces de cisaillement suffisamment élevées pour induire une orientation axiale et qu'une coagulation rapide assure la relaxation de cet ordre. Ces derniers points sont illustrés par les résultats présentés sur la figure 6, où l'on a représenté les propriétés mécaniques de PPTA filées par cette technique en fonction de la concentration en polymère des solutions. Le facteur d'étirement au filage (vitesse d'enroulement/vitesse d'extrusion) a été ajusté pour chaque concentration, afin de maintenir constant le diamètre de la fibre. Il est remarquable que ces résultats n'indiquent pas de discontinuité dans la résistance à la traction ou dans la rigidité

des fibres lors de l'apparition de la phase nématrope.

Ainsi, l'apparition de l'état cristallin liquide n'est pas une garantie de haute résistance ou de rigidité élevée. Les aramides précédemment cités tirent leurs excellentes propriétés mécaniques de leur rigidité intrinsèque, qui fait que ces macromolécules s'orientent facilement dans l'écoulement du filage pour produire des structures axiales, ainsi que de leur capacité à former des liaisons intermoléculaires secondaires fortes, comme des liaisons hydrogène. Ces liaisons résistent aux concentrations de contraintes produites par le grand nombre d'extrémités de chaînes résultant de poids moléculaires modestes de ces polymères.

La découverte par Stéphanie Kwolek de la synthèse de polyamides aromatiques rigides et par Herbert Blades de la transformation de ces matières en une catégorie, alors nouvelle, de polymères de hautes performances, ont fait exploser ces activités de recherche. Ces efforts ont amené la synthèse d'un certain nombre d'autres molécules à chaînes rigides qui forment des phases cristallines liquides : par exemple, les familles des polybenzothiazoles et des oxazoles, encore plus rigides que les aramides. On a plus tard synthétisé un grand nombre de polymères nématotropes (par exemple, le polyester aromatique Vectran), qui sont des molécules à chaînes modérément rigides. Ces matières, contrairement aux aramides, peuvent être transformées à partir de la masse fondue, car leurs températures de fusion sont inférieures, mais, comme on pouvait le supputer, leur rigidité et leur résistance à la traction sont plus faibles.

Des fibres ultrarésistantes sont également obtenues à partir de polymères à chaînes flexibles. On sait depuis longtemps que les propriétés mécaniques potentielles de ces polymères peuvent être supérieures à celles des métaux, des céramiques et du verre, à condition que les molécules à longues chaînes soient arrangées selon une structure orientée sans défaut. Les propriétés macroscopiques le long de l'axe de la chaîne de ces structures idéales sont alors déterminées, non pas par les forces interchaînes faibles, mais par les liaisons covalentes intra-chaînes très fortes, l'effet des liaisons interchaînes se cumulant sur des

longueurs suffisantes. Ainsi, la rigidité axiale théorique de nombreuses chaînes macromoléculaires est comparable ou supérieure au module d'Young de l'aluminium et de l'acier.

L'étirement des pelotes

Nous savons que les polymères à chaînes flexibles adoptent, à l'état liquide, une conformation enroulée en pelote, engendrant des solides isotropes non orientés ; pour conférer à ces solides isotropes semi-cristallins la structure axiale désirée, les macromolécules flexibles sont étirées et orientées.

La macromolécule en pelote doit être étirée jusqu'à un rapport d'étirement (longueur finale/longueur initiale) qui varie approximativement en fonction de la racine carrée de sa longueur et qui peut dépasser 100 pour des polymères de masses molaires supérieures à 1 000 000 kg/kmole. En réalité, les pelotes

ne sont pas solées, mais incorporées dans un réseau moléculaire enchevêtré et dans les cristallites qui constituent des zones semi-cristallines des polymères. Aussi la mobilité des chaînes est-elle entravée et souvent les rapports d'étirement nécessaires pour une extension totale des chaînes ne sont pas atteints. En fait, de nombreux solides semi-cristallins de polymères cassent dès qu'ils atteignent un allongement compris entre 300 et 600 pour cent (soit des rapports d'étirement de seulement 4 à 7). On nomme classiquement ces valeurs «rapports d'étirement naturel» des polymères. Manifestement, pour que les macromolécules soient complètement étirées, il faut les libérer (temporairement) des contraintes imposées par les interactions interchaînes. Cependant, la déformation des macromolécules dans un état de trop grande liberté de mouvement, comme dans l'état liquide ou dans certains états solides plastiques désordonnés, ne

produit pas une extension et une orientation efficaces des chaînes, en raison d'une relaxation et d'un réenroulement rapides. Il faut donc opérer dans des conditions expérimentales où les chaînes ont suffisamment de liberté de mouvement pour s'orienter par étirement, mais pas assez pour permettre un réenroulement significatif des macromolécules déformées.

Cette optimisation a d'abord été obtenue pour le polyéthylène linéaire. Ce polymère, nous l'avons vu, se caractérise par de faibles liaisons interchaînes de type Van der Waals ; aussi peut-on, en appliquant des contraintes modérées à des températures inférieures au point de fusion, déplacer les macromolécules à travers le maillage cristallin. Ainsi, le degré maximum d'orientation que l'on peut atteindre par étirement du polyéthylène est déterminé par la topologie des zones amorphes et non par celle des zones cristallines.

7. ORIENTATIONS

Les polymères sont naturellement anisotropes : les propriétés dans la direction de la chaîne sont dominées par des liaisons covalentes fortes, tandis que les propriétés perpendiculaires à la chaîne sont déterminées par des liaisons intermoléculaires beaucoup plus faibles, comme des forces de Van der Waals et des liaisons hydrogène. Dans le cas du polyéthylène, par exemple, la rigidité le long de la chaîne en zigzag est 300 fois plus forte que dans la direction perpendiculaire ; il en est de même des conductivités thermique et électrique, de la polarisabilité et d'autres propriétés. L'anisotropie intrinsèque des polymères se manifeste à un niveau macroscopique et le paramètre d'ordre, f_h , la mesure :

$$f_h = (3\langle \cos^2\theta \rangle - 1)/2,$$

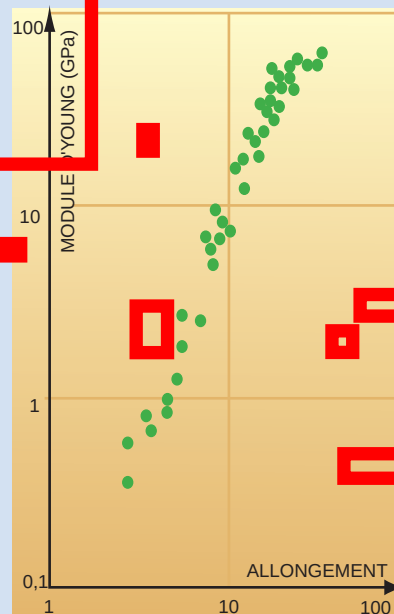
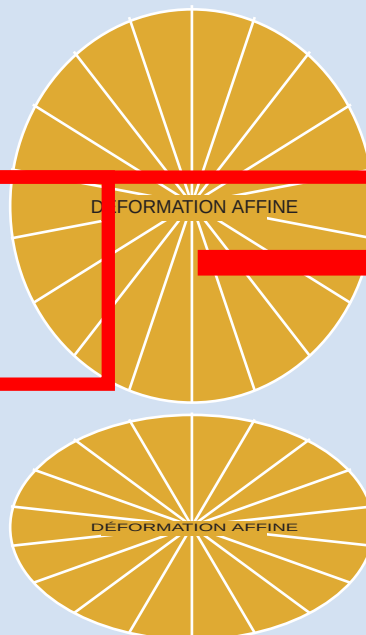
θ étant l'angle entre l'axe de la chaîne d'un segment de polymère et l'axe de l'orientation privilégiée, les parenthèses indiquant que l'on prend la moyenne des orientations. La valeur de f_h est zéro pour les systèmes isotropes et un quand tous les segments sont alignés.

Certaines propriétés, comme la biréfringence et la capacité de polariser la lumière, sont proportionnelles au paramètre d'ordre et peuvent servir à quantifier le degré d'orientation.

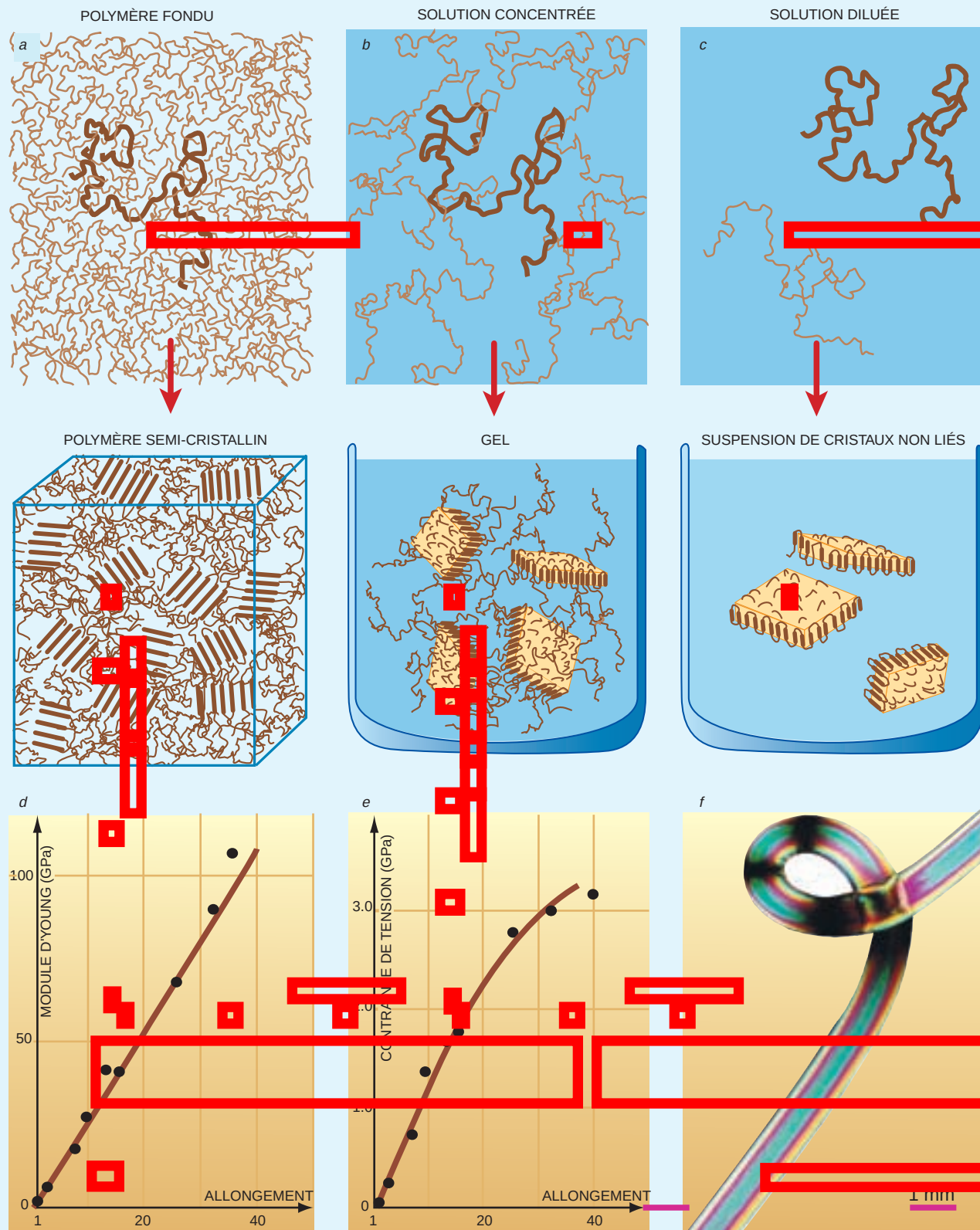
Pour d'autres propriétés, comme la rigidité et la conductivité électrique, la dépendance selon l'orientation est plus complexe.

Un bon moyen de décrire l'orientation par déformation est ce que le module de déformation affine, où l'on suppose que les éléments linéaires au sein d'un objet se déforment comme la déformation macroscopique qui s'applique aux bords de l'objet. Alors l'évolution du paramètre d'ordre, et donc les propriétés de la matière (dépendant uniquement du degré de déformation plastique) et non des détails de la structure, comme le degré de cristallinité.

Dans des conditions optimales d'étirement (sans relaxation de l'orientation durant la déformation), la validité de cette approche a été confirmée pour de nombreux systèmes de polymères. La figure ci-contre montre l'augmentation du paramètre d'ordre mesuré par le module d'Young en fonction de la déformation de divers échantillons de polyéthylène de formes différentes. Un haut degré d'ordre, dans ces cas, est à des déformations importantes, donne des modules élevés pour les polymères à chaînes flexibles.



8. PRÉPARATIONS ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES FIBRES



Enchevêtrement de polymères flexibles à l'état fondu (a), formation de gels à partir d'une solution semi-diluée (b) et diluée (c). Propriétés mécaniques des fibres de polyéthylène

à ultra-haute masse moléculaire en fonction de l'allongement (d et e), micrographie prise en lumière polarisée d'une fibre de gel de polyéthylène à ultra-haute masse moléculaire (f).

Des études systématiques effectuées notamment par Ward et ses collaborateurs à Leeds ont démontré que les polyéthylènes de masses molaires d'environ 100 kg/mole peuvent être étirés efficacement à l'état solide jusqu'à des rapports d'étirement de plus de 20, soit proches de la valeur maximale calculée pour cette longueur de chaîne. Fait plus important encore, les auteurs en ont conclu que la rigidité finale des polyéthylènes étirés était dictée uniquement par le rapport d'étirement absolu, et non par la masse moléculaire, et que le rapport d'étirement maximal des polyéthylènes linéaires cristallisés à partir du polymère fondu diminue quand la masse molaire augmente.

Ce comportement est contradictoire avec notre analyse antérieure des chaînes isolées. La cause de cette diminution du rapport d'étirement maximal en fonction de l'augmentation de la longueur de la chaîne de polyéthylène fondu, puis cristallisé, réside dans l'augmentation linéaire du nombre d'enchevêtrements («nœuds moléculaires») par molécule. Ces enchevêtrements de chaînes agissent comme des points de friction et bloquent la déformation.

Des techniques pour contourner ces limites ont été mises au point à la fin des années 1970 chez la Société DSM, aux Pays-Bas. On découvrit alors que les gels de polyéthylène à ultra-haute masse moléculaire (supérieur à 1 000 000 kg/kmole) obtenus par cristallisation à partir de solutions semi-diluéées, où les molécules de polymère sont pour la plupart désenchevêtrées, s'allongent facilement jusqu'à des rapports d'étirement 25 fois supérieurs à ceux du même polymère cristallisé à partir de la masse fondue, dans des conditions expérimentales par ailleurs identiques.

Les rapports d'étirement extraordinairement élevés du PE UHPM cristallisé en solution s'accompagnent d'augmentation marquée de la rigidité et de la résistance à la traction. L'utilisation de masses moléculaires encore supérieures, associée à une optimisation des concentrations des solutions de polymère initial, permet d'obtenir une résistance à la traction encore plus élevée. Les rapports d'étirement très élevés modifient la forme et la structure de la chaîne, et améliorent les propriétés mécaniques, ce qu'ont montré les photographies au microscope électronique à balayage et

les diagrammes de diffraction X. Le bon alignement exceptionnel des chaînes de polyéthylène, mis en évidence par les rayons X, contraste avec l'orientation obtenue avec des matières à l'état de cristaux liquides.

Le procédé décrit ci-dessus, couramment appelé filage en gel, a été commercialisé par DSM/TOYOBO et ALLIÉ SIGNAL. Les fibres disponibles sur le marché ont en général une résistance à la rupture de 4 à 5 gigapascals et un module de 100 à 150 gigapascals. L'inconvénient majeur de ces matières est leur faible température maximale d'utilisation (environ 130 °C), plus basse que celle des aramides. En revanche, les fibres de polyéthylène résistent mieux que les aramides à l'abrasion et aux chocs.

Le procédé et les éléments examinés ici ne concernent pas exclusivement le polyéthylène. Le filage à l'état de gel a également été appliqué avec un certain succès au poly(vinylalcool) et au polypropylène, même si l'on a obtenu des caractéristiques mécaniques moins spectaculaires (pour le polypropylène, en raison d'une rigidité intrinsèque plus faible du polymère due dans sa conformation cristalline hélicoïdale).

Autres développements

Outre la recherche de nouvelles fibres de performances accrues, d'importants efforts visent à développer des fibres et des textiles plurifonctionnels, c'est-à-dire possédant des propriétés et des fonctionnalités additionnelles. Parmi ces développements, citons la réalisation remarquable, notamment par les producteurs de fibres japonais, de la fabrication de filaments «sub-deniers» par exemple en polyester, de diamètres inférieurs à environ trois micromètres. Les textiles constitués de ces fibres exceptionnelles (*Shin-gosen*) présentent, selon leur structure, la qualité *high touch* (l'apparence et le toucher du cuir ou de la soie) et peuvent être nettoyés avec une extrême facilité. Un exemple typique, bien que quelque peu exotique, de fibres plurifonctionnelles sont les fibres de mélèons, qui changent de couleur avec la température ou la lumière. D'autres fibres ayant des propriétés additionnelles spéciales sont les fibres biorésorbables (par exemple, à base d'acide lactique), utilisées en chirurgie et les fibres optiques utilisées dans les

télécommunications. Chacune de ces fibres doit avoir, pour être fonctionnelle, un ensemble de caractéristiques extrêmement contraignantes. Pour les premières de ces conditions préalables sont la biocompatibilité et la dégradation contrôlée dans le corps humain, en plus de propriétés mécaniques appropriées, tandis que les secondes doivent présenter une pureté absolue et un profil spécifique d'indices de réfraction.

Parmi les autres nouveaux développements, encore balbutiants, figure celui des fibres de polymères conducteurs (par exemple, la polyaniline) et plus généralement des fibres de semiconducteurs. Outre les applications évidentes en électronique, de telles fibres permettraient des utilisations nouvelles où l'élasticité et la remarquable transformabilité de nombreux polymères s'ajouteraient à la fonctionnalité opto-électronique.

Que reste-t-il à trouver?

Que reste-t-il à faire ou à inventer? Par certains aspects, cette question (quelque peu rhétorique) est déjà résolue. Établissons une liste de ce que l'homme n'a pas pu obtenir jusqu'à présent: (1) conférer aux fibres le confort exceptionnel qu'offrent les fibres de coton, ainsi que d'autres fibres naturelles; (2) produire des filaments polymériques possédant la propriété de résistance à la compression des fibres de verre; (3) imiter le processus de formation de la soie, dans lequel un polymère hautement résistant est produit dans des conditions ambiantes à partir de l'eau.

Les efforts visant à résoudre les problèmes qui subsistent devraient se révéler non seulement gratifiants sur le plan intellectuel, mais également d'une grande valeur sociale.

Theo FERRIORT et Paul SMITH sont professeurs dans le Département Matériaux-Polymères de l'École polytechnique fédérale de Zurich.

W.E. MORTON et J.W.S. HEARLE, *Physical Properties of Textile Fibers*, The Textile Institute, Manchester, 1993.

Advanced Fiber Spinning Technology, Woodhead, Cambridge, 1994.

T. HONGU et Glyn O. PHILLIPS, *New Fibers*, deuxième édition, Woodhead, Cambridge, 1997.



L'HISTOIRE DES TEXTILES

L'histoire des textiles

Les textiles des princes celtes

CHRISTOPHE MOULHERAT

Les textiles découverts dans les sépultures aristocratiques de l'Europe celtique révèlent le haut degré technique atteint par les Celtes au cours du premier âge du fer.

Le début du premier millénaire avant notre ère, du VIII^e au V^e siècle, est une période clé de l'histoire des textiles : au cours de ce premier âge du fer encore nommé période de Hallstatt (du nom d'une vaste nécropole autrichienne), le traditionnel métier à tisser vertical à deux barres (voir la figure 3), hérité du Néolithique et de l'âge du bronze, est remplacé par le métier vertical à quatre barres. C'est aussi à cette époque qu'apparaît le métier à tablettes. Avec ces nouveaux outils, les tisserands fabriquent des étoffes complexes, où le jeu des couleurs, les nouvelles techniques de tissage et l'utilisation de fibres variées produisent des motifs harmonieux dont on ne retrouvera l'équivalent que sous l'Empire romain.

Ces bouleversements dans le domaine des textiles correspondent aux changements sociaux, politiques et culturels des sociétés d'Europe celtique (voir la figure 2). Ce territoire, occupé par les Celtes du premier âge du fer, s'étend alors du Nord de l'Allemagne au Nord de la Suisse et du Massif central à la Bohême. L'aristocratie qui apparaît doit sa prospérité aux contrôles des voies de communication. Elle s'implante sur des sites en hauteur, fortifiés, sur des axes de commerce, telles les vallées du Danube, du Rhin et du Rhône. Elle se fait inhumer dans des tombes fastueuses, avec un mobilier de bronze, des bijoux en or, les premiers objets en fer et de nombreux vestiges textiles.

De la fin de l'âge du bronze à la fin du premier âge du fer (du IX^e au V^e siècle avant notre ère), les pratiques funéraires aristocratiques se transforment : du IX^e au VII^e siècle, les défunts sont enterrés avec une épée de bronze ou de fer ; au VI^e siècle, les tombes contiennent de la vaisselle métallique, des parures en or

et un char à quatre roues ; au V^e siècle, ces tombes à inhumation cèdent la place à des sépultures à incinération en urne de bronze. Parfois, ces pratiques coexistent, au cours des périodes de transition. Ces changements sont représentatifs des différentes formes de pouvoir, symbolisées dans la tombe par une combinaison d'objets distincts.

Du fait de leur nature organique, les textiles de ces tombes ont été souvent décomposés. On n'en retrouve des traces qu'environ lorsqu'ils se sont conservés grâce à des conditions particulières, comme dans les tombes des princes celtes. Les vestiges de textiles sont minéralisés en raison du contact étroit avec un objet métallique qui se corrode ; le matériau organique est alors soit imprégné, soit recouvert de sels produits lors de la corrosion. Cette minéralisation des textiles par des sels métalliques est une opportunité extraordinaire pour la recherche archéologique, notamment pour la recherche sur l'environnement et les animaux de l'âge du fer.

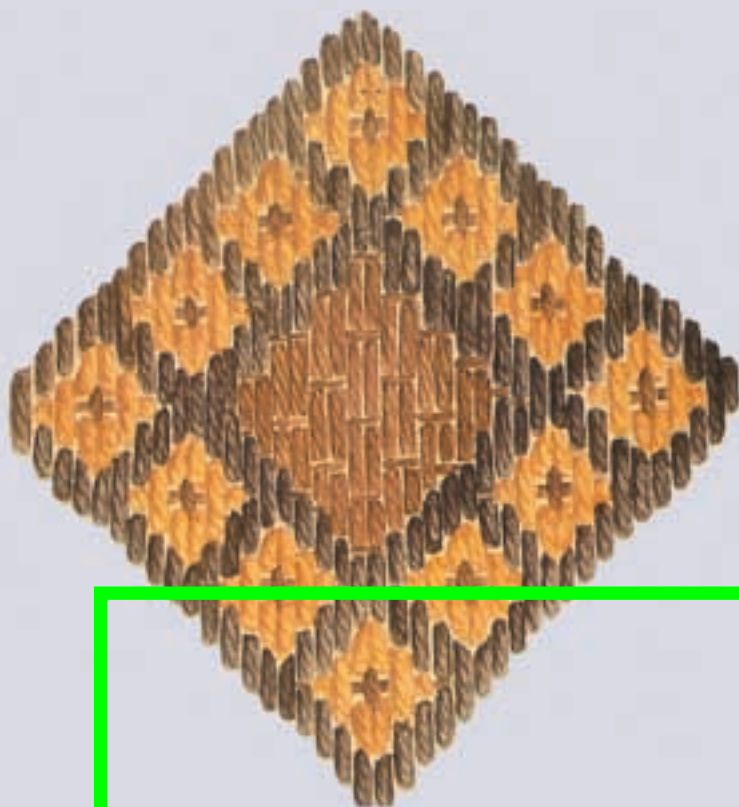
On a déjà beaucoup étudié les tissus minéralisés, mais, jusqu'à ces dernières années, on ne savait pas identifier avec certitude les fibres textiles. La méthode d'analyse mise au point au Centre de recherche et de restauration des musées de France, à Paris (voir l'encadré de la page 40), permet aujourd'hui d'identifier la nature végétale ou animale des fibres, quel que soit leur état de conservation. On détermine ainsi les conditions d'obtention des fibres et les propriétés qui ont motivé leur choix : qualités techniques (facilité de filage, pouvoir hydrophobe, etc.), économiques (facilité d'approvisionnement, produits de luxe destinés aux échanges...), et aussi culturelles (préférence pour tels matériaux, dédain pour d'autres...).

L'analyse d'un ensemble textile de tombes aristocratiques du centre et de l'Est de la Gaule, enrichie d'exemples pris dans les régions limitrophes, révèle les permanences et les évolutions des tissus en Europe celtique sur près de cinq siècles. Ces vestiges de textiles recouvrent les objets des sépultures des princes celtes : d'abord des épées, puis des chars et, enfin, des urnes. Ils nous renseignent sur les pratiques funéraires, les techniques de tissage, ainsi que sur la nature des fibres utilisées.

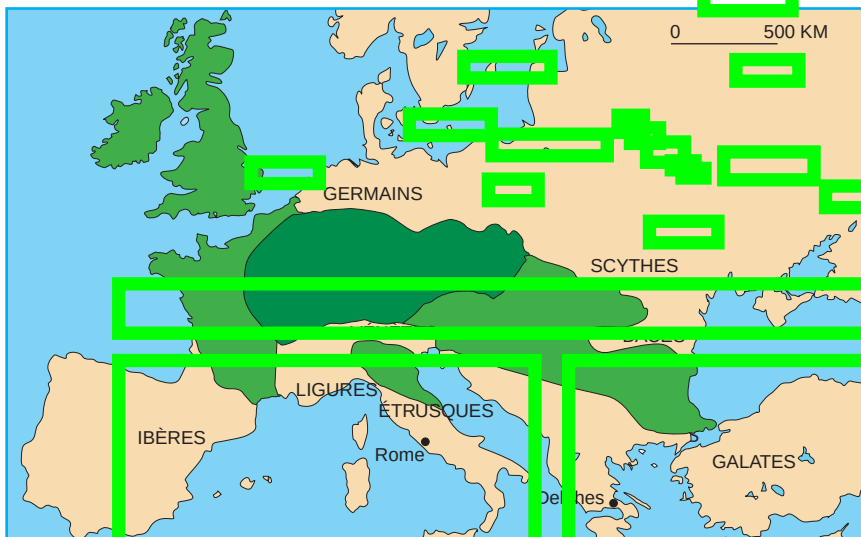
Des épées enveloppées de tissus

À partir du IX^e siècle avant notre ère, de nombreux tertres sont érigés, de la Bohême au centre de la France actuelle. Leur hauteur est généralement inférieure à 1,5 mètre et leur diamètre à 20 mètres. Le mobilier funéraire, c'est-à-dire l'ensemble des objets que contient une tombe, est principalement constitué d'une épée, d'abord de bronze puis de fer, symbole du statut exceptionnel du défunt. Les épées font l'objet d'un traitement particulier où le textile tient une place prépondérante : la plupart conservent sur la lame les restes d'un ou de plusieurs tissus minéralisés. Les autres objets métalliques (rasoir, éléments de harnachement) sont rarement associés à des vestiges organiques.

Le tissu a-t-il été utilisé comme élément de fourreau ? Plusieurs épées de la fin de l'âge du bronze (à Saint-Romain-de-Jalionas, dans l'Isère, ou à Chavéria, dans le Jura) et du début du premier âge du fer (à Soucia, dans le Jura, et à Bastheim, en Bavière) ont été disposées entre deux planchettes de bois, maintenues par une étoffe fixée avec un résidu noir. Dans certains cas, comme celui d'Hossingen (Bade-Wurtemberg),



1. TISSUS CELTES ANCIENS reconstitués, datant du premier âge du fer, dont les vestiges ont été découverts dans la tombe d'un prince, à Hochdorf en Allemagne. Ces tissus décoraient la chambre mortuaire et emballaient les objets précieux avec lesquels était enterré le défunt. Le tissu de gauche a été réalisé au métier à tablettes (une technique qui apparaît au premier âge du fer et permet de produire des tissus élaborés), tandis que le motif de svastikas (croix à branches coudées) sur le tissu en haut à droite, est fait avec la technique de la navette volante (également une nouvelle technique de l'âge du fer) ; à droite, en bas, le losange est l'un des motifs géométriques décoratif que les Celtes affectionnaient à cette époque.



2. L'EUROPE CELTIQUE : territoire originel des Celtes au premier âge du fer (en vert foncé) ; principale zone d'expansion des Celtes au second âge du fer (en vert clair).

le tissu est remplacé par du cuir. Est-ce un fourreau ou bien une simple protection de la lame ? À partir du VII^e siècle avant notre ère, une bande de tissu de cinq à dix centimètres de large enveloppe la lame ; différents tissus peuvent être superposés, comme à Appenwihr (Haut-Rhin). Ces tissus sont une simple protection car le fourreau est parfois posé à proximité de l'épée, comme sur les sites de Clayeures et de Haroué, en Lorraine. Au total, on sait aujourd'hui que l'usage des planchettes maintenues par un tissu est remplacé par celui de l'enveloppement par une bande d'étoffe.

L'analyse des tissus conservés sur ces épées montre que l'apparition de nouveaux systèmes d'entrelacement des fils de chaîne et des fils de trame ont été employés. Ces systèmes, ou armures de tissage, ne peuvent être obtenus qu'avec des métiers élaborés à quatre barres (voir la figure 3). À partir du IX^e siècle avant notre ère, c'est grâce à cette évolution du métier que les armures de tissage se diversifient. L'armure principale est le sergé : le décalage des fils de chaînes au-dessus ou au-dessous desquels passe la trame engendre des côtes obliques (voir la figure 6). On obtient des sergés de types différents en fonction de ce décalage. Par exemple, pour un sergé de 2/2, la trame passe au-dessus de deux fils consécutifs, puis au-dessous des deux suivants, avec un décalage d'un fil à chaque passage de la trame. Le sergé sert de base à d'autres armures dérivées, tels le chevron et le losange, qui apparaissent au même moment. La

qualité et la variété des sergés laissent supposer que des tentatives de réalisation de ces armures ont eu lieu dès la période précédente, dont peu d'éléments nous sont parvenus. Ainsi, une étoffe en sergé avec motifs de losanges, de la fin du II^e millénaire ou du début du I^{er} avant notre ère, a été découverte à Gerumsberg, dans le Sud de la Suède. L'empreinte d'une armure sergée de l'extrême fin du second millénaire a été découverte dans la grotte des Fraux en Dordogne.

Malgré l'apparition de nouvelles armures, la plupart des tissus observés sur les épées sont des toiles, c'est-à-dire les plus simples armures qui soient, où les fils de chaîne alternent au-dessus et au-dessous de la trame (voir la figure 6). Elles sont régulières ou à dominante trame, c'est-à-dire que les fils de trame, tassés, recouvrent les fils de chaîne. Dans toute l'Europe celtique, ces armures sont d'une finesse étonnante et d'une grande solidité.

Grâce à l'identification des fibres, on sait aujourd'hui quand les tisserands ont commencé à utiliser la laine en Gaule. Au premier âge du fer, les Celtes sélectionnant les moutons pour leur toison. La « toison moyennement crineuse » et la « toison de finesse moyenne » sont les plus fréquentes. Elles apparaissent dès la fin de l'âge du bronze et ont été observées au Danemark et dans le Nord de l'Allemagne. La première a des poils qui ont perdu de leur rudesse et se transforment en laine, ainsi qu'une sous-couche laineuse qui s'épaissit. Une réduction supplémentaire du diamètre

des poils accompagnée d'une augmentation du diamètre des fibres de la sous-couche laineuse, marque l'évolution vers la deuxième toison.

De nombreuses variétés de fibres d'origine végétale comme le lin, le chanvre et l'ortie sont utilisées. Le lin est la matière première la plus courante. Son exploitation remonte au néolithique. Les fibres d'ortie sont plus rares dans les tissus. Les plus anciens exemples datent du VIII^e siècle avant notre ère et ont été découverts dans la sépulture de Bohøj, au Danemark, et dans celle de Pierrefitte-sur-Sauldre, dans le Loir-et-Cher. Enfin, plusieurs tissus mélangent des matériaux différents. Sur l'épée de Pierrefitte-sur-Sauldre, certaines toiles sont composées de fibres de lin et d'ortie.

L'usage de textiles associés aux épées, apparu au début du IX^e siècle avant notre ère, se perpétue tout au long du premier âge du fer. À partir du VI^e siècle avant notre ère, quelques cas isolés de poignards comportent des traces de tissus, comme à Larçon (Côte-d'Or) et témoignent de pratiques semblables. Au début du second âge du fer, l'épée en fer de Rascheid (Allemagne du Sud) rappelle les pratiques des périodes précédentes.

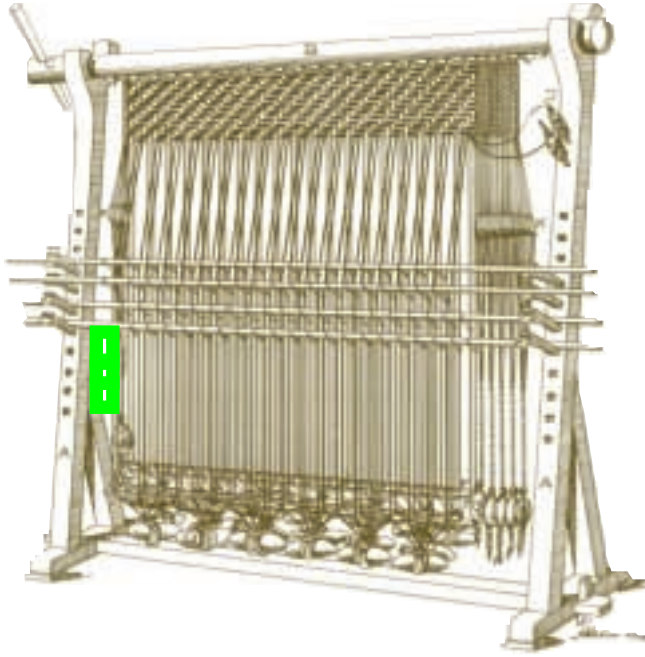
L'enveloppement des épées par du tissu est indissociable des pratiques funéraires aristocratiques du premier âge du fer et se retrouve dans tous les types de sépultures d'Europe celtique.

Les textiles des tombes à char

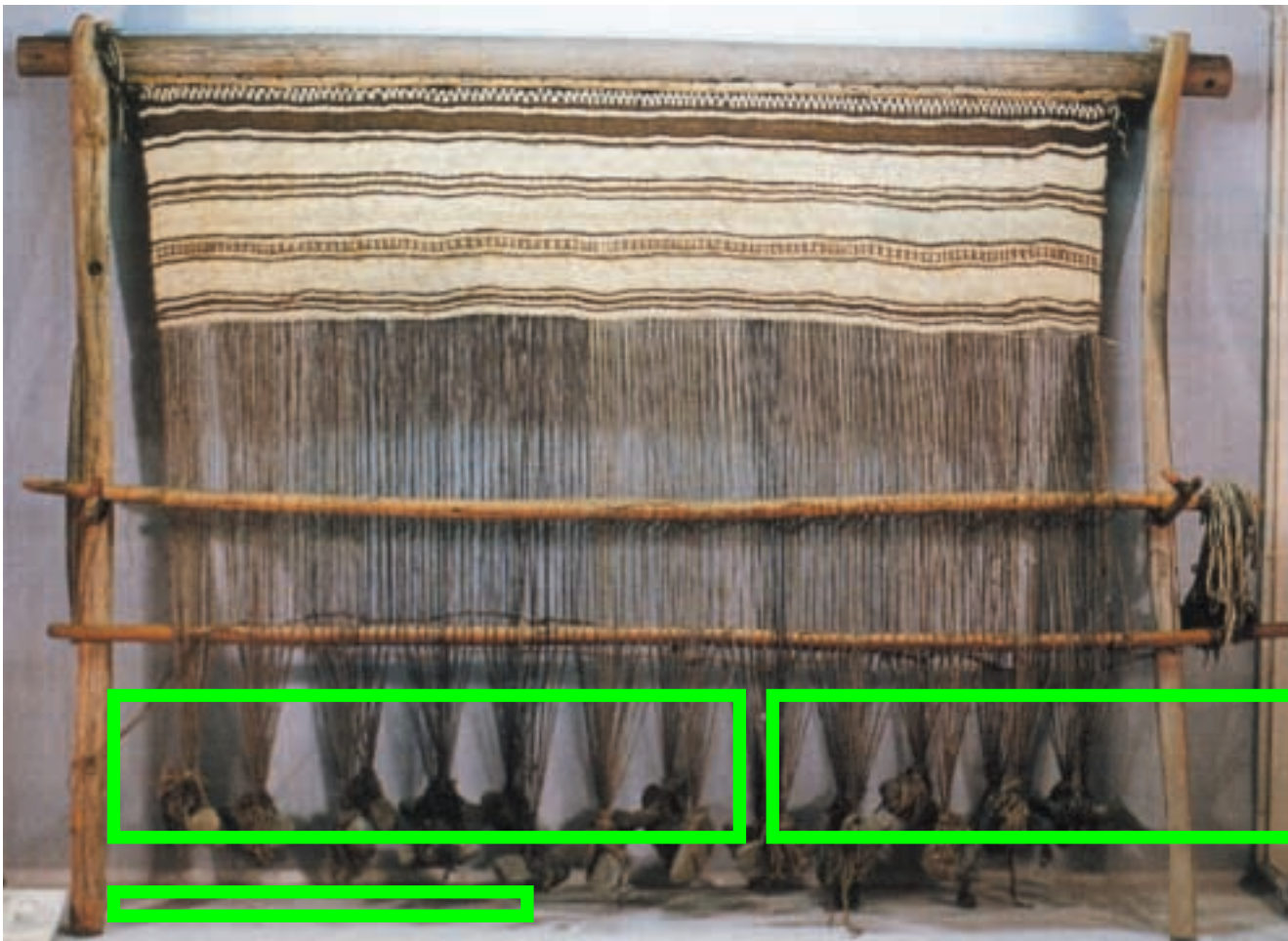
À la fin du VIII^e siècle avant notre ère, les tombes à char succèdent aux tombes à épée. Comme les sépultures précédentes, elles sont disposées à proximité d'un site en hauteur, le long d'axes d'échanges. Elles s'en distinguent, cependant, par un tertre plus large et plus haut, l'intérieur duquel se trouve une chambre mortuaire de planches et de rondins de bois. Un char à quatre roues, de la vaisselle de bronze parfois importée d'Italie et de la parure annuelle en or (bagues, boucles d'oreilles, torques) constituent l'essentiel du mobilier auquel s'ajoutent de nombreuses pièces de tissu.

En 1978, la découverte de la sépulture exceptionnellement bien conservée de Hochdorf, dans le Bade-Wurtemberg, en Allemagne du Sud, a permis d'apprécier l'éventail des

réalisation textiles au cours du VI^e siècle avant notre ère. La chambre mortuaire comporte un trésor textile inestimable : il renseigne non seulement sur l'utilisation des tissus, mais aussi sur leur fonction dans les pratiques funéraires. Le mort repose sur un matelas d'herbes ; il est recouvert de plusieurs lin-couls très fins, dont l'un a une bordure rouge vive. L'assise et le dossier de la banquette en bronze sont cachés par de nombreux tissus. Des étoffes richement décorées de motifs tissés et brodés sont posées sur un chaudron. D'après une nouvelle étude de Johanna Banck-Burgess, de l'Institut de préhistoire et de protohistoire de Freiburg, le mort et l'ensemble des objets de la tombe, y compris le char et les offrandes, sont enveloppés d'étoffes fines. Divers rideaux avec bordures décorent les murs de la chambre.



Karl Schlögl



Textilmuseum Neu

3. MÉTIERS À TISSER à deux barres (*en bas*), à quatre barres (*en haut à gauche*) et aux tablettes (*en haut à droite*), apparus au premier âge du fer et qui permettent de réaliser des tissus complexes. Le principe du métier à quatre barres est le même que celui du métier à deux barres, hérité de la période précédente : chaque fil de chaîne est relié à l'une des barres ; en la tirant vers l'avant, on décale

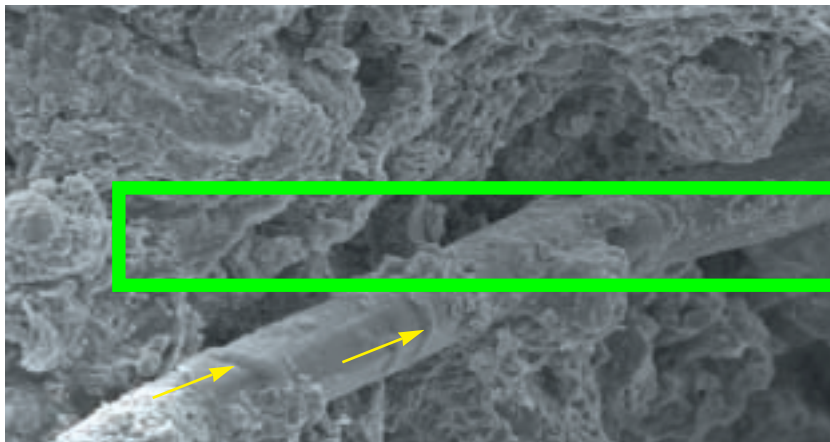
les fils pour créer une ouverture, où passe la trame (*non représentée*). Avec le métier à quatre barres, on peut déplacer quatre groupes de fils différents, ce qui permet de réaliser des tissus plus compliqués. Le métier à tablettes s'utilise en faisant tourner les tablettes dans leur plan, pour créer une ouverture différente entre les fils à chaque passage de la trame.

L'identification des fibres minéralisées

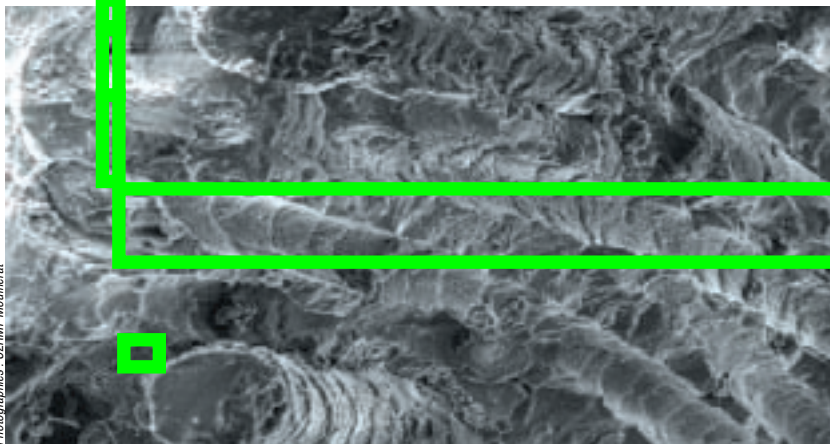
Les méthodes classiques d'identification, telle la microscopie optique à transmission, ne conviennent pas pour l'analyse des fibres minéralisées. Au Centre de recherche et de restauration des musées de France, nous avons mis au point une nouvelle méthode, fondée sur la reconnaissance de la morphologie spécifique de chacune des fibres. C'est une combinaison de la microscopie électronique à balayage et de la microscopie optique en réflexion, qui nécessite une préparation de l'échantillon : on le recouvre d'une mince couche d'or, qui rend la surface conductrice ; puis l'on observe au microscope électronique à balayage. Les principales caractéristiques des fibres textiles sont ainsi dégagées : par exemple, la présence ou non d'écailles (voir la photographie inférieure) ou le groupement des fibres sous forme de faisceau.

L'échantillon est ensuite inclus dans un bloc de résine translucide. Après une polymérisation qui dure au maximum 24 heures, il est poli à la pâte diamantée. La coupe obtenue est observée au microscope optique en réflexion. L'examen des coupes longitudinales et transversales est indispensable à la détermination de la nature des fibres, car chacune d'elles possède ses propres caractéristiques. On mesure le diamètre des fibres pour déterminer la qualité de la toison et l'animal qui l'a fournie ou pour connaître le degré de maturité dans le cas de fibres végétales.

Tout un pan de la culture matérielle jusqu'alors peu connu devient accessible, ce qui ouvre des perspectives d'étude de la gestion des ressources naturelles et de leurs stratégies d'exploitation, soit sur place, soit comme produits d'échange.



Fibres de lin vues au microscope électronique à balayage. La section polygonale et les «genoux» de flexion (sortes de renflement annulaire (flèches jaunes), le long de la fibre, comme sur une tige de bambou) sont caractéristiques de fibres libériennes. Cette fibre provient du site de Lazenay (Cher), V^e siècle avant notre ère.



Fibres de laine de mouton vues au microscope électronique à balayage. La présence d'écailles est le meilleur indice pour distinguer les fibres animales des fibres végétales. Sessenheim (Haut-Rhin), V^e siècle avant notre ère.

Certains de ces textiles peuvent avoir une origine méditerranéenne ; ils auraient alors été réalisés par des techniques différentes de celles qui sont d'habitude observées dans les tombes à char. En revanche, d'autres tissus sont indiscutablement des productions locales : l'armure est un sergé de 2/2 dont les fils de chaîne sont retors (formés à partir de deux fils) de torsion S et les fils de trame sont simples (formés directement à partir des fibres) de torsion Z (voir la figure 6). L'autre type d'armure utilisé est une toile dont les fils sont retors de torsion S et Z. L'uniformité de certaines armures de tissage pourrait indiquer l'existence de conventions qui avaient cours dans les ateliers de tissage. On trouve aussi des étoffes à effets de carreaux et de rayures obtenus par une alternance de couleurs. Dans certains cas, le jeu subtil de la lumière sur la torsion des fils crée un dessin ou accentue un motif.

Cette période est aussi marquée par l'apparition du métier à tablettes. Les tablettes sont des plaques le plus souvent carrées, de cinq à dix centimètres de côté, avec un trou dans chaque coin pour enfiler les fils de chaîne (voir la figure 3). Par rotation des plaquettes, le tisserand obtient une nouvelle ouverture entre les fils de chaîne, à chaque quart de tour ; c'est là qu'il introduit le fil de trame. Ce métier sert à confectionner des articles de faible largeur, mais d'une grande solidité, tels les rubans, lanières, sangles, ceintures et bordures de tissu. Ces dernières se retrouvent en grand nombre dans la tombe de Hochdorf. D'une finesse remarquable et couvertes de motifs complexes, elles sont larges de 1,5 à 4 centimètres et ornent les vêtements de parade, les rideaux et les étoffes des chars.

De nouvelles techniques, telle celle de la navette volante, où des fils de trame supplémentaires sont utilisés pour réaliser un motif au cours du tissage (voir la figure 1), sont observées à Hochdorf. Cette technique, dont les origines remontent au début de l'âge du bronze dans les régions du pourtour des Alpes, comme l'atteste la tenture de Lengenholzen en Suisse, disparaît au second âge du fer.

L'étude des restes organiques révèle la variété des matières premières. La découverte de tissus de laine fine de mouton semble indiquer que les toisons ont évolué par rapport aux périodes

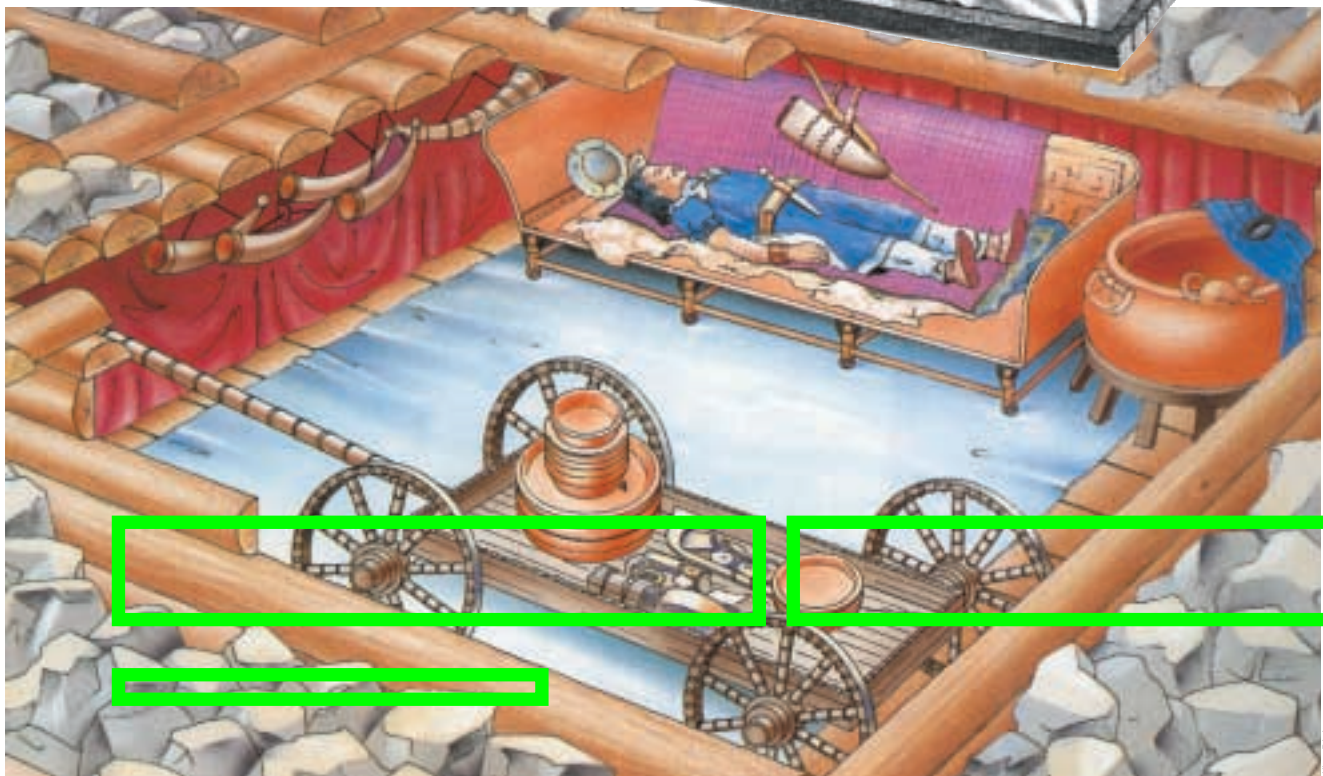
précédents, et que des matières brutes ou des produits finis venaient des cités ioniennes d'Asie Mineure. Ces villes, telle Milet, étaient connues pour leur production de laine de qualité, qui circulait à travers tout le bassin méditerranéen. On a retrouvé dans les tombes celtiques des galons colorés à motifs et des étoffes délicates en fine laine de daim, des cordelettes d'outils en soie de porc, en cins de cheval et en chanvre, des enveloppes de coussins faites à partir d'herbes mélangées et, même, certains tissus en poils de blaireau. La présence de soie, qu'on avait cru avoir identifié dans plusieurs tombes à char, notamment celles de Hohmichele et de Hochdorf, est aujourd'hui démentie. Seule la tombe de Vix (Côte-d'Or) contient les restes minéralisés d'un fil qui pourrait être de soie, mais un doute subsiste sur son identification.

Les Celtes utilisaient des étoffes colorées avec des motifs géométriques (losanges, svastikas, etc., voir la figure 1), à des fins vestimentaires et décoratives. De tels tissus ont été découverts dans plusieurs sépultures princières, où les conditions favorables de conservation ont permis leur préservation sous

une forme non minéralisée. La plupart possèdent des traces de coloration bleue et rouge. Les analyses du manteau du prince de Hochdorf ont montré que le rouge avait été obtenu à partir du kermès (voir *L'archéoteinture*, par Dominique Cardon, page 50), l'insecte *Coccus ilicis*, d'origine méditerranéenne. Cette couleur joue un rôle important dans le culte des morts en Méditerranée : sa présence est un indice supplémentaire des nombreux contacts entre les populations du Nord des Alpes et des régions méditerranéennes. Des objets de prestige, telles certaines pièces de vaisselle métallique (le cratère de Vix ou le chaudron de Hochdorf) et des céramiques à figures rouges ou noires ont été importées. Dans la tombe de Vix, on a retrouvé de

nombreuses traces de bleu et de rouge lors de la fouille en 1953. Le rouge a été obtenu avec du cinabre, un sulfure de mercure, et le bleu avec du silicate de calcium et de cuivre (comme le bleu égyptien), ce qui indique qu'ils ont été importés. D'autres fouilles montrent que le bleu est souvent fait à partir de la gède, une plante qui pousse à l'état sauvage dans de nombreuses régions d'Europe. Le principe colorant est l'indigotine, présente dans les feuilles de la plante.

Ces tissus de qualité sont souvent protégés par d'autres textiles plus grossiers : c'est le cas pour les bijoux et les vêtements somptueux du prince de Hochdorf, ainsi que pour les objets



4. TOMBE À CHAR d'un prince celtique, reconstituée après sa découverte à Hochdorf (Allemagne), par le personnel du musée de Stuttgart. Au premier âge du fer, l'aristocratie celtique se faisait enterrer dans des tombes recouvertes d'un tertre. À l'intérieur, la chambre

mortuaire, représentée ici, contenait des objets précieux. Le char est caractéristique des tombes du VI^e siècle avant notre ère. Une nouvelle étude, publiée en 1999, montre que le mort et la totalité des objets étaient emballés dans des tissus (*en haut*).

d'autres tombes contemporaines. Les tissus de la sépulture de Vix sont remarquables : les quatre roues du char ont été démontées et déposées sur l'un des côtés de la tombe ; initialement, elles étaient recouvertes de plusieurs tissus très fins, réalisés avec un sergé à motif de losanges, eux-mêmes recouverts d'un tissu de laine plus grossier, qui protégeait aussi bien la roue que son premier emballage. Cet usage se retrouve dans de nombreuses tombes fouillées en France, notamment à Aremont (Haute-Saône), à Sainte-Colombe et à Tremblois (Côte-d'Or). Cependant les conditions de conservation empêchent parfois de conclure de façon aussi certaine à la présence de ce type d'emballage.

Ces quelques exemples montrent que les Celtes avaient la volonté d'emballer certaines pièces du mobilier funéraire et, parfois, l'entièreté du char. Dans la partie la plus occidentale de l'Europe celtique, ce sont seulement les

roues qui sont emballées. La quantité et la qualité des étoffes utilisées sont sans doute liées à des préoccupations culturelles. Elles sont aussi l'indice de l'apparition d'une nouvelle classe d'artisans, dont la clientèle est constituée par cette aristocratie désireuse de se distinguer par la possession d'un mobilier exceptionnel.

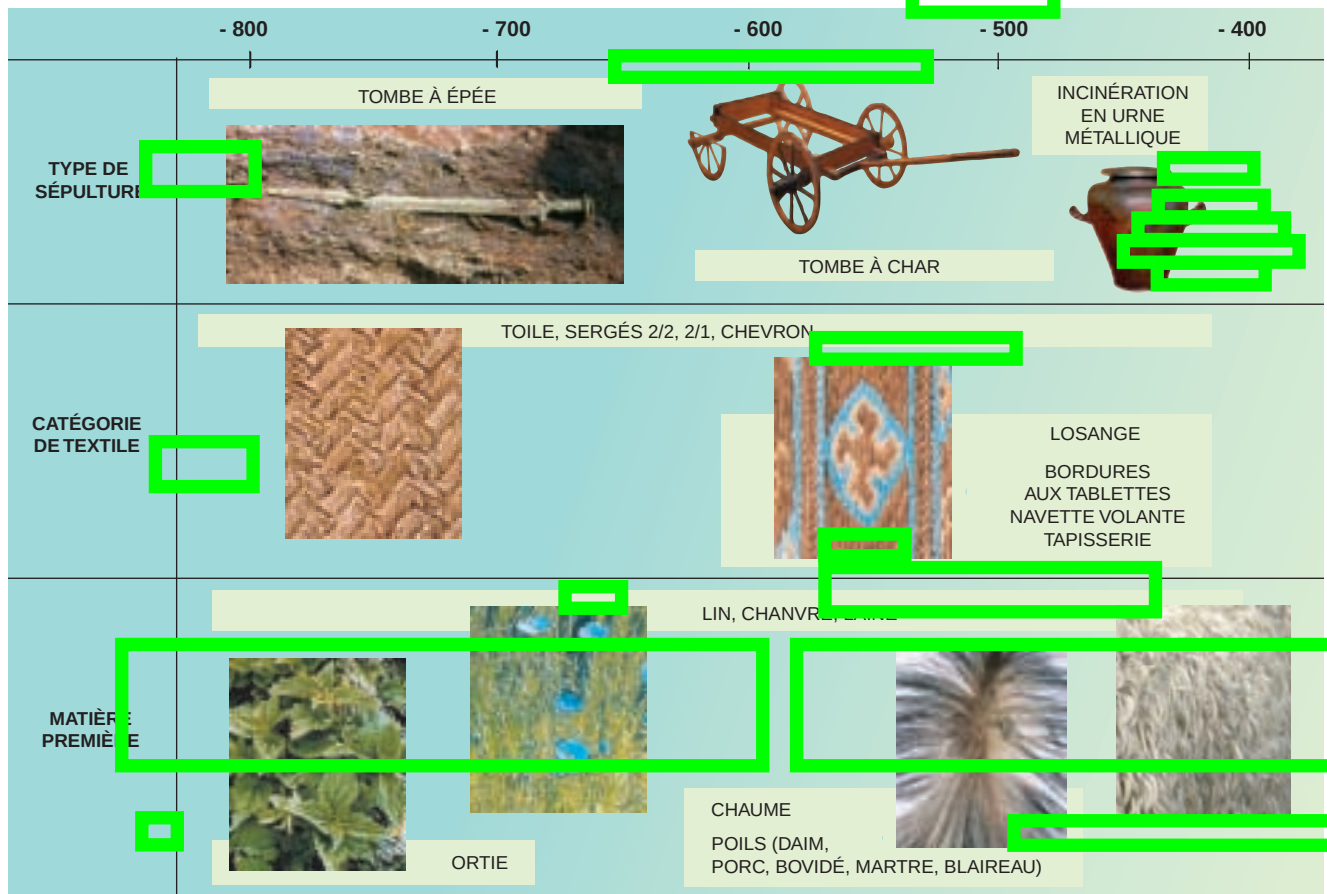
Etoffes et urnes métalliques

La disparition des tombes à char à quatre roues, au début du V^e siècle avant notre ère, ne marque pas la fin des sépultures aristocratiques, mais, plutôt, un changement de rituel funéraire : l'incinération et l'urne métallique se substitue à l'inhumation sur char. Ce phénomène paraît au centre et à l'Est de la Gaule, à l'extrême fin du VI^e siècle, et se perpétue jusque dans la deuxième moitié du V^e siècle. Parallèlement, il s'étend de l'Italie au Danemark. Il se

caractérise par le dépôt des ossements calcinés du défunt à l'intérieur d'un vase métallique.

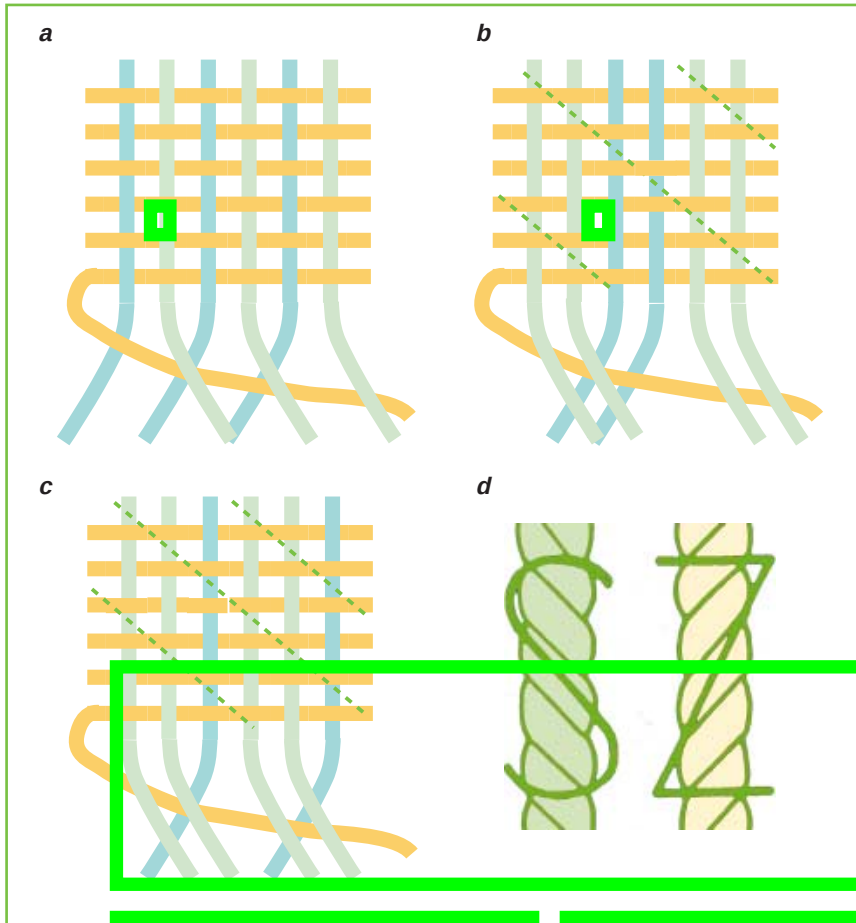
L'utilisation des tissus dans les pratiques funéraires n'est alors pas abandonnée puisqu'on les retrouve associés à l'urne et à son contenu : soit l'étoffe recouvre l'urne métallique, soit elle enveloppe les os du défunt qui sont dans l'urne. Cette pratique révèle une préoccupation religieuse nouvelle, qui vient du bassin méditerranéen, comme l'attestent les nombreuses découvertes effectuées tant en Grèce qu'en Italie et dont certaines remontent au VIII^e siècle avant notre ère.

Les textiles conservés sur les urnes métalliques sont comparables à ceux des tombes à char, tant par leur qualité que par leur variété. Les principales armures sont le sergé 2/2 et, dans une moindre mesure, le sergé 2/1 (voir la figure 6). Des vestiges de bordures réalisées au métier à tablettes abondent. On retrouve certains motifs



5. TROIS TYPES DE SÉPULTURES se sont succédés chez les princes celtes du premier âge du fer : les défunts ont d'abord été enterrés avec une épée, puis un char et, enfin, incinérés en urne de bronze. Les vestiges des tissus qui emballaient ces objets nous renseignent sur les différentes sortes d'entrelacement des fils que

les Celtes utilisaient et sur la nature des fibres qui servaient à fabriquer ces fils (végétale ou animale). Ce tableau chronologique montre l'évolution des types de sépultures, de textiles et de fibres sur près de cinq siècles (du début du IX^e au V^e siècle avant notre ère).



6. ARMURE DE TISSUS (systèmes d'entrelacement des fils). La toile est la plus simple (a) : les fils de trames (horizontaux) passent alternativement au-dessus et au-dessous des fils de chaîne (verticaux). Dans le sergé 2/2 (b), la trame passe au-dessus de deux fils de chaîne puis au-dessous des deux suivants, avec un décalage d'un fil de chaîne à chaque passage de la trame. Le sergé 2/1 (c) est fait sur le même modèle que le précédent, mais la trame passe au-dessous d'un seul fil de chaîne. Les sergés présentent des côtes obliques, dont la direction est indiquée en pointillés. À droite, schémas de fils retors S et Z : tous deux sont composés de deux fils, mais l'enroulement est opposé (d) ; l'inclinaison des spires correspond respectivement à celle de la barre médiane des lettres S et Z.

décoratifs des périodes précédentes, parmi lesquels le losange et le chevron.

Les tissus confectionnés avec des techniques dont on ne connaît pas d'exemple datant du début du premier âge du fer sont plus rares. Citons la technique de tapisserie de la sépulture de Sainte-Geneviève-des-Bois, dans le Loiret, et le sergé avec opposition de liage, c'est-à-dire que, pour deux fils de trame consécutifs, quand le premier passe au-dessus d'un fil de chaîne, le second passe en dessous, et inversement. L'utilisation du kermès d'origine méditerranéenne pour l'obtention du rouge, comme dans la tombe à char de Hochdorf, indique que les objets de ces deux sépultures sont des produits d'importation. Ces exemples montrent les similitudes entre les tombes à char et les incinérations en urne métallique,

ainsi que la pérennité des échanges avec le monde méditerranéen.

À la fin du premier âge du fer, les fibres textiles d'origine végétale sont moins nombreuses que les fibres d'origine animale. La variété que l'on rencontre aux temps des tombes à char diminue nettement ; la préférence est donnée aux laines de toutes sortes et, en premier lieu, à celle des moutons. Cette tendance va se confirmer au second âge du fer, avec l'utilisation quasi exclusive de la laine de mouton.

La fin d'une époque

Le premier âge du fer marque l'apparition d'un artisanat textile de qualité supérieure à celle des tissus de l'âge du bronze. Il se caractérise par la maîtrise technique du métier à tablettes

et du métier à quatre barres, l'apparition de nouvelles sources de colorants, comme les kermès, et l'utilisation de nouvelles fibres végétales et de laines diverses. Malgré une multitude de motifs décoratifs (losanges, svastikas...), l'unité stylistique atteste l'intensification des échanges à longue et moyenne distance, entre le monde celtique en formation et les civilisations du bassin méditerranéen.

Ce phénomène va de pair avec les changements politiques et économiques dont les pratiques funéraires d'Europe celtique renvoient un faible, mais précieux écho. Sans conteste, le début du premier âge du fer inaugure des transformations importantes dans le domaine des rituels funéraires, marquées par l'utilisation spécifique du textile pour l'emballage des biens les plus prestigieux du défunt.

La méthode suivante, au second âge du fer, marque la fin de ces tissus d'exception. Dorénavant, on se limite à certains types textiles comme les toiles et les sergés de 2/2, réalisés exclusivement avec de la laine de mouton. Les tissus se simplifient et s'uniformisent dans une Europe celtique qui s'élargit au Nord de l'Italie, à l'Est de la Bohême et à la façade atlantique de la Gaule. D'autres données archéologiques relatives à l'armement et aux parures corroborent ces tendances. C'est le début d'une autre histoire.

Christophe MOULHERAT est archéologue spécialiste des textiles anciens, au Centre de recherche et de restauration des musées de France.

J. BÄNCKE-BURGESS, *HOCHDORF IV, Die Textilfunde aus dem späthallstattzeitlichen Fürstengrab von Eberdingen-Hochdorf (Kreis Ludwigsburg)*, Kommissionsverlag, Konrad Theiss Verlag, Stuttgart, 1999.

L. BENDER ØRGENSEN, *North European textiles until AD 1000*, Aarhus University Press, Copenhague, 1992.

M. MASUREL, *Tissus et tisserands du premier âge du fer*, Antiquités nationales, Mémoire 1, p. 303, 1990.

M.L. RYDER, *Sheep and Man*, Duckworth, Londres, 1983.

K. SCHLABOW, *Textilfunde der Eisenzeit in Norddeutschland*, Göttinger Schriften zur vor- und Frühgeschichte, Band 15, p. 100, fig. 261, 1976.



Musée historique des tissus de Lyon

L'art de la soie

CLAUDE BERNARD

Au début du XIX^e siècle, grâce à des innovations techniques remarquables et à un changement des mentalités, la France a supplanté ses anciens rivaux du Piémont dans la manufacture du fil de soie.

Selon une légende chinoise, une princesse se promenait, une tasse de thé à la main. Un cocon tomba malencontreusement dans sa tasse, et la princesse tenta de l'en retirer. Or il advint que l'extrémité par laquelle elle l'attrapa était celle du fil qui forme le cocon, lequel se déroula sous l'effet de la chaleur de la boisson : de cette mésaventure naquit, en Chine, il y a près de 4 000 ans, l'industrie de la soie. Les Chinois avaient découvert comment travailler les cocons du ver à soie pour obtenir un fil plus long et plus brillant que toutes les autres fibres naturelles.

Les larves de *Bombyx Mori* construisent des cocons, où elles s'abritent en attendant leur métamorphose et dont elles sortent sous forme de papillon. Avant les fibres de synthèse, on ne disposait pas d'autres fibres aussi longues : chaque cocon de *Bombyx Mori* est constitué d'un brin unique, qui atteint 800 mètres de longueur (les Japonais ont même obtenu, au début du XX^e siècle, des cocons qui donnaient un fil de deux kilomètres).

À l'exception d'une attention toute particulière, on peut le dérouler, telle une pelote de laine (au contraire, quand on travaille des fibres naturelles courtes, on doit en assembler plusieurs, puis les filer, pour obtenir un fil assez long pour être tissé). La fabrication de la soie, par tirage, nécessite des instruments et des pratiques totalement différentes du filage : on commence par immerger les cocons dans de l'eau chaude pour éliminer la colle naturelle (la séricine) qui maintient le brin sous forme de cocon, puis on déroule le brin.

L'élevage des cocons du bombyx et les méthodes de tirage et de filage du

fil de soie se sont progressivement développés sur le pourtour méditerranéen, à partir du Moyen Âge. Le Piémont restera longtemps le pays produisant les fils les plus prisés. Puis, au début du XIX^e siècle, la maîtrise est passée dans le camp français. En retraçant les efforts faits par le gouvernement, les luttes d'influence des producteurs et des entrepreneurs, la «modernisation» de la production et les progrès techniques réalisés, nous avons réexaminé comment les Français ont acquis la maîtrise de la production du fil de soie.

Le fil de soie

La résistance des brins de soie à la rupture est proche de celle du fer (près de 45 kilogrammes par millimètre carré), mais ils sont si fins (15 millièmes de millimètre) qu'on doit en réunir plusieurs pour que le fil soit utilisable. Dans un fil, les brins ne sont pas entortillés, mais juxtaposés : ils adhèrent les uns aux autres par leur propre colle. Les filatures expérimentées réussissaient à remplacer un brin terminé par un nouveau brin, tout en conservant rigoureusement le diamètre du fil. Or la qualité (donc le prix) du fil dépendait de la régularité du diamètre.

La soie brute – la soie grège – est collectée sous forme d'écheveaux sur des dévidoirs, nommés asples. On peut l'utiliser directement, mais diverses techniques améliorent sa résistance et sa compacité. Constituée de brins fins et continus, elle réfléchit mieux la lumière que les fibres courtes, assemblées de façon désordonnée. De plus, les fibres de soie sont dépourvues des petits poils qui recouvrent la surface des fils faits de fibres courtes. Ces caractéristiques

confèrent à la soie sa brillance et son aspect chatoyant.

Toutefois, la qualité des tissus et des vêtements confectionnés avec de la soie grège est médiocre, car le fil est souvent endommagé par les neiges épaisses des métiers à tisser : l'eau chaude ou l'on place les fils pour que la teinture s'imprègne correctement dissout la séricine et démolle les brins, de sorte que leur cohésion diminue et que les fils risquent de se rompre lors du tissage. Les brins et les fibres abîmés sont particulièrement visibles sur ce textile qui réfléchit si bien la lumière.

Au Moyen Âge, pour pallier cet inconvénient, on enroule deux ou plusieurs fils *un sur un* pour obtenir des résistants sur le métier à tisser. La soie obtenue, nommée soie moulinée, s'est rapidement imposée dans l'industrie des textiles de luxe du pourtour méditerranéen.

Soie grège et soie moulinée

Le moulinage manuel est un procédé lent et pénible, qui donne des fils irréguliers et des défauts d'aspect sur la soie. Le filage à la roue est plus rapide, mais le fil n'est pas parfait. Puis, au XIII^e siècle, apparaît, à Lucques, une machine (dont on ignore encore l'origine) : le moulin à soie. D'abord actionnées à la main, puis par énergie hydraulique, ces énormes machines cylindriques, faites de bois, filent plusieurs centaines de fils d'une qualité bien supérieure. Elles se multiplieront, au cours des siècles suivants, surtout en Italie. D'autres instruments, plus simples, mais moins performants, font également leur apparition : l'usage de la soie moulinée se répand, même si l'on continue à utiliser la soie grège tissée pour les vêtements bon marché.

Au XV^e siècle, l'Europe utilise plusieurs sortes de soie ; une bonne part est de la soie grège, importée du Moyen-Orient et moulinée en Europe, le reste venant des pays méditerranéens. La soie moulinée destinée aux vêtements de luxe est l'organsin, fait de fils deux fois moulinés. Depuis la fin du XVII^e siècle, le royaume de Savoie détient le monopole de la fabrication des organsins grâce à ses dizaines d'énormes moulins hydrauliques fonctionnant au Sud de Turin. La qualité des organsins piémontais est sans équivalent. Entre

60 et 70 pour cent de la production d'organsins est exportée vers Lyon. Le «secret» d'un tel monopole tient à divers facteurs : la technique de moulinage, mais aussi l'utilisation d'une soie grège d'excellente qualité, c'est-à-dire parfaitement cylindrique, régulière, fine, résistante et de composition uniforme. Une telle soie exige un triage méticuleux des cocons de qualité, des instruments de tirage et des tours bien conçus, des fileuses expérimentées, une méthode de production très organisée et des

contrôles de qualité stricts. La production de la soie au Piémont répond à toutes ces exigences depuis les années 1670, et pour améliorer la qualité, les fileuses les plus qualifiées ne sont pas payées au forfait, mais selon la qualité des écheveaux produits chaque jour.

Grâce à cette organisation intégrée, le Piémont contrôle la production de la soie moulinée de qualité en Europe pendant près de 150 ans. Au XVIII^e siècle, la France se mesure au Piémont et finira par l'emporter au terme d'une longue



Jean-Loup Charmet



Jean-Loup Charmet

1. LES SOIERIES LYONNAISES (page ci-contre, un fragment de tenture du XVIII^e siècle) ont longtemps été fabriquées avec de la soie importée, celle de France n'étant pas de qualité suffisante. Pour préparer les fils de soie, on élevait des vers à soie avec des feuilles de mûriers que l'on arrachait (ci-dessus, en haut). Les cocons étaient triés (ci-dessus, en bas) et chauffés dans des bassines. Sous l'effet de la chaleur, la colle qui maintenait le cocon assemblé se ramollissait, et l'on pouvait tirer le fil constituant le cocon et l'enrouler sur des asples.

et difficile bataille au cours de laquelle elle améliore ses méthodes de production et d'organisation du travail. Durant l'affrontement se mêlent considérations politiques, problèmes techniques, aspects commerciaux et rivalités locales. À partir des années 1830, la soie française, grège ou moulinée, devient la référence en matière de qualité.

La prééminence lyonnaise

La culture de la soie a commencé en France au XIV^e siècle, probablement pour approvisionner la cour papale, à Avignon. Elle s'est progressivement étendue dans le Midi, mais les aléas climatiques l'ont parfois empêchée de se développer. Ainsi, Henri IV dépense beaucoup d'argent pour encourager son développement près de Paris et de Tours, ou encore en Bourgogne : des centaines de milliers de jeunes mûriers espagnols y sont plantés (20 000 dans le seul jardin des Tuileries, à Paris), et l'agronome Olivier de Serres écrit, en 1599, à la demande du roi, son ouvrage *La cueillette de la soie par la nourriture des vers qu'on la font* ; il répand ainsi l'art d'élever les vers à soie. Il ne reste rien de ce coûteux effort, sinon l'un des meilleurs ouvrages de sériciculture de l'Occident. En fait, il semble que seuls les mûriers poussant dans le Sud résistent à une cueillette annuelle de leurs feuilles.

En revanche, les efforts pour favoriser la fabrication de vêtements en soie ont davantage de succès. Paris et Tours comptent quelques manufactures de vêtements en soie, mais c'est Lyon qui prend la tête. Une loi de 1540

impose que tout produit en soie – les textiles ou la soie quelles que soient sa forme et sa destination – passe d'abord par Lyon pour y être examiné et taxé. Des exportations en tissage et des capitaux y affluent, plaçant la ville dans une position dominante. Sous Colbert, au début de la seconde moitié du XVII^e siècle, Lyon devient le centre de manufacture de la soie de haute qualité le plus performant d'Europe et le restera jusqu'au XIX^e.

Bien que la législation ait favorisé l'importation de la soie et sa transformation à Lyon, d'autres centres se créent, même si leur production diffère : ainsi Saint-Étienne se spécialise-t-elle dans la fabrication des rubans de soie et, au XVIII^e siècle, Nîmes devient l'un des principaux producteurs de bas de soie et de vêtements bon marché en soies mélangées.

Pourtant, à mesure que la manufacture de vêtements de soie augmente, une question se fait de plus en plus lancinante : la production des vers à soie est insuffisante, et le fil produit est de qualité médiocre, de sorte que l'on ne peut fabriquer d'organsins. En 1754, la France utilise 2,5 fois plus de fil qu'elle n'en produit. Elle importe ce qui lui manque principalement du Piémont. Il s'agit notamment de soie moulinée, pour laquelle les Piémontais conservent leur suprématie.

Le gouvernement, conscient de ces difficultés, tente de redresser la situation. Toutefois, au-delà des difficultés techniques, il se heurte aux dirigeants des usines de production de la soie. Pour les producteurs de soie et de tissu du Midi, et pour les entrepreneurs

lyonnais, le rééquilibrage de la balance du commerce avec le Piémont n'est pas une priorité. La soie grège grossière produite dans le Midi suffit à la réalisation d'un tissu bon marché, de sorte que les producteurs de soie ne prêtent guère attention aux efforts du gouvernement, affirmant qu'ils seraient parfaitement capables de rivaliser avec la soie piémontaise, mais qu'ils ont davantage à gagner à produire des qualités inférieures.

Pourtant, à terme, une production de qualité médiocre à faible coût est condamnée, parce que d'autres pays pourront encore faire baisser les prix. En effet, dans les années 1770, les marchés européens sont inondés de soie grège de leur marché en provenance de Chine ou du Bengale ; les petits producteurs européens sont menacés, et la panique gagne aussi le Languedoc et la Lombardie.

Les producteurs lyonnais souhaitent de nouvelles améliorations. Sans doute craignent-ils que les liens commerciaux étroits qu'ils ont établis avec les producteurs piémontais depuis les années 1670 et qui n'ont pas été interrompus par les diverses périodes de troubles traversées ne résistent pas à l'attitude protectionniste du gouvernement, qui cherche à développer l'industrie de la soie dans le Midi. D'autres industriels ou producteurs de vers à soie sont aussi en faveur d'une amélioration de la qualité de la soie et d'une sériciculture plus intensive.

Malgré ces volontés, l'évolution de la production de la soie est très lente : certains projets sont irréalistes, et des conflits d'intérêt éclatent. De surcroît, les producteurs du Midi supportent de plus en plus mal les privilèges accordés aux Lyonnais, ce qui crée un climat de méfiance et ralentit le mouvement de rénovation. Face à ces rivalités et à ces conflits larvés, certains tentent d'imiter la technique des Piémontais pour améliorer la production française. On tente de voler leurs « secrets ». Cet espionnage industriel se concrétise par la construction, en 1721, d'un énorme moulin à soie, à Derby en Grande-Bretagne, une des premières usines de la révolution industrielle britannique... mais toutes les tentatives échouent. Ces échecs résultent d'une foi naïve dans la technique : on oublie l'importance du savoir-faire.



Bibliothèque municipale, Lyon

2. LA MANUFACTURE ROYALE de Montauban, construite au milieu du XVIII^e siècle, devait fournir de la soie grège de très bonne qualité, filée sur des machines plus perfectionnées qu'au-paravant. Toutefois, les manufactures furent souvent considérées comme des usines très chères de construction et d'entretien, et la qualité de la soie grège obtenue était décevante.

Les manufactures royales

Les experts français, ayant une longue expérience de la production de la soie, sont moins naïfs que les Anglais, même si leurs projets sont, parfois, aussi irréalistes. Pour eux, les Piémontais réussissent à produire une excellente qualité, parce qu'ils bénéficient d'un climat favorable à la culture des vers et qu'ils sont soutenus, tant par l'État que par les négociants et par les fabricants. Au contraire, en France, personne ne se sent vraiment concerné par l'amélioration de la production de la soie. Pour pallier ce désintérêt, le gouvernement encourage la création de manufactures royales, des entreprises privilégiées qui fonctionnent grâce à une aide technique et financière de l'État, lequel récompense les innovations. Les manufactures créées doivent servir d'exemples et promouvoir les produits de luxe. Toutefois, la production de soie de qualité ne parvient pas à satisfaire la demande, en dépit de subventions élevées.

Bien qu'elles soient souvent qualifiées de joyaux coûteux et inutiles, ces manufactures contribuent à former des experts, des fileuses et des moulineurs qui, leur apprentissage terminé, retournent dans leur ville ou dans leur village avec un nouveau savoir-faire technique. Elles contribuent au développement de la production industrielle et à la diffusion d'une nouvelle organisation du travail, qui font évoluer les petites unités de production familiales désuètes, inefficaces et dispersées. Certes, les entrepreneurs locaux ne peuvent pas construire des bâtiments aussi chers à construire et à entretenir que les manufactures, mais ils imitent le système de production dans des locaux plus modestes. Progressivement, des techniques performantes s'implantent dans les régions productrices de soie ; l'organisation du travail et la qualification des ouvriers s'améliorent.

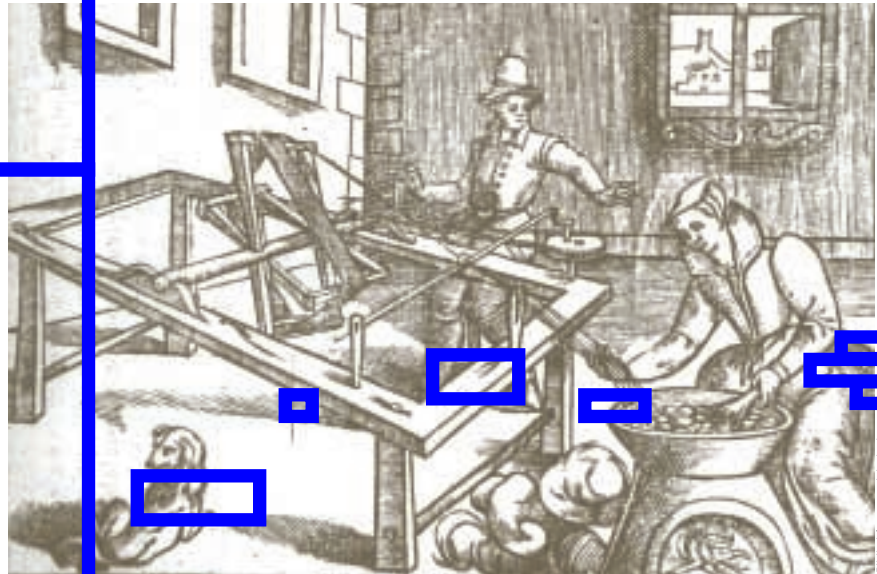
Lorsque les conditions du marché changent et que la concurrence s'intensifie, on se détourne de la production de qualité médiocre à bas prix. Toutes les conditions sont alors réunies pour que se succèdent rapidement plusieurs améliorations notables.

Sous Napoléon, les artisans français sont aussi nombreux et aussi habiles que leurs homologues piémontais. Le temps approche où les innovations ne

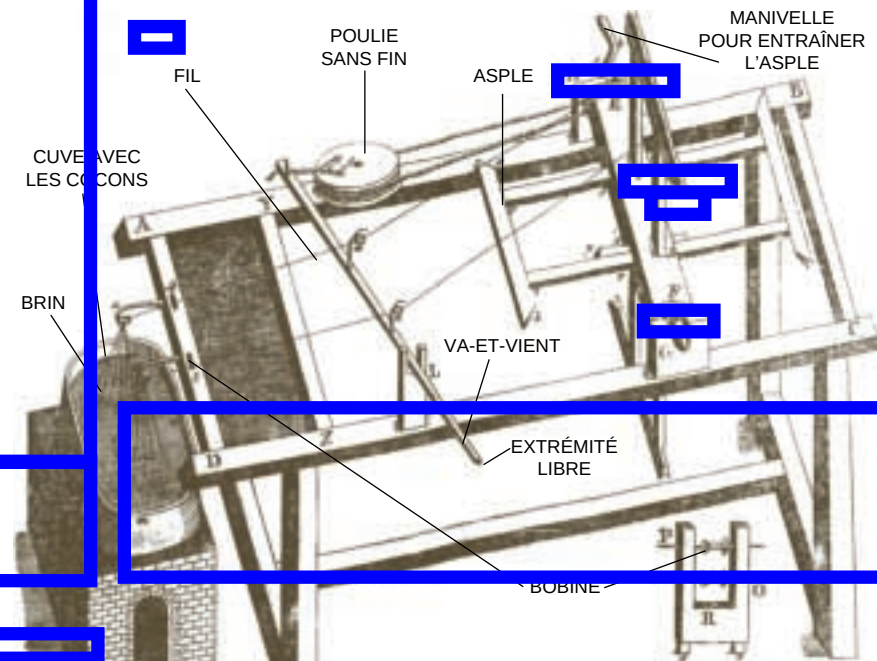
passeront plus du Piémont vers la France mais suivront la route inverse.

Pendant le XVIII^e siècle, les innovations de Jacques de Vaucanson, un fabricant d'automates qui se tourne vers la manufacture de la soie, sont particulièrement inventives. D'autres scientifiques ou hommes d'Église participent à ce courant, notamment Boissier de Sauvages qui s'intéresse à la production des vers à soie, Soumille qui étudie le vitrage des

fil de soie, c'est-à-dire leur rupture lors de la mise en écheveau (des fils humides qui se recouvrent sur l'asple collent les uns aux autres et finissent par se rompre), et Gensoul qui se consacre à l'amélioration du chauffage des cocons, en utilisant la vapeur. Le nombre croissant des innovations montre bien que la population prend conscience qu'il faut trouver des techniques mieux adaptées et abandonner les méthodes



Bibliothèque municipale, Lyon



SAM, Milan

3. LES PREMIÈRES MACHINES à tirer la soie (en haut) étaient très simples : les cocons étaient placés dans une bassine que l'on chauffait, et quelques brins issus de cocons différents étaient tirés ensemble pour former un fil, lequel n'était pas très régulier. L'installation d'une poulie sans fin (en bas) sur les machines à tirer la soie améliore la qualité du fil. Ce dernier passe de la bassine aux bobines (agrandies en bas à droite), où il est aplati. Le va-et-vient répartit le fil sur l'asple de sorte qu'il forme un écheveau plus régulier. Toutefois, la poulie sans fin n'assure pas la formation d'un écheveau parfaitement régulier.

anciennes bon marché, certes, mais peu performantes.

Comparés aux machines piémontaises, les tours français usuels sont encore rudimentaires, les fils étant directement tirés de la bassine à l'asple, après être passés sur une bobine qui les aplatit. Une autre difficulté consiste à répartir uniformément le fil sur l'asple en rotation : on cherche à éviter que le fil humide que l'on enroule ne recouvre le fil encore humide déjà enroulé (on décale progressivement le fil sur l'asple, de sorte que deux sections humides ne se recouvrent pas et ne collent pas, ce qui évite le vitrage).

Une première amélioration (voir la figure 3) consiste à installer une poulie sans fin : le fil formé de plusieurs brins passe par un anneau en métal fixé sur une barre qui sert de va-et-vient. Une des extrémités est reliée à la roue de la poulie sans fin, l'autre est libre. Ce va-et-vient conduit le fil d'un bout à l'autre de l'asple : dès que l'épaisseur du fil enroulé, à gauche par exemple, augmente, le fil se déplace progressivement pour s'enrouler vers la droite et, une fois arrivé en butée à droite, il commence à s'enrouler vers la gauche.

Si ce mécanisme assure un enroulement plus régulier de l'écheveau, il ne donne pas la qualité piémontaise. Le tour du Piémont (voir la figure 4) ne semble guère plus compliqué, mais il produit un fil qui vaut pourtant deux fois plus cher. Sa supériorité repose sur

une série de détails qui n'exigent pas une technique plus difficile, mais une grande habileté et une attention sans faille des artisans. Le four étant mieux conçu, la température de préparation des cocons est constante, et la poulie sans fin avec une courroie est remplacée par un axe rigide et par des engrenages qui ont un nombre de dents calculé précisément, ce qui assure une parfaite répartition du fil sur l'asple. De nombreuses petites améliorations réalisées par une main-d'œuvre qualifiée ont fait le succès du tour du Piémont.

Les manufactures royales tentent d'utiliser ces machines qui ressemblent à ce tour, voire à d'autres plus performants, mais la qualité ne s'améliore pas toujours. De surcroît, l'axe et les engrenages du tour du Piémont sont chers et exigent la présence d'artisans expérimentés pour les réparer en cas de rupture. On ne peut donc pas les installer sur les tours que possèdent les petits fabricants. La production stagne et la qualité progresse peu.

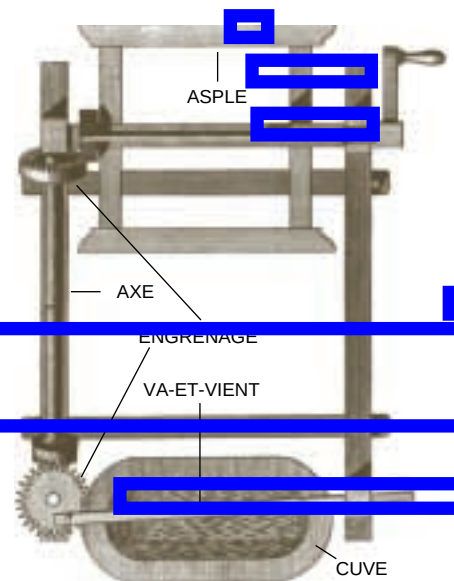
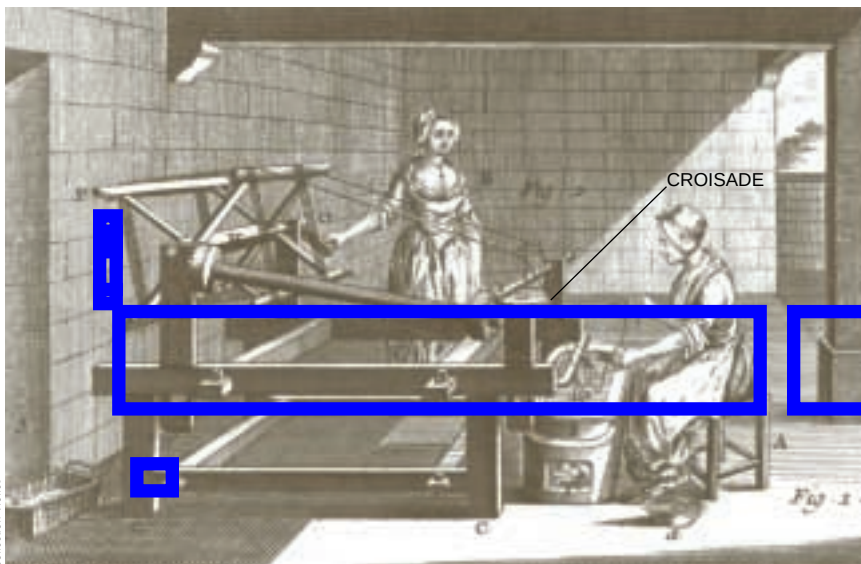
C'est la poulie sans fin, présente sur les tours français les plus rudimentaires de l'époque, n'est pas chère, mais elle ne garantit pas un embobinage régulier des écheveaux : le fil risque de glisser sur la poulie et l'étirement de la courroie varie au gré des changements d'humidité et de température. Les projets qui visent à améliorer les poulies sans fin abondent dans les archives : des dizaines de prototypes sont construits,

mais les meilleures poulies sans fin sont aussi chères et demandent autant d'entretien que les tours à axe rigide, et les résultats restent inférieurs. Heureusement, Vaucanson imagine un ingénieux mécanisme rigide de transmission, qui sera adopté.

Vaucanson remplace la poulie sans fin par un mécanisme à trois engrenages qui commande le va-et-vient ; il en calcule le nombre de dents, afin que la transmission du mouvement au va-et-vient soit parfaitement contrôlée et régulière (voir la figure 5). Ainsi, le fil se répartit régulièrement sur l'asple. S'il «mathématisé» l'enroulement du fil, il perfectionne également la croisade.

Le temps de la croisade

La technique de croisade semble déroutante de simplicité, mais elle est essentielle pour obtenir un fil rond, compact, propre et régulier, de bien meilleure qualité qu'avec des bobines, où les fils sont aplatis et sales. La croisade est l'exemple même d'un petit artifice astucieux, tiré de l'expérience quotidienne, qui améliore la qualité lorsqu'il est intégré dans un système de production performant et utilisé par une main-d'œuvre entraînée. On prend des fils de qualité identique (sinon, le moins résistant des deux casse sous la traction) et on les enroule plusieurs fois avant de les faire passer dans les anneaux de tirage. Les fils subissent ainsi une sorte d'essorage



4. LE TOUR DU PIÉMONT (à gauche, et à droite vu de dessus) produisait une soie de qualité exceptionnelle. Le tour était équipé, non plus d'une poulie sans fin, mais d'un axe de bois et d'engrenages : l'enroulement sur l'asple était parfaitement régulier et évitait le vitrage (la

rupture du fil). De surcroît, deux fils de qualité identique étaient tirés simultanément et enroulés l'un sur l'autre, juste avant de passer dans les anneaux portés par le va-et-vient : cette technique de croisade «essorait» les fils, éliminant l'excès d'eau et les impuretés.

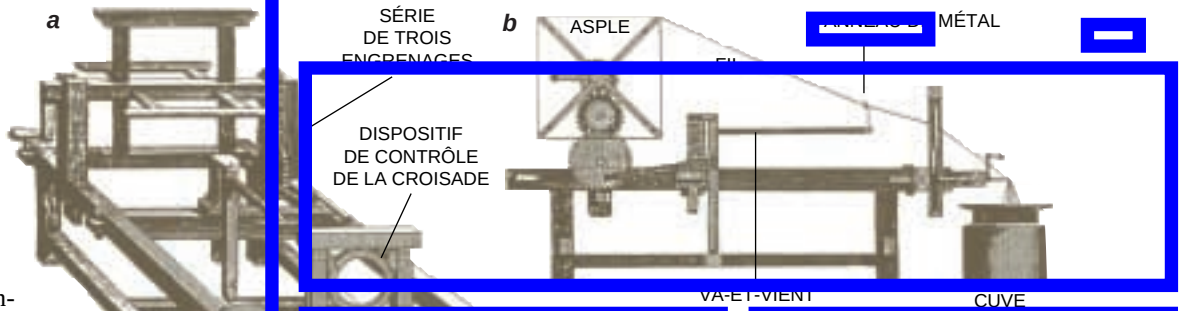
qui élimine le surplus d'eau et les impuretés, et qui les arrondit.

La méthode se répand partout, de sorte qu'à la fin du XVIII^e siècle il est plus fréquent de tirer à la croise que de tirer à la bobine. Plusieurs inventeurs proposent diverses méthodes pour améliorer la croise, notamment la tavelle, qui restera l'un des équipements de croise des plus performants du XIX^e siècle. Comme il est parfois difficile que les deux fils aient les mêmes caractéristiques, c'est le même fil qui, grâce à un jeu de poulies, s'enroule sur lui-même (voir la figure 6).

La diffusion de versions perfectionnées de poulie sans fin et de croise, ainsi que l'amélioration de la qualification des artisans font aussi progresser la qualité de la soie grège du Midi. Même si elle ne rivalise pas encore avec la soie qui sert à la fabrication des organins piémontais, les améliorations se succèdent rapidement chez tous les producteurs français de soie.

En ce qui concerne le moulinage, Vaucanson passe de nombreuses années et dépense sans compter les deniers publics pour mettre au point une nouvelle machine pour les manufactures royales, qui doit supplanter les machines piémontaises. Malheureusement, cette merveille technique est un échec économique cuisant. Elle coûte extrêmement cher à construire et à entretenir. Vaucanson garde jalousement le secret de son invention, et seules quelques machines sont construites avant 1760. Toutefois, malgré ses défauts, cette machine ouvre la voie aux moulins à soie qui

permettront à la France et à l'Angleterre de détrôner le Piémont dans les années 1820. De surcroît, vers 1830, la France acquiert aussi la maîtrise du tirage : elle a enfin réussi à surmonter tous les handicaps qui, durant



5. LE TOUR DE VAUCANSON (a, de face; b, de profil). Le mouvement parfait du fil sur l'asple, dû à un axe rigide qui, comme sur le tour du Piémont, remplace la poulie sans fin. De surcroît, Vaucanson fabrique une série de trois engrenages,

dont il calcule précisément le nombre de dents pour que le mouvement de l'asple, soit parfaitement régulier tout au long du tirage du fil. Ainsi, l'enroulement est parfaitement régulier et reproductible. Vaucanson améliore aussi la croise, en contrôlant la régularité de l'enroulement de fil par une manivelle.

des années, l'ont empêchée de fabriquer une soie de qualité.

Un changement d'échelle

La partie la plus innovante de la nouvelle machine de Vaucanson tient au mouvement des mécanismes. Dans les anciens moulins, le mouvement provenait d'un axe vertical situé au centre, tandis que les fuseaux et les bobines étaient localisés en périphérie. Pour augmenter la production, on augmente la circonférence de la machine ; une augmentation de la circonférence où sont

placés les fuseaux (proportionnelle au rayon) impose une augmentation de la surface occupée (proportionnelle au carré du rayon). Or, la circonférence ne peut dépasser cinq mètres, sinon l'ensemble devient instable ; pour continuer à augmenter la production, on empile plusieurs sections, créant ainsi de gigantesques colosses de bois de 12 à 13 mètres de hauteur qui portent jusqu'à 2 000 fuseaux.

Vaucanson essaie de miniaturiser ces machines. Tout en améliorant la précision des mécanismes, il déplace le centre moteur vers l'extérieur du cadre, de sorte que les courroies qui entraînent les fuseaux se déplacent sur une ellipse. Le moulin carré

ainsi créé est notablement moins encombrant. Malgré les coûts exorbitants des premières machines et les difficultés techniques, notamment dans la mécanique de précision exigée par les engrenages, ces innovations techniques gagnent du terrain : des années d'essais sont nécessaires avant que des machines opérationnelles ne fonctionnent.

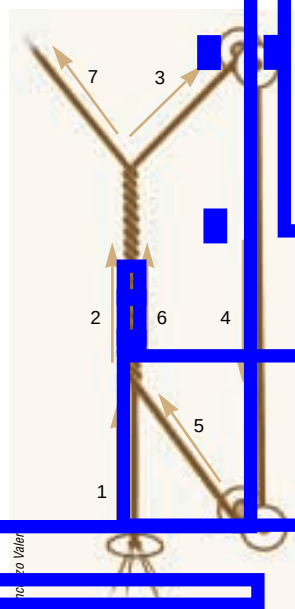
Les améliorations sont facilitées par les progrès de la sidérurgie. À partir des années 1820, de nombreux moulins à soie, tant en France qu'en Angleterre, utilisent des moulins carrés métalliques rapides, performants, d'encombrement réduit, qui supplantent les anciens modèles. Progressivement, l'industrie du fil de soie, qui avait commencé sa révolution dans le Piémont dans les années 1670, atteint sa perfection en France au début du XIX^e siècle.

Claudio ZANIER est professeur dans le Département d'histoire moderne et contemporaine de l'Université de Pise, et membre de l'Institut européen des itinéraires culturels.

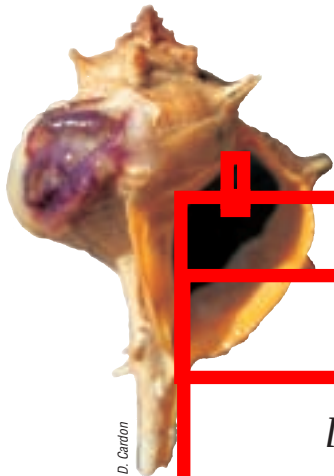
C. POZZI, *Archéologie de la fabrique : la diffusion des moulins à soie « alla bolognese » dans les États vénitiens du XVI^e au XVIII^e siècle*, in *Annali F.S.C.*, vol. 24, n°6, pp. 1475-1496, 1972.

L. TEYSSERE-SALMANN, *L'industrie de la soie en Bas-Languedoc, XVII^e-XVIII^e siècles*, Édition École des Chartes, 1995.

R. TOLAINI, *Progrès technique et perfectionnement des systèmes d'évaluation de la qualité dans l'industrie de la soie*, in *Cahier de métrologie*, vol. 14-15, pp. 205-224, 1996-1997.



6. La tavelle est une autre méthode de croise : le fil qui sort de la cuve monte jusqu'à une première poulie, puis redescend vers une seconde poulie, est enroulé sur lui-même (5), puis est tiré vers l'asple (7).



D. Cardon

Les teintures naturelles

DOMINIQUE CARDON

Après avoir été éclipsées pendant un siècle par les colorants artificiels, les teintures naturelles suscitent à nouveau l'intérêt des industriels, des chimistes et... des archéologues.

En 1856, le jeune chimiste anglais William Perkin entreprend de synthétiser un médicament contre la malaria à partir du goudron de houille. Son expérience échoue : il ne fabrique qu'une substance violette. Toutefois, ce produit, aussitôt nommé mauvéine, est le premier d'une longue série de colorants artificiels qui supplanteront les colorants naturels.

Avant cet événement fondamental dans l'histoire des couleurs, les teinturiers ne disposaient que de colorants végétaux et animaux pour communiquer durablement aux fibres textiles des couleurs différentes de celles qu'elles ont naturellement.

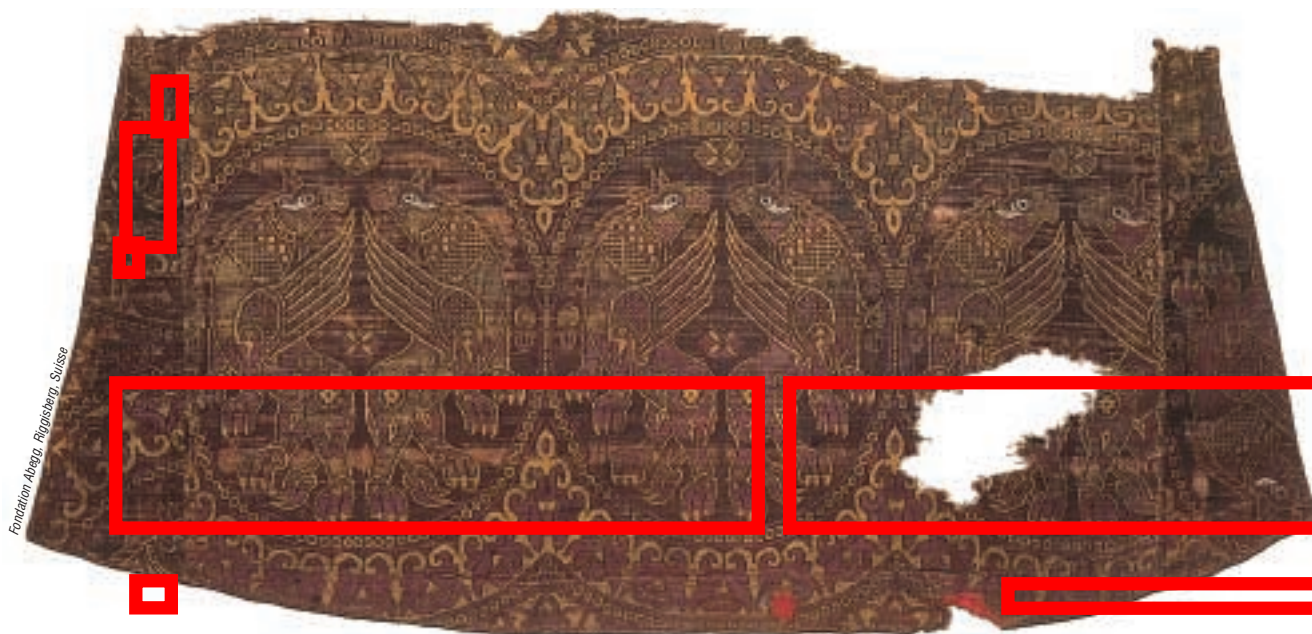
Ces colorants diffèrent de ceux de la peinture, car ils ne doivent pas simplement adhérer à une surface, ils doivent également être solubles pour imprégner le cœur des fibres textiles.

Les colorants artificiels se sont imposés parce qu'ils sont faciles à produire à bas prix. Aujourd'hui, cependant, les teintures naturelles retrouvent une nouvelle importance. Les chimistes et les industriels de la cosmétologie, du textile, de la peinture et du papier, mais aussi les artistes, les artisans teinturiers et certains créateurs de haute couture utilisent de nouveau des colorants naturels ; l'agriculture y voit un débouché d'avenir. Simultanément, les archéologues bénéficient

des progrès de l'analyse des textiles anciens : l'étude des teintures naturelles et l'identification de celles qui restent présentes sur des textiles archéologiques, enrichit notre vision de l'histoire humaine.

Après avoir brossé à grands traits l'histoire des teintures naturelles et synthétiques, nous détaillerons l'analyse des restes textiles de la dépouille du «comte de l'an Mil», un des premiers comtes de Toulouse, retrouvée en 1996 dans un sarcophage, lors de travaux dans une chapelle extérieure de la basilique Saint-Sernin.

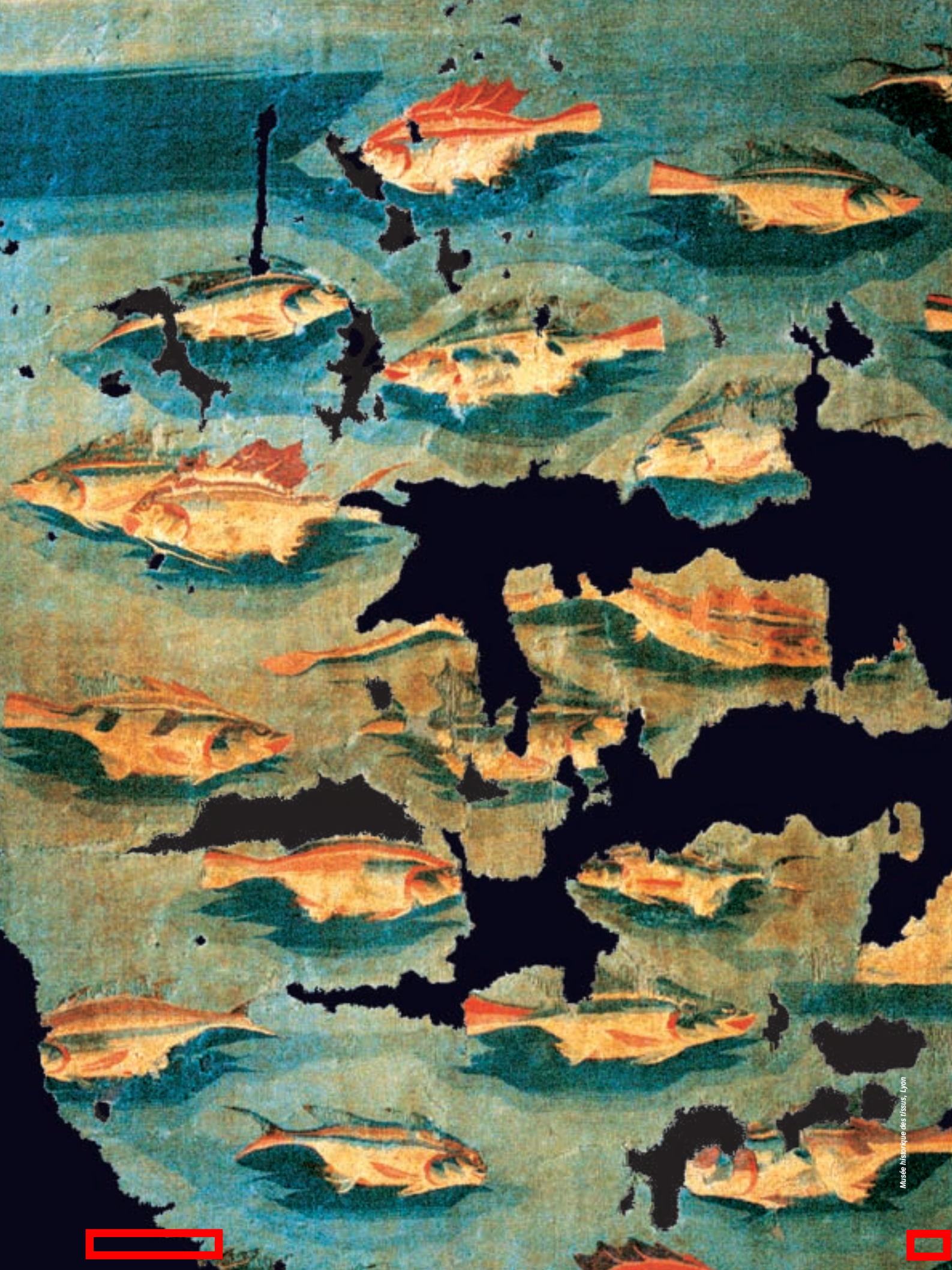
La conquête des couleurs est scandée par une alternance de périodes de stabilité, où les perfectionnements

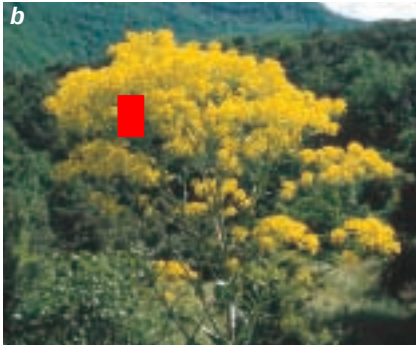


Fondation Abegg, Riggisberg, Suisse

1. CE FRAGMENT DE TUNIQUE, gardé à l'église de Valère, en Suisse, a été probablement tissé à Byzance ou en Syrie au XI^e siècle. La célèbre *Tenture aux poissons* (à droite), conservée au Musée des tissus de Lyon, date du III^e siècle. Ces deux tissus témoignent de la maîtrise et de la sensibilité des teinturiers qui utilisaient les couleurs que leur offrait le monde végétal et animal. Par exemple,

les coquillages à pourpre, notamment les murex (en haut de la page, à gauche), étaient déjà utilisés dans l'Antiquité : la coquille était cassée au-dessus de la glande qui contient le précurseur incolore de la teinture. Ce précurseur vire au violet-rouge quand il est exposé à la lumière. Il faut 10 000 coquillages pour obtenir un gramme de pigment.





sont lents et le nombre de matières utilisées stationnaire, et de soudaines révolutions, déclenchées par l'irruption de teintures nouvelles venues de pays lointains ou fabriquées par l'homme.

Une histoire riche en couleurs

Jusqu'à l'apparition des teintures synthétiques, les peuples de toutes les civilisations ont coloré les textiles à l'aide de colorants présents dans leur environnement naturel ou qu'ils se procuraient par la guerre, par le troc ou par le commerce. À l'exception de quelques argiles, le règne minéral offre peu de substances tinctoriales. Cependant, il fournit des sels métalliques, notamment l'alun (un sulfate d'aluminium et de potassium), utilisé pour accroître l'affinité des fibres textiles pour les colorants naturels par un mécanisme encore trop peu étudié : le mordantage. L'alun se fixe sur les fibres et favorise la fixation des molécules de colorants.

En revanche, le monde vivant

offre une poissonnante richesse de couleurs : les coquillages à pourpre, des insectes tinctoriaux telles les cochenilles, des herbes, des fleurs, des fruits, des racines, des arbustes, des lichens, des algues, des champignons sont les sources d'une infinité de tons de violets, de rouges, de bleus, de jaunes... Les musées du monde entier conservent des œuvres d'art textiles anciennes qui illustrent la beauté et la stabilité des teintures naturelles.

Pourtant, au XIX^e siècle, dans les pays occidentaux, l'essor des industries textiles innombrables consommatrices de colorants, impose une recherche de nouvelles sources d'approvisionnement en teinture. Le battage massif de bois tinctoriaux dans les forêts tropicales et la quasi-disparition du mûrier des teinturiers, en Colombie, et du bois de Brésil dans le pays auquel cet arbre tinctorial a donné son nom est une des manifestations les plus spectaculaires de l'exploitation massive des

couleurs offertes par la nature. Un autre exemple est, en Inde et en Indonésie, la culture des indigotiers sur des millions d'hectares au détriment des



2. LE CYCLE DU PASTEL (à gauche) : les feuilles de gacac (a) sont récoltées, à l'exception de quelques plants qui fourniront des graines lorsqu'ils seront montés en fleur (b), un an après les semis. Les feuilles sont broyées et assemblées en boules nommées cocagnes (c) qui fermentent grâce à des bactéries et à l'oxygène de l'air. Les cocagnes sont ensuite broyées, fermentées à nouveau pour former le pastel agranat (d) qui sera dissous dans des cuves (telles celles découvertes à Nîmes, e), emplies d'eau alcalinisée par des cendres de bois ou par de la chaux. Les fibres sont alors trempées autant de fois nécessaires pour obtenir la teinte recherchée (f).

cultures vivrières qui a provoqué la sanglante « Révolte de l'Indigo » au Bengale, à la fin du XIX^e siècle. Les chimistes cherchent alors des teintures de remplacement.

L'invention des teintures synthétiques résout ainsi un problème mondial d'approvisionnement. Cependant, chaque nouvelle conquête de la chimie entraîne l'abandon d'une famille de colorants naturels et, ainsi, l'écroulement d'une économie fondée sur leur production, leur transformation, leur transport et leur commercialisation. Les échanges internationaux en sont bouleversés. Par exemple, en 1896, l'Inde recense 1 683 328 hectares d'indigotiers ; 60 ans plus tard, le pays n'en compte plus que 289. En 1897, l'Allemagne importe annuellement 1 400 tonnes d'indigo naturel ; en 1904, elle exporte 8 700 tonnes d'indigo synthétique.

Ce triomphe des teintures de synthèse inaugure aussi une longue période de désintérêt envers les substances colorantes naturelles. Ainsi, aujourd'hui encore, on ne connaît pas toutes les molécules colorantes des plantes, des mollusques et des insectes, qui sont pourtant utilisées depuis les temps préhistoriques.

Un îlot de résistance

Toutefois, la sensibilité de quelques artistes et l'attachement de certains peuples à leurs techniques ancestrales ont évité que ce patrimoine culturel ne tombe dans l'oubli. Les ethnologues et les historiens des sciences et des techniques ont recensé, sur le terrain ou dans les archives, les recettes et les tours de main des teinturiers d'époques et de pays divers.

Les connaissances sur la chimie des plantes tinctoriales progressent aussi, car certains groupes de colorants ont aussi des propriétés médicinales. Par exemple, les flavonoïdes jaunes sont utilisés contre le cancer ou pour protéger les vaisseaux sanguins.

Depuis 30 ans, initié par le mouvement hippie et l'engouement pour le naturel, l'intérêt pour les teintures naturelles semble renaître. Aujourd'hui, soutenu par les progrès de la conscience écologique dans l'opinion publique, cet intérêt se traduit par des expositions de teintures d'importance historique, telle celle consacrée

à l'indigo, en 1987, à Marseille ; par des ouvrages de synthèse sur l'histoire et la chimie des teintures naturelles ; par des congrès internationaux où se rencontrent des chimistes, des historiens, des industriels, des teinturiers, des ethnologues...

Pendant l'un des derniers, organisé à Toulouse en 1995, auquel était associée une exposition d'œuvres d'art textiles et picturales contemporaines réalisés avec des teintures et des pigments naturels, nous avons reconstitué, d'après un traité technique florentin de 1418, la cuve de teinture au pastel : cette plante, dont on extrait un colorant bleu, est la seule source d'indigo indigène en Europe. Les feuilles de la guède, ou pastel, sont récoltées dès la première année des semis. Quelques plants laissés en terre, après leur floraison, fournissent, l'année suivante, des graines. Pour extraire les colorants, les feuilles de guède sont broyées en une pâte que l'on assemble en boules nommées coques ou coquilles, qui fermentent. Pour teindre, on utilise le pastel agranat, obtenu en broyant les coques en milieu humide, où elles sont à nouveau fermentées. Grâce à ces fermentations dues à des bactéries en présence de l'oxygène de l'air, les précurseurs incolores de la plante sont transformés en indigoïne colorée. Dans la cuve, le pastel agranat est ensuite solubilisé en milieu rendu alcalin par des cendres de bois (elles contiennent de la potasse) ou de la chaux. Les textiles sont trempés et, au sortir de la cuve, l'oxygène fait précipiter les colorants à la surface

et au cœur des fibres. La teinte obtenue – du clair au très foncé – dépend du nombre de bains successifs (voir la figure 2).

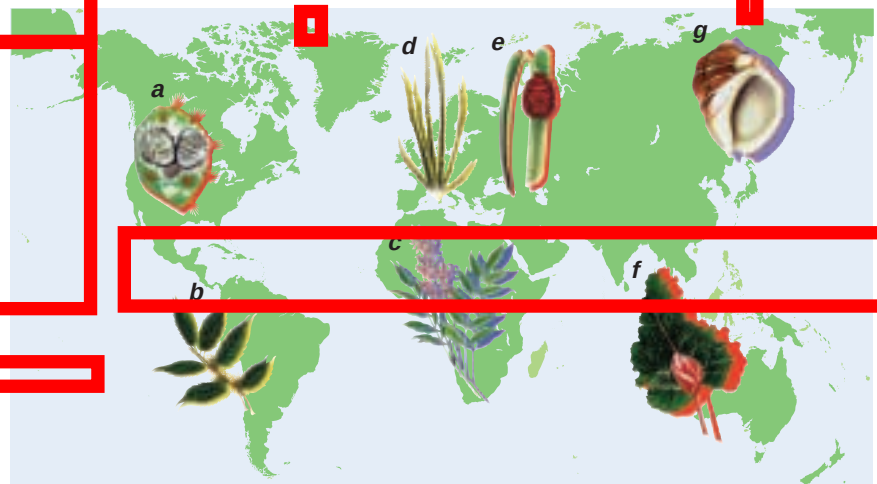
Autre ligne de renouveau : depuis quelques années, les cochenilles du cactus sont de nouveau élevées dans la province d'Oaxaca, au Mexique. De ces insectes de la famille des coccidés, on tire une teinture écarlate, qui est le seul colorant animal et l'un des rares colorants rouges alimentaires et pharmaceutiques autorisés par les réglementations américaine et européenne.

Ce retour aux teintures naturelles ne concerne pas seulement les historiens : il présage aussi de futurs développements économiques.

Des enjeux économiques certains

En Europe, la remise en culture intensive de plantes tinctoriales, qui restent à sélectionner, pourrait éviter la mise en jachère d'une partie des terres agricoles. Par ailleurs, un programme de recherche européen sur la culture et l'extraction de teintures naturelles à usage industriel dans la production de textiles naturels associe le département de l'agriculture du Land de Thuringe et l'Institut de recherches agrochimiques de Bristol.

Des expériences similaires ont eu lieu ou se poursuivent en Italie et en France. Par exemple, en partenariat avec la Société *Bleu de Lecture* et plusieurs coopératives agricoles du Sud-Ouest de la France, le Centre d'application et de traitement des agroressources



3. DES VÉGÉTAUX ET DES ANIMAUX VARIÉS du monde entier contiennent des molécules qui peuvent servir à teindre : la cochenille d'Amérique (a), le mûrier des teinturiers (b), la liane-indigo (c), la gaude (d), la cochenille d'Arménie (e), le suranji (f) et *Mancinella bufo* (g).

de l'Université de Toulouse commence à extraire industriellement de l'indigo à partir du pastel. En Provence, au printemps 1959, l'Association *Filières colorants naturels* a remis en culture des plantes tinctoriales telles la garance, la renouée des teinturiers, la gaude et la sarrette. De tels essais, nécessairement pluridisciplinaires, concernent d'abord un nombre limité d'espèces végétales choisies parmi celles que l'histoire de la teinture a retenues. Les botanistes amélioreront ensuite la production par des sélections des variétés selon leur rendement, selon leur concentration en colorants ou en pré-curseurs, et selon leur adaptation à divers sols et climats.

Dans les pays en développement, la culture de plantes tinctoriales est de nouveau une source de revenus pour certaines populations rurales, surtout quand elle s'intègre à une filière de production de textiles qui privilégie l'arsenal tinctorial traditionnel et les couleurs de la culture populaire. La valeur ajoutée peut devenir notable.

Par exemple, depuis les années 1980, dans le cadre du Projet *Dobag*, avec le soutien de l'Université d'Istanbul, des tisserandes turques regroupées en une coopérative autogérée et parrainée par la reine de Norvège n'utilisent que des laines filées à la main et des teintures végétales

récoltées localement. Ces tapis sont achetés par une clientèle internationale sensible à la richesse de leurs couleurs. Ainsi, les teintures naturelles semblent redevenir des matières premières d'avenir.

Les teintures de l'histoire

En outre, les teintures sont des sources précieuses d'information qui éclairent le passé. Présentes sur les textiles anciens, de nombreuses teintures naturelles fournissent parfois des indices de lieu ou de la date de fabrication de ces textiles, mais aussi de l'importance du commerce international en vigueur à l'époque et, même, du statut social et des goûts vestimentaux d'individus ou de groupes.

L'étude historique des teintures anciennes requiert des méthodes de travail très variées et des collaborations entre des historiens, des biochimistes et des chimistes spécialisés. Je collabore depuis plusieurs années avec le Laboratoire de botanique et de phytochimie de la Faculté de pharmacie de Montpellier et avec le Laboratoire de recherche des monuments historiques de Champs-sur-Marne. Le travail commence par la recherche et l'étude des recettes anciennes de teinture, afin d'identifier les colorants utilisés préférentiellement à telle ou telle époque et dans telle région du

monde. La contribution des sciences humaines est indispensable : ainsi, certaines recettes qui datent de plus de 2 500 ans ont été rédigées en écriture cunéiforme sur des tablettes d'argile ; une lecture des tablettes est un premier pas qui détermine la suite des recherches. On récolte ensuite les plantes et les animaux tinctoriaux mentionnés dans les recettes anciennes pour reproduire celles-ci. Par comparaison avec les échantillons ainsi obtenus, on identifie les teintures anciennes.

Parallèlement, les biochimistes caractérisent les composants des plantes ou des animaux tinctoriaux qui se fixent effectivement sur les fibres textiles. Ces comparaisons sont parfois difficiles, car les colorants sont souvent dégradés, mais les chimistes ont adapté les protocoles d'analyses à l'étude des textiles archéologiques. L'identification des teintures sur des textiles qui semblent complètement brunis est souvent possible : elle permet alors la reconstitution des couleurs d'origine de l'objet.

Parmi les techniques d'identification les plus employées, les techniques chromatographiques, notamment la chromatographie liquide de haute performance, séparent les constituants d'un mélange selon leurs affinités pour un solvant. Ces techniques imposent le prélèvement d'un fragment de fil



Paul Starosta



D. Cardon



D. Cardon

4. LE KERMÈS DES TEINTURIERS est un parasite du chêne kermès. Les femelles meurent et deviennent des petites boules grises où les œufs fécondés se développent avant d'éclore (à gauche). Toutefois, les femelles adultes sont recueillies avant l'éclosion des œufs, en mai, puis broyées à raison d'environ 70 insectes pour un gramme de teinture écarlate (au centre). Par exemple, le Manteau de Notre-Dame de la Victoire de Thuir (à droite), du XII^e siècle, a été teint avec du kermès.

d'une dizaine de millimètres de longueur : lorsqu'un tel prélèvement est possible, l'analyse, très précise, distingue des molécules colorantes chimiquement très proches ou les différents composants de teintures obtenues en plusieurs bains.

Toutefois, certains tissus sont trop précieux pour que l'on puisse en prélever des fragments. Aussi, le Centre Ernest Babelon, à Orléans, et le Laboratoire de spectrochimie infrarouge et Raman à Thiais, utilisent des techniques non destructrices d'analyses spectrométriques qui identifieront peut-être les teintures sans prélèvement, ni déplacement des documents.

Aujourd'hui, chaque nouveau résultat d'analyse de colorants modifie notre vision des mondes anciens. Ainsi, des collègues japonais ont montré qu'un fragment de tissu de soie resté collé à un bracelet de nacre

du I^{er} siècle avant notre ère est teint avec de la pourpre extraite d'un mollusque vivant dans la mer du Japon (voir la figure 3). Ce minuscule fragment, découvert dans l'une des 2 500 urnes funéraires du tumulus de Yoshinogari, dans l'île japonaise de Kyushu, révèle donc que l'engouement pour la pourpre s'étend, à cette époque, de la proto-civilisation Yayoi au monde romain ! Plus récemment, ces techniques nous ont permis d'analyser les restes textiles de la dépouille d'un des premiers comtes de Toulouse.

Le «comte de l'an Mil»

En 1996, les travaux d'aménagement d'un parking autour de la

basilique Saint-Sernin, à Toulouse, ont mis au jour un sarcophage qui abritait une dépouille qui, selon les historiens, est celle du père (Raïmond I^{er} Fon) ou du grand-père (Raïmond II) de Guillaume III Taillefer (947-1037), comte de Toulouse. Les archéologues Éric Crugézy et Christine Dufaufait, dépêchés sur place en urgence, en ont alors étudié le contenu. Nettoyés par la restauratrice Danièle Nadal, les restes du costume funéraire n'ont été confiés. Les fragments d'étoffes étaient de cinq types : deux toiles de lin non teintées, de finesse différentes ; un sergé de laine, de couleur brune à brun-rouge ; un tissu d'une tunique dont les fils de chaîne en lin, et les fils de trame, en coton, dessinent une armure losangée ; et plusieurs brides très fines de soie, presque noires.

Lorsqu'il est mouillé, le tissu de la tunique dégorge un liquide jaune, mais aucune teinture n'a pu être identifiée. Le motif en losanges, typique des goûts dominants dans l'aristocratie carolingienne qui régnait alors sur l'Europe occidentale, est un héritage germanique et celtique, tandis que la technique de tissage était répandue dans le monde islamique, qui s'étendait à cette époque jusqu'en Espagne. Ce tissage atteste que cette région était au carrefour de deux mondes.

Le sergé de laine foulé est celui d'une paire de chausses qui remontaient jusqu'en haut des cuisses du défunt et dont une grande partie était conservée. Une première analyse d'un échantillon prélevé sur une partie encore rouge, effectuée par Penelope Rogers, du Centre de recherches textiles, à York, a montré qu'il s'agissait d'une teinture extraite d'insectes. Des analyses complémentaires, menées par Jan Wouters, de l'Institut royal du patrimoine artistique, à Bruxelles, ont confirmé la présence d'acide kermésique, le constituant majoritaire de

la teinture extraite d'insectes nommés kermès. Malgré le piètre aspect des lambeaux brunis (voir la figure 5), éparpillés dans

ce sarcophage, la finesse exceptionnelle des textiles de lin, les brides de soie et, surtout, les chausses, dont la teinture — la plus chère de l'Occident médiéval — a requis le sacrifice d'au moins 50 000 kermès, prouvent le caractère somptueux du costume du comte.

Pour la teinture au kermès, les femelles adultes sont récoltées en mai, lorsqu'elles sont mortes, elles hébergent des milliers d'œufs fécondés qui se développent dans leur corps. Séchés, les insectes sont alors broyés dans un mortier puis versés dans de l'eau portée à ébullition. D'après les recettes anciennes, le poids de la poudre colorée devait être au moins égal au poids de la laine à teindre afin d'obtenir un rouge très vif, nommé écarlate (voir la figure 4). Auparavant, les fibres de laine ont été dégraissées, puis bouillies dans une solution d'alun, à raison de 20 pour cent du poids de laine sèche. Les fibres ainsi mordancées étaient enfin plongées dans le bain de teinture porté à ébullition.

Le monopole des teintures synthétiques a suivi le long règne sans partage des teintures naturelles. Aujourd'hui, les deux sources cohabitent : les couleurs synthétiques des chimistes répondent aux besoins d'une production textile de masse destinée à vêtir une population mondiale sans cesse croissante, tandis que les teintures naturelles composent une autre palette et font le bonheur des consommateurs sensibles à la beauté unique des couleurs et des historiens qui savent les débusquer dans la grisaille de l'oubli.

Dominique CARDON est historienne au Laboratoire d'histoire et d'archéologie des mondes chrétiens et musulmans du Moyen Âge, du CNRS, à Lyon.

Dominique CARDON et Gaëtan du CHATONNET, *Guide des teintures naturelles*, Delachaux et Niestlé, 1990.

Seacrom : *Le secret des couleurs*, Éditions Carré Multimédia, 1997.

Dominique CARDON, *La draperie médiévale en Europe*, CNRS Éditions, 1999.

Musée national des arts et traditions populaires, *Des teintures et des couleurs*, Réunion des musées nationaux, 1988.

5. LES CHAUSSES du «Comte de l'an Mil», retrouvées dans un sarcophage, à Toulouse, ont été teintées avec environ 50 000 insectes, nommés kermès.



L'avènement des colorants synthétiques

GEORGES DARRAS - NOUËN THOMAS - ANIM

Les changements techniques étaient aussi rapides dans le passé qu'aujourd'hui, et certaines «start-up» chimiques gagnèrent le gros lot. En quelques années, la révolution des colorants synthétiques balaya les colorants naturels.

Au XIX^e siècle, l'essor de la chimie sous-tend celui de l'industrie textile européenne qui fabrique de nouveaux détergents pour dégraisser les fibres, de l'eau de Javel pour les blanchir, etc. Parallèlement, la synthèse de toute une gamme de colorants synthétiques donne naissance aux industries chimique et pharmaceutique modernes.

Avant les années 1850, les seuls colorants utilisés étaient d'origine végétale ou animale. En France, la culture de la garance, d'où l'on extrait un colorant rouge, prospérait en Alsace et faisait la fortune du Vaucluse. L'indigo pour le bleu, le bois de campêche pour le noir, le mûrou pour l'orangé-rouge et les cochenilles pour le rouge étaient quelques-uns des produits importés du monde entier en quantités croissantes. Dans ses *Mémoires*, Conan Doyle note que le prix d'un sac de cochenilles, en 1881, correspond à environ deux ans de sa solde de médecin de la marine marchande.

Afin d'obtenir d'autres couleurs, les chimistes cherchent d'abord à modifier les produits naturels. Ainsi, l'un des premiers colorants synthétiques, le murexide, est préparé par réaction de l'acide urique avec l'acide nitrique. Son nom évoque la pourpre des Anciens, ou «pourpre de Tyr», extraite d'un coquillage, le murex (voir *Les teintures naturelles*, par Dominique Cardon, page 50). Le murexide et ses propriétés colorantes étaient connus depuis la fin du



XVIII^e siècle, mais sa préparation a été longtemps entravée par la rareté de l'acide urique, que l'on devait extraire de l'urine de mammifères, surtout les carnivores. En 1835, le guano du Pérou commençait à être importé en Europe. Utilisé comme engrais, il se révèle également une source commode d'acide urique, ce qui permet la production du murexide en France, à partir de 1855. Ce colorant a un grand succès : on le présente comme la pourpre de Tyr redécouverte, et des démonstrations de teinture sont organisées devant Napoléon III, aux Tuileries. Malgré tout, le guano coûte encore cher, et le murexide est bientôt concurrencé par la nouvelle génération de colorants préparés à partir du goudron, sous-produit de l'industrie du gaz d'éclairage ; dès 1863, sa production est devenue négligeable.

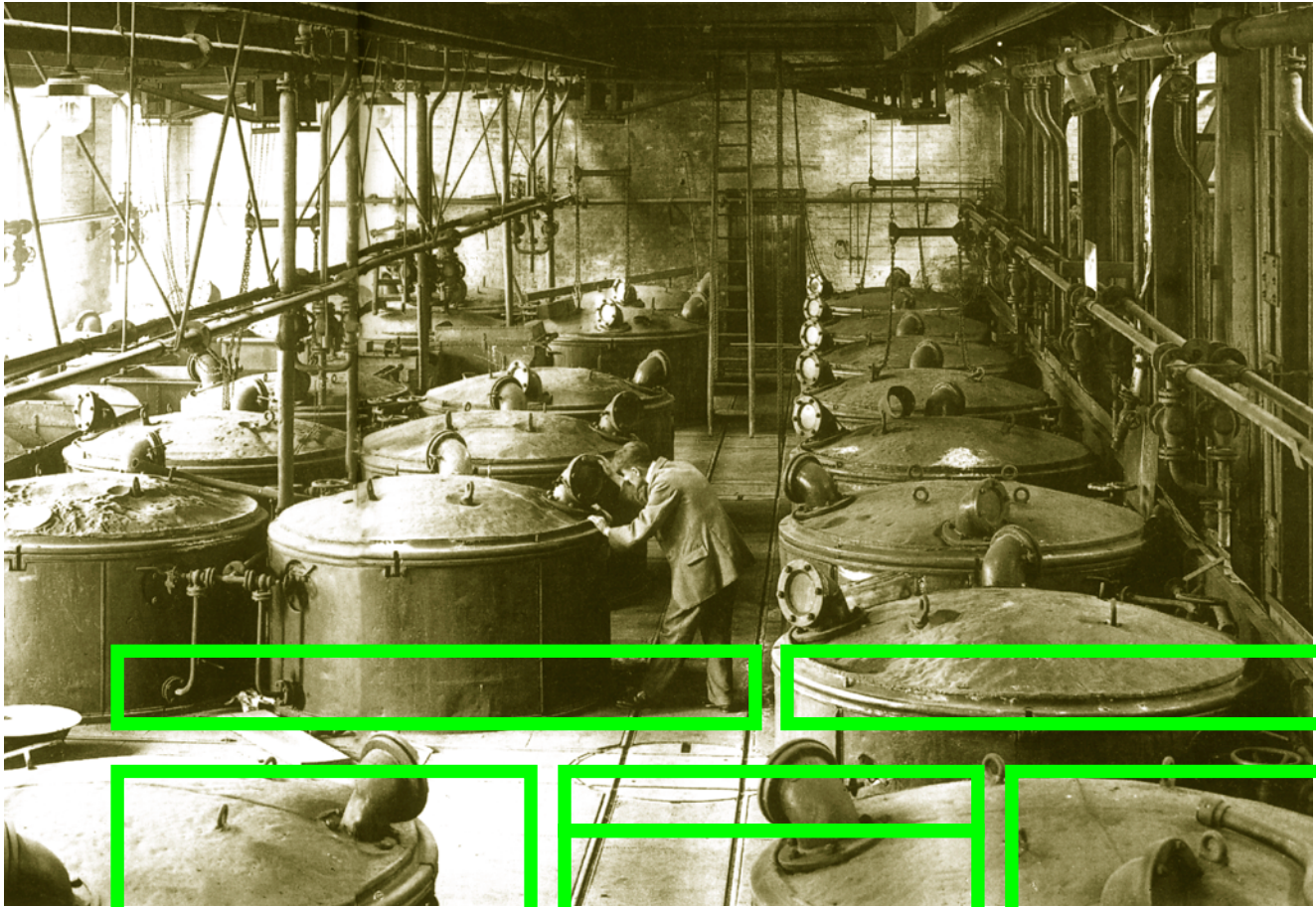
Du goudron aux colorants

La fabrication du gaz d'éclairage par distillation de la houille laissait un résidu, le goudron, dont on ne savait que faire. Seules de faibles quantités servaient à la préparation des cordages pour la marine, au calfatage des navires, au revêtement des toits d'usine ou, encore, de combustible pour les usines à gaz.

Dans les années 1840, les chimistes valorisaient le goudron en en tirant, par distillation, un grand nombre de produits, dont le benzène, le naphthalène, l'anthracène, etc. Ces composés, peu

1. À PARTIR DE 1835, les pantalons des fantassins de l'armée française sont teints en rouge avec de la garance naturelle. Cette pratique perdurera jusqu'au début de la Première Guerre mondiale.

Photographie Musée de l'Armée, Paris



2. UNITÉ DE PRODUCTION D'INDIGO de la Société BASF, à Ludwigshafen, sur les bords du Rhin, à la fin du XIX^e siècle. À cette époque, les usines chimiques produisent 600 tonnes d'indigo par an alors

que la production annuelle d'indigo naturel est de 10 000 tonnes. En 1911, cette proportion s'inverse : 870 tonnes de produit naturel contre 22 000 tonnes d'indigo artificiel.

connus jusque-là, deviendront les matières premières de l'industrie des colorants. Pendant plusieurs années, le produit le plus important allait être l'aniline, un dérivé du benzène obtenu en petites quantités par distillation du goudron, mais qu'on préparerait bientôt industriellement à partir du benzène.

Deux chimistes jouent un rôle prépondérant dans l'émergence des colorants synthétiques : August Wilhelm Hofmann (1818-1892) et son élève anglais William Henry Perkin (1838-1907), qui étudiait sous sa direction depuis 1853 et était, en 1856, son assistant au Collège royal de chimie à Londres.

Dès 1849, Hofmann avait souligné l'intérêt de synthétiser la quinine à partir du produit du goudron de houille. Le paludisme était à l'époque une maladie répandue en Europe, et la quinine, seul remède efficace connu, était extraite des écorces de quinquina importées à grands frais d'Amérique latine. Les troupes anglaises

engagées aux Indes en faisaient une grande consommation.

Dans le petit laboratoire aménagé au domicile familial, le jeune Perkin s'attaque pendant les vacances de Pâques 1856, à la synthèse de la quinine, dont seule la formule, $C_{20}H_{26}O_8N_2$, est alors connue. Cette formule « brute » indique qu'une molécule de quinine contient 20 atomes de carbone, 24 d'hydrogène, 2 d'oxygène et 2 d'azote, mais ne renseigne en rien sur la manière dont ces atomes sont reliés, c'est-à-dire sur la *structure* du composé. En raisonnant, comme il l'a raconté lui-même « par addition et soustraction », Perkin remarque qu'on obtient la même formule brute en multipliant par deux celle d'un dérivé de l'aniline, l'allyltoluidine ($C_{10}H_{13}N$), en ajoutant au produit deux atomes d'oxygène et en ôtant deux atomes d'hydrogène (par exemple, deux allyltoluidines et trois oxygènes donneraient une molécule de quinine et une molécule d'eau).

Certes, on retrouve ainsi le bon nombre d'atomes de chaque espèce, mais rien ne prouve qu'ils sont arrangés de la même façon ! Avec habileté, Perkin fait réagir l'allyltoluidine avec le bichromate de potassium, un agent qui ajoute de l'oxygène. Le précipité rouge-brun obtenu n'est pas de la quinine. Perkin aurait pu en rester là. Heureusement, plus intéressé par la chimie que par la quinine, il décide d'étudier l'oxydation de l'aniline, dont la formule, C_6H_7N , n'a plus vraiment de rapport avec celle de la quinine. Cette fois, il obtient un précipité noirâtre qui se dissout en partie dans l'alcool avec une splendide coloration pourpre. Le produit solide isolé se révèle un excellent colorant pour divers textiles et sera connu sous différents noms : pourpre d'aniline, mauve, ou mauvéine. D'autres chimistes avaient noté que l'aniline se colorait en présence d'oxydants, mais le mérite de Perkin est l'isolation du colorant et la vérification de son aptitude à teindre les textiles de manière stable.



3. CETTE SCÈNE DE BAL À LA COUR DE NAPOLEON III illustre l'engouement pour les teintes violettes à la fin du XIX^e siècle. En Angleterre, cette mode fut encouragée par la reine Victoria et, en France, par l'impératrice Eugénie.

La couleur pourpre

Apparue à une période où la couleur mauve faisait les délices de la reine Victoria, de l'impératrice Eugénie et de leur cour, la mauvéine se répand rapidement partout en Europe (voir la figure 3). Cette couleur mauve si populaire était initialement obtenue par le murexide et, surtout, par la pourpre française, un colorant d'origine végétale préparé en 1856 par un teinturier lyonnais à partir d'une orseille, c'est-à-dire d'un lichen ayant subi une fermentation ammoniacale. La pourpre française semblait promise à un brillant avenir, mais la mauvéine la supplante très rapidement. Le murexide subit le même sort.

Perkin dépose des brevets en Angleterre en août 1856 et en février 1857. Cette même année, il veut étendre son brevet en France, mais une erreur de date y invalide le brevet, de sorte que son colorant tombe dans le domaine public. Paradoxalement, ce revers va assurer la prospérité de son inventeur : le produit «*mauve*» accroît la demande pour le produit original, ce qui fait le succès des établissements *Perkin & Sons*, que Perkin avait fondés avec son père et son frère.

Les bénéfices sont énormes, la mauvéine se vendant aussi cher que le pla-

tine ! Ce bichromate de potassium n'était pas onéreux, et Perkin avait lui-même mis au point (en six mois, dans la buanderie familiale en attendant la construction de l'usine) une synthèse industrielle de l'aniline en deux étapes, à partir du benzène avec des réactifs bon marché (acide sulfurique, nitrate de sodium, limaille de fer, acide acétique). En 1874, fortune faite, Perkin, âgé de 36 ans, vend son usine et se consacre avec succès à des recherches fondamentales en chimie organique, dans un laboratoire qu'il s'est fait construire à proximité de son domicile. Devenu l'un des pères de la chimie organique anglaise, Perkin meurt en 1907 au retour d'un voyage triomphal aux États-Unis, un an après que d'importantes cérémonies marquent en Angleterre le jubilé de la mauvéine.

Où en était-il de la synthèse de la quinine ? On sait maintenant qu'en aucun cas la tentative de Perkin n'aurait pu aboutir. L'«*allyltoluidine*» utilisée était en fait un mélange de deux composés, très différents de la quinine. Cette dernière a d'ailleurs une structure bien trop complexe pour que sa synthèse ait été réalisable avec les connaissances et les moyens de l'époque. La synthèse ne sera réussie qu'en 1944 par Robert Burns Wood-

ward, l'un des plus grands chimistes organiciens du XX^e siècle. Quant à la «*mauvéine*», elle était en fait un mélange de «*pscaie mauve*», dérivée de l'aniline, de mauvéine, produit de condensation d'aniline, et d'ortho et de para-toluidine, des impuretés de l'aniline commerciale de l'époque.

Sous le signe du fuchsia et du renard

La découverte de Perkin suscite des vocations : les chimistes font réagir l'aniline avec les réactifs les plus divers dans l'espoir d'obtenir des colorants nouveaux. C'est ainsi qu'en 1859 le chimiste lyonnais Emmanuel Verguin (1811-1864) obtient un très beau colorant rouge en oxydant l'aniline commerciale par le tétrachlorure d'étain. Les *Établissements Renard Frères*, de Lyon, le déposent la même année sous le nom de fuchsine, car, selon la demande de brevet, sa couleur rappelle celle du fuchsia ; mais on a souvent souligné que *Fuchs* signifie, en allemand, «*renard*»... Hélas, le grand succès de ce produit n'empêche pas l'industrie française des colorants de péricliter.

Trois raisons expliquent ce déclin. Tout d'abord, la loi française de 1844 sur les brevets protège le produit et non le procédé. Lorsque des chimistes améliorent la synthèse de la fuchsine, ils sont systématiquement poursuivis en justice par les *Établissements Renard*, et condamnés. Très vite, ces inventeurs comprennent qu'il faut aller exploiter leurs découvertes ailleurs, en Allemagne ou en Suisse, au grand avantage de ces pays et au préjudice de la France.

Ensuite, la France manque de techniciens chimistes. En Allemagne, depuis 1825, les «*écoles techniques*» (*Technische Hochschulen*), subventionnées par les régions, forment les cadres de haut niveau dont l'industrie a besoin. En France, sauf quelques cas isolés, de tels cadres ne seront formés pour l'industrie chimique que 50 ans plus tard.

La troisième raison est peut-être la plus grave. La mauvéine, la fuchsine et les autres colorants d'aniline résultaient de recherches empiriques. Le succès de telles recherches était – et reste toujours – aléatoire. Pour être sûr

D.R.

4. LES PLANTES DONT SONT ISSUS LES COLORANTS ne naissent pas toujours présager les couleurs des teintures. La garance est un colorant rouge extrait de la racine de *Rubia tinctorum* (à gauche). L'indigo est une teinture bleu foncé, résistant au soleil et à l'eau.



extraite des feuilles et des tiges de l'*Indigofera tinctorum* (à droite). Disparue au début du XX^e siècle, la culture des plantes tinctoriales rouennaises, mais de manière artisanale, comme l'atteste ce

d'obtenir les résultats, une recherche fondée sur une théorie solide devenait nécessaire. Une telle théorie, la chimie organique structurale, apparaît dans les années 1860, grâce aux efforts conjugués de nombreux savants, dont Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850), Justus von Liebig (1803-1873), Archibald Scott Couper (1831-1892), et surtout Friedrich August Kekulé (1829-1896), qui publie en 1858 son article sur la tétravalence du carbone. Grâce à la théorie structurale, les chimistes déterminent la structure d'une molécule, prévoient sa réactivité et en conçoivent des synthèses rationnelles. Adoptée en Allemagne et en Angleterre, cette discipline est officiellement recuée en France où de nombreux chimistes, Marcellin Berthelot (1827-1907) en tête, refusent même de croire aux atomes. Berthelot est influent – il fut ministre de l'Instruction publique –, la théorie atomique ne sera enseignée en France que dans les dernières années du XIX^e siècle.

C'est pourtant grâce à ces nouveaux outils conceptuels que l'industrie chimique allemande crée de nombreux colorants à des prix très abordables et éclipse complètement sa rivale française. Les progrès allemands en chimie organique sont tels que, bientôt, deux colorants naturels complexes, l'alizarine et l'indigo, sont synthétisés. Fruit d'une collaboration exemplaire entre universitaires et industriels, ces synthèses vont faire de l'Allemagne le centre incontesté de l'industrie des colorants, puis de toute l'industrie chimique organique jusqu'à

la Première Guerre mondiale. La production allemande de colorants représente, en valeur marchande, 50 pour cent de la production mondiale en 1881, 70 pour cent en 1896 et 80 pour cent en 1900.

De la garance du Vaucluse à l'alizarine rhénane

La garance est une plante dont les racines fournissent un colorant rouge apprécié, utilisé depuis 1835 pour teindre les pantalons des fantassins et des cavaliers de l'armée française (voir la figure 1). Le principe colorant essentiel en est l'alizarine, isolée dès 1826.

Karl Graebe (1841-1927) et Karl Liebermann (1842-1914) sont en 1868 assistants d'Adolf von Baeyer (1835-1917), à Berlin. Baeyer avait montré que des molécules organiques complexes pouvaient être découpées en fragments (les chimistes parlent de dégradation) par chauffage en présence de zinc en poudre. Il suggère à Graebe, d'abord réticent – mais qui dut obéir aux ordres du « patron » –, d'appliquer cette réaction à l'alizarine. La détermination, plus simple, des structures des composés de dégradation permettrait, en reconstituant le puzzle, d'en déduire celle de l'alizarine. La structure de l'alizarine connue, sa synthèse rationnelle deviendrait possible.

August Wilhem HOFMANN (1818-1892)

Le précurseur de la chimie des colorants de la seconde moitié du XIX^e siècle commence des études de droit et de langues à Giessen, sa ville natale, mais s'oriente vite vers la chimie en suivant les cours de Liebig qui, depuis 1824, était professeur à l'Université de Giessen. Il étudie les propriétés du goudron de houille et, tout particulièrement celles de l'aniline, sur lequel il obtient son doctorat, en 1841. À l'instigation du Prince Albert, époux de la reine Victoria, il est nommé directeur du Collège royal de chimie à Londres, en 1845.

Le premier colorant synthétique est préparé par Perkin, mais Hofmann reste considéré comme l'initiateur de ce domaine. Il découvre une nouvelle classe de colorants dérivés de l'aniline, les « violets Hofmann », qui eurent leur importance. En 1865, il retourne en Allemagne pour occuper la chaire de chimie de l'Université de Berlin. Il a influencé de manière décisive la chimie anglaise et la chimie allemande.



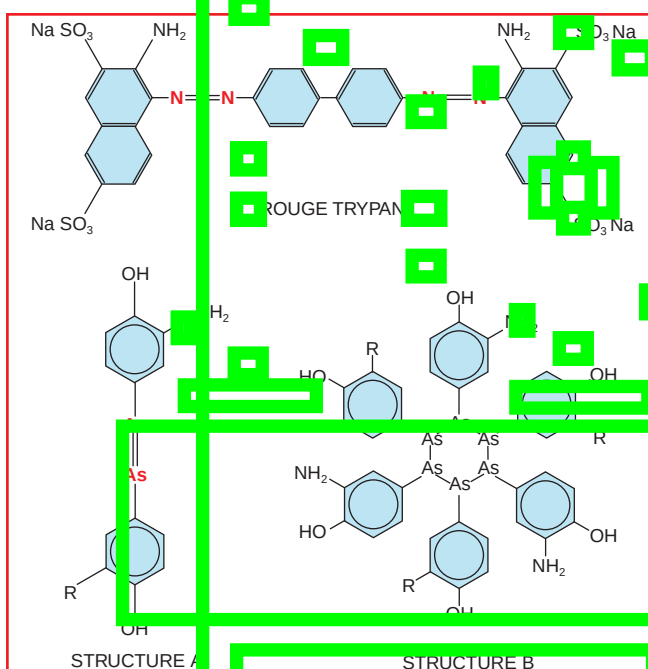
Hofmann (au centre) fut, avec Graebe et Liebermann, le premier à synthétiser l'alizarine, le principe actif de la garance.

Graebe et Libermann montrent que le squelette de l'alizarine est celui de l'anthracène, un hydrocarbure obtenu dans la distillation de la houille. Ils réussissent bientôt la transformation de l'anthracène en alizarine, en collaboration avec Heinrich Caro (1834-1910), spécialiste allemand des colorants synthétiques, qui vient de rentrer d'Angleterre pour prendre la direction scientifique d'une jeune entreprise rhénane promise à un bel avenir, la *Badische Anilin & Soda Fabrik* (BASF). C'est en exploitant les brevets de l'alizarine et des colorants dérivés que la BASF va asseoir sa prospérité. Perkin, qui a également réalisé la synthèse de l'alizarine à partir de l'anthracène, en dépose la demande de brevet le 26 juin 1869, un jour après Caro, Graebe et Libermann ! Perkin et ses collègues allemands se mettent rapidement d'accord pour collaborer et échanger les licences de fabrication.

Le prix de l'alizarine baissera à mesure des perfectionnements de sa synthèse. En France, les autorités soutiendront en temps les producteurs de garance, en continuant à utiliser le colorant naturel pour la teinture des pantalons militaires ; mais cela ne suffira pas à éviter la catastrophe. Le quintal de garance naturelle vendu 200 francs en 1865, n'en vaut plus que 25 francs dix ans plus tard. En 1872, les planteurs français produisent encore 23 000 tonnes de poudre de garance, soit plus de la moitié de la production mondiale. En 1878, ils en produisent à peine 500 tonnes, alors que la production d'alizarine synthétique équivaut déjà à 30 000 tonnes de garance. Sur leur lancée, les chimistes allemands s'emparèrent du marché de l'indigo.

Et Baeyer (re)créa l'indigo...

L'indigo, l'un des plus anciens colorants connus, reste aujourd'hui très employé, la mode des jeans, dans les années 1960, lui ayant donné une nouvelle jeunesse. Son importation en



5. LE COLORANT ROUGE TRYPAN (en haut) était utilisé pour traiter le malade du sommeil. Son efficacité était attribuée à la double liaison d'azote (-N=N-). Cherchant d'autres composés avec des doubles liaisons, Paul Ehrlich trouva, en 1909, l'arsphénamine, efficace notamment contre la syphilis. Incapable de déterminer sa structure, il supposa qu'elle avait la structure A. En fait, on montra bien plus tard, en 1961, que ce composé avait une structure très différente (B), sans double liaison entre les atomes d'arsenic.

Europe, à partir du XVI^e siècle, va ruiner des régions entières qui se consacraient à la culture du pastel, dont on tirait différentes nuances de bleu. Toulouse et sa région sont particulièrement touchées. Le commerce de l'indigo, au siècle dernier, était contrôlé par l'Angleterre, qui avait établi aux Indes de nombreuses plantations et négociations. Ce ne sera bientôt qu'un souvenir, sous les coups de la BASF, qui, après la synthèse de l'alizarine, va réussir celle de l'indigo. Trois chimistes jouent un rôle clé dans cette découverte : deux universitaires, Baeyer et Karl Heumann (1850-1893) et un industriel, Caro, qui collabore avec Baeyer à partir de 1876.

Le problème est loin d'être facile. Commentant ses travaux en 1865, Baeyer malgré tout son talent, ne réussira à établir la structure de l'indigo qu'en 1883. Il obtient cependant, dès 1868, une structure partielle, qui guide ses recherches en synthèse. Baeyer réalise ainsi en 1878, puis en 1882, la synthèse de l'indigo par deux voies différentes. Ces procédés restent toutefois onéreux, et ce sera une troisième synthèse (1890), due à Heumann,

qui sera exploitée à partir de 1897 (voir la figure 2).

Entre la prise du premier brevet en 1880 et la commercialisation, il s'est écoulé 7 ans, pendant lesquels la BASF a investi 18 millions de marks-or, une somme supérieure à la valeur du capital de l'entreprise. Cet investissement se révèle profitable : en 1897, l'Angleterre commercialisait 10 000 tonnes d'indigo naturel, et l'Allemagne 600 tonnes d'indigo de synthèse. En 1911, les chiffres sont de 870 tonnes de produit naturel et de 22 000 tonnes d'indigo artificiel. Le gouvernement britannique a beau privilégier l'indigo naturel pour les uniformes militaires, on voit se répéter pour les planteurs anglais ce qui s'est produit pour les producteurs de garance en France. Entre 1886 et 1914, 90 pour cent du commerce de l'indigo de l'Inde avec l'Europe s'est évanoui.

Aujourd'hui, la Société BASF reste le principal fabricant d'indigo, avec en 1997, 40 pour cent de la production mondiale, estimée à 17 000 tonnes, de quoi teindre 800 millions de paires de jeans.

Les coups de pouce du hasard...

Au XIX^e siècle, la chimie est encore balbutiante, et le hasard joue un rôle non négligeable dans les découvertes, par exemple lors de celle de la mauvéine ou de la synthèse de l'alizarine. Cette synthèse consiste à oxyder l'anthracène en anthraquinone par l'acide nitrique, puis à introduire les groupes OH manquants. Cette dernière opération doit s'effectuer de manière indirecte, en faisant d'abord réagir l'acide sulfurique sur l'anthraquinone. C'est cette réaction, pourtant classique aujourd'hui, qu'on n'arrivait pas à faire.

Graebe et Libermann, ayant échoué, Caro reprend le problème et connaît les mêmes déboires. Lors d'un ultime essai, il doit s'absenter un moment. À son retour, Caro constate qu'il y avait eu surchauffe : une partie du mélange réactionnel est parti

au plafond, mais ce qui reste contient le produit désiré. Sans cet heureux accident, Caro aurait été sans doute bloqué encore longtemps : la réaction qu'il cherchait à faire ne se déclenche qu'à une température très élevée, qu'aucun chimiste raisonnable n'aurait employée de peur de détruire l'antraquinone, l'acide sulfurique étant un agent très corrosif (versez quelques gouttes d'acide sulfurique sur un morceau de sucre et vous verrez ce qui se passe déjà à température ordinaire). Sans parler des risques pour l'expérimentateur.

Des colorants à la chimiothérapie

Notons toutefois que ce n'est pas toujours le hasard qui gouverne les expérimentateurs. La naissance de la chimiothérapie, qui résulte de la recherche sur les colorants synthétiques, montre comment l'exploitation patiente d'une idée, logique et simple, a permis de sauver des millions de vies.

Le médecin allemand Paul Ehrlich (1854-1915) a nommé chimiothérapie la destruction des germes pathogènes du malade par des produits chimiques. Comment a-t-on trouvé ces produits ?

Jeune étudiant en médecine, Ehrlich s'intéresse beaucoup à la coloration des coupes de tissus et des cultures de microbes, en vue de leur examen sous microscope. Sa thèse de doctorat portant sur les colorants histologiques, il remarque que la teinture de bacilles et de bactéries revient à les attaquer sélectivement par les colorants et il a alors l'idée de chercher des agents bactéricides dans cette famille de composés. Il utilise ainsi le bleu de méthylène (1891) pour traiter deux malades atteints d'une forme bénigne de malaria avec d'excellents résultats.

En 1904, il utilise le rouge trypan pour traiter la maladie du sommeil. Attribuant l'efficacité du rouge trypan au groupement d'atomes d'azote doublement liés ($-N=N-$), Ehrlich prépare de nombreux composés contenant le groupement analogue, mais avec de l'arsenic ($-As=As-$). Il synthétise ainsi l'arsphénamine et prouve, en 1909, que le composé est actif contre les trypanosomes et les spirochètes, des bactéries responsables respectivement de la maladie du sommeil et de

Johann Friedrich Wilhelm Adolf von BAEYER (1835-1917)



En 1858, à Berlin, Baeyer soutient sa thèse de doctorat, puis occupe dans cette ville de modestes fonctions d'enseignant jusqu'en 1872. Après l'annexion de l'Alsace par l'Allemagne, il est nommé professeur à Strasbourg. Son œuvre est importante et variée. En plus de l'indigo, il synthétise de nombreux colorants dans les séries des fluorescéines et des phtaléines. En 1864, il prépare l'acide barbiturique, dont les propriétés hypnotiques ne sont établies qu'en 1903. Deux origines du nom ont été proposées : pour certains, l'acide barbiturique aurait été préparé le jour de la Sainte Barbara ; pour d'autres, il rappellerait le prénom d'une amie du savant. Le nom de Baeyer reste également attaché à la « théorie des tensions », qu'il propose en 1885 pour interpréter les différences de stabilité des molécules cycliques selon leur taille. Baeyer reçoit le prix Nobel de chimie en 1905.

la syphilis. À l'époque, la seule méthode d'analyse des produits est l'analyse centésimale, qui donne uniquement la formule brute du produit à un facteur multiplicatif près. Aussi, persuadé que le produit final comportait une double liaison d'arsenic, il attribue à ce produit la structure A (voir la figure 5), celle d'un monomère avec une double liaison d'arsenic. Le produit est commercialisé l'année suivante sous le nom de *Salvarsan* (littéralement : l'arsenic qui sauve). Le *Salvarsan* a un succès thérapeutique et médiatique considérable, car c'est le premier médicament chimiquement efficace contre la syphilis. En 1961, on montre que le *Salvarsan* ne contient pas de groupement d'atomes d'arsenic en double liaison et que sa structure est différente ; c'est un trimère, c'est-à-dire que sa structure comprend trois fois plus d'atome que la formule brute de base. Partant d'une hypothèse erronée, Ehrlich avait fait une belle découverte.

Ces succès de Ehrlich sont précurseurs de la découverte de la quasi-totalité des médicaments au cours de la première moitié du XX^e siècle. L'une des découvertes les plus fertiles concerne les infections bactériennes, contre lesquelles aucun médicament efficace n'existe encore au début des années 1930. L'attention est portée sur les colorants ayant une forte affinité pour les protéines.

En 1934, Gerhard Domagk (1895-1964) annonce que le produit commercialisé par la Société I. G. Farben sous le nom de *Prontosil* guérit des staphylococcies et des streptococcies aiguës. L'année suivante, Jacques Tré-

fouël (1894-1977) et ses collaborateurs de l'équipe d'Ernest Fourneau (1872-1949), à l'Institut Pasteur, montrent, que ce composé est métabolisé en sulfanilamide qui en était la forme active. *In vivo*, il est aussi efficace que le *Prontosil* et, contrairement à ce dernier, il reste actif *in vitro*. Ces découvertes marquent la naissance des sulfamides, les médicaments les plus efficaces avant l'arrivée des antibiotiques.

Ainsi, cette symbiose entre industrie et recherche a permis l'éclosion de nombreuses découvertes – nouveaux colorants, nouveaux médicaments –, et aussi le développement d'une industrie qui préfigure l'industrie chimique actuelle. Dommage que l'acceptation tardive de la théorie atomique ait obéré l'essor de cette industrie en France.

Georges BRAM est professeur de chimie et d'histoire de la chimie à l'Université de Paris-Sud (Orsay). NGUYEN TRONG ANH, directeur de recherche au CNRS, est professeur de chimie à l'École Polytechnique.

Anthony S. TRAVIS, *The rainbow makers: the origins of the synthetic dyestuffs industry in Western Europe*, Associate University Press, 1993.

Dominique CARBON et Colette du CHATELNET, *Guide des teintures naturelles*, Delachaux et Niestlé, 1990.

Danielle FAUQUE, *Regards sur l'histoire des colorants artificiels au XIX^e siècle*, in *Bulletin de l'Union des physiciens*, vol. 88, n° 769, pp. 1753-1174, décembre 1994.

Jan ALTMANN et Karin ELBL-WEISER, *That old mood indigo*, in *Chemistry and Industry*, vol. 16, p. 654, 1997.

Du coton naturellement coloré

JAMES VREELAND

Pendant 5 000 ans, des Indiens d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud ont cultivé du coton naturellement coloré. La demande de produits écologiques a relancé cette production.

Un après-midi de 1977, au Musée d'archéologie et d'anthropologie de Lima, j'examinais à la loupe binoculaire un tissu précolombien afin de mettre au point une méthode de conservation. Soudain, je vis, dans les parois des fibres du coton, de masses sombres qui donnaient sa couleur au tissu. Ces taches brunes ne semblaient pas provenir d'une teinture : ce coton était-il naturellement coloré ? Interrogeant quelques collègues, je reçus un « non » catégorique, et souvent ironique : le coton est blanc, et la coloration que j'avais observée devait être due à une oxydation ou à une décoloration associée au vieillissement du tissu.

Quelque temps après, je me rendis à Trujillo, plus au Nord. Là, l'anthropologue Victor Antonio Rodriguez Suyuy me confirma l'existence de coton naturellement coloré : dans des champs aménagés et cultivés à l'époque précolombienne, en contrebas d'une route qui longeait l'aéroport, il me montra des plants de coton rustique cramponnés au sol sablonneux : ils portaient des capsules contenant des fibres rougeâtres ! Pendant quelques mois, j'ai alors sillonné la région à la recherche de plantes et de tissus dont les fibres étaient naturellement colorées en écru, en chocolat foncé, en d'autres nuances de brun et, même, en mauve. Ce n'était pas toujours facile, car les descendants des Indiens Mochica de la côte Nord conservent jalousement des plants hérités de leurs ancêtres depuis plus de 2 000 ans. Toutefois, je me suis acharné et, depuis 20 ans, je parcours les musées, les bibliothèques et les sites archéologiques à la recherche d'informations sur le coton naturellement coloré.

Il y a plusieurs siècles, on cultivait des cotons de couleurs variées. La couleur blanche ne s'est imposée qu'avec l'apparition des égreneuses à coton et de teintures industrielles bon marché. Les plants de couleur ont alors été relégués dans les banques de graines de quelques instituts agricoles et dans quelques petites communautés traditionnelles au Mexique, au Guatemala et au Pérou. Ces cotons naturellement colorés, qui ne nécessitent pas de teintures polluantes, ont récemment suscité un nouvel intérêt, en même temps que la culture biologique du coton, et ils sont de plus en plus utilisés dans l'industrie textile.

Un passé haut en couleur

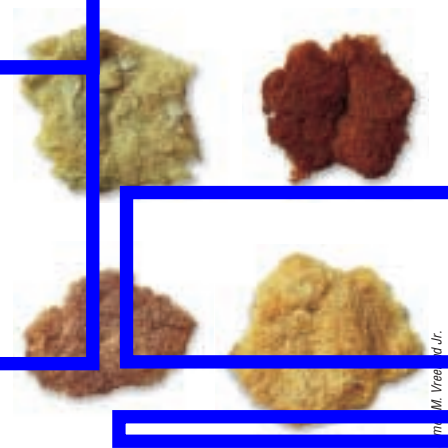
L'histoire du coton naturellement coloré commence dans les Andes il y a 5 000 ans : presque tous les plants de coton coloré qui sont croisés et commercialisés aujourd'hui proviennent de souches créées à cette époque par des populations d'Amérique latine. Ces populations avaient elles-mêmes sélectionné et amélioré deux espèces locales : *Gossypium hirsutum* et *Gossypium barbadense*. La première était cultivée dans le Nord de l'Amérique centrale et aux Caraïbes ; la seconde, qui a des fibres plus longues et plus belles, était cultivée dans l'Ouest de l'Amérique du Sud.

Les plus anciennes fibres de coton que nous connaissions dans cette région proviennent de Tehuacán, près d'Oaxaca, au Mexique : elles ont été produites vers 2300 avant notre ère. Des fibres de couleur chocolat, caractéristiques de l'espèce *Gossypium barbadense*, ont été trouvées dans le plus ancien niveau de Huaca Prieta, un site de la côte Nord du Pérou, qui était occupé

entre 3 000 et 1300 avant notre ère. Les tissus qui contiennent ces fibres colorées ont été préservés par l'aridité des sols et la sécheresse de l'air ; dans un milieu humide, ils auraient été endommagés ou détruits.

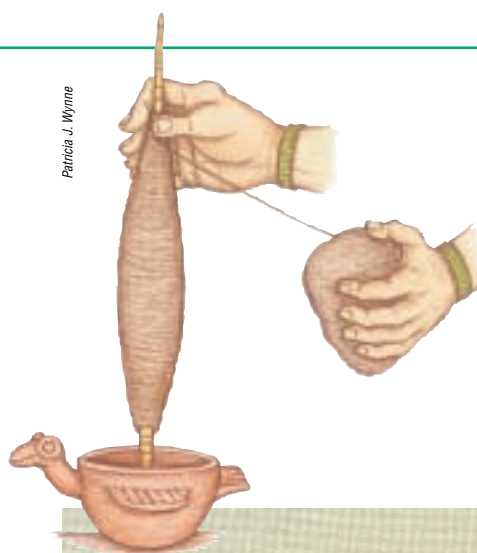
Ces couleurs auraient été délibérément sélectionnées et cultivées par les anciens pêcheurs péruviens, qui fabriquaient leurs lignes et leurs filets dans des teintes sombres, moins visibles des poissons : cette tradition s'est poursuivie jusqu'à aujourd'hui. Le coton naturellement coloré n'a toutefois pas atteint le Nord du Mexique à cette époque : le coton « hopi » (la race *punctatum* de *Gossypium hirsutum*) du Sud-Ouest des États-Unis était blanc, ou blanc cassé, à moins que le vieillissement n'ait décoloré les échantillons qui nous sont parvenus.

Plus récemment, au XVI^e siècle, le coton naturellement coloré était utilisé comme moyen de paiement, pour



1. DU COTON NATURELLEMENT MAUVE a été découvert sur la côte Nord du Pérou (à droite). La plante, cultivée et conservée soigneusement pendant des millénaires, est aujourd'hui exploitée commercialement. Les échantillons ci-dessus présentent quelques autres couleurs naturelles du coton.





les impôts versés à l'empire aztèque par exemple. En 1531, lorsque les Espagnols ont traversé le désert péruvien, ils se sont émerveillés devant les vastes champs de coton, qui présentaient une variété de couleurs qu'ils n'avaient jamais vues. Les tissus en coton naturellement coloré ont été parmi les premières prises de guerre des Espagnols ; ils arrivèrent rapidement à la cour d'Espagne, où

l'on reconnut que la qualité technique de leur tissage était bien supérieure à celle des tissus fabriqués sur les métiers européens de cette époque.

Les espèces dans le monde entier

Le coton a aussi une longue histoire en Afrique et en Asie : des fibres de 2200 avant notre ère ont été découvertes dans la vallée de l'Indus, et de 2250 avant notre ère en Nubie. On trouve, dans cette partie du monde, quelques espèces naturellement colorées, parmi lesquels *Gossypium herbaceum* et *Gossypium arboreum*. Ces espèces ont toutefois des fibres courtes, ce qui les rend plus difficiles à filer et à tisser ; elles ont été remplacées en grande partie par les cotons américains à fibres moyennes ou longues.

Aujourd'hui, les cotons égyptiens dérivent d'un ancêtre d'Amérique du Sud (*Gossypium barbadense*), apparemment importé en Afrique par des marchands d'esclaves. Décrite pour la première fois vers 1820, cette variété produisait des fibres longues et solides, de couleur brun doré. Elle a été croisée avec des plants locaux pour produire les variétés commerciales : ashmoun, une souche brune ; mita-fifi, d'un brun plus sombre et aux soies plus longues, qui a donné naissance au coton pima américano-égyptien en 1908 ; et, enfin, une variété de *Gossypium barbadense* à soies très longues, le coton pima, du nom d'une tribu amérindienne.

En Chine, les espèces indigènes naturellement colorées, les variétés nankin, ont aussi des fibres courtes, et leur couleur n'est que blanc cassé. Bien que les sources écrites soient confuses sur ce point, il semble que des descriptions du coton nankin du ^{XIV}^e siècle concernent une variété introduite d'Amérique centrale ou d'Amérique du Sud. Il est en tout cas attesté que des plants de *Gossypium hirsutum*, originaires des Caraïbes, sont arrivés en Chine.

Aux États-Unis, des plants de coton coloré de l'Est méditerranéen et d'Asie ont rejoint les espèces latino-américaines pendant la période coloniale. Le coton coloré était filé et tissé à la main, parfois à la machine, dans plusieurs États du Sud. Ainsi, pendant



2. UNE TAPISSERIE PÉRUVIENNE en coton naturellement coloré, de l'an 1000, représente un plant de coton avec ses racines, ses feuilles, ses tiges, ses fleurs et ses capsules mûres qui se répandent. Certaines indiennes des Andes, probablement incas, utilisaient un bol pour filer afin de maintenir le fuseau pendant qu'elles maniaient la pelote de coton (en haut).

plus de deux siècles, au cœur du delta du Mississippi, un groupe de fileurs acadiens a cultivé du coton brun doré. Le coton coloré ne s'est toutefois jamais imposé commercialement.

Le triomphe du blanc

L'invention de la machine à filer, en 1769, et celle de l'égreneuse à coton (qui sépare les fibres des graines), en 1794, ont favorisé les plants de coton blanc dits cotons «upland» dont les fibres résistent mieux au travail mécanique. La Révolution industrielle était en marche, et l'apparition des teintures chimiques a condamné le coton coloré : il était moins coûteux d'utiliser du coton blanc et de le teindre dans n'importe quelle nuance que d'utiliser du coton naturellement coloré. Dans les années 1900, la plupart des variétés indigènes de coton coloré cultivées en Afrique, en Asie, en Amérique centrale et en Amérique du Sud ont été remplacées par les variétés à fibres blanches.

Toutefois, Haïti a brièvement produit du coton naturellement coloré dans les années 1930. Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'Union soviétique a également pallié le

manque de teinture en cultivant des cotons verts et bruns. Le gouvernement des États-Unis étudia alors la rentabilité de telles cultures, mais les experts conclurent à un trop faible rendement en fibres, en outre trop court, et le coton coloré fut officiellement abandonné.

Puis, au début des années 1990, le coton naturellement coloré est soudain redevenu à la mode. De grandes

marques de vêtements ont commencé à acheter du coton qui «respecte l'environnement», c'est-à-dire cultivé sans produits phytosanitaires. Les cultivateurs de coton consomment en effet environ 23 pour cent des insecticides mondiaux pour combattre des ravageurs, tel, sur le continent américain, l'anthonyme du cotonnier, un coléoptère qui dépose ses œufs dans les boutons floraux.



3. LA RÉCOLTE DU COTON est faite à la main au Pérou (*en haut*). Les femmes trient ensuite le coton en fonction de la couleur et de la qualité (*en bas, à gauche*). Enfin, le coton est égrené par des machines afin que les graines soient séparées des fibres (*en bas, à*

droite). Les égreneuses présentées ici furent conçues et brevetées en Angleterre il y a plus d'un siècle. Bien qu'elles fonctionnent toujours très bien, la plupart d'entre elles ont été récemment remplacées par des égreneuses modernes.

James M. Vreeland Jr.

Les cultivateurs américains, qui pratiquent une agriculture fortement mécanisée et à haut rendement, sont les premiers consommateurs de produits phytosanitaires, avec 35 pour cent du total, devant les producteurs indiens, avec près de 11 pour cent.

Certains de ces produits, parmi lesquels l'aldicarbe, le méthyl-parathion, la trifluraline et le terbufos sont toxiques. Ainsi, la trifluraline perturbe

les systèmes hormonaux et reproducteurs des animaux; aux États-Unis, le terbufos est classé comme un cancérigène potentiel pour l'homme. Ces produits sont dangereux pour les agriculteurs qui les utilisent, mais ils sont aussi persistants dans le sol, vers les ruisseaux, les rivières et les nappes aquifères, tuant les poissons et contaminant le bétail. En outre, le coton blanc est généralement blanchi après la récolte,

par des traitements à base de chlore. Il est ensuite teint à l'aide d'autres produits chimiques, dont la plupart contiennent des métaux lourds, que l'on retrouve souvent dans les eaux usées.

Les inquiétudes suscitées par cette toxicité ont conduit les consommateurs et les industriels à se tourner de plus en plus vers les producteurs de coton biologique. Les normes varient selon les pays, mais le coton est dit «biologique» s'il est cultivé sur un terrain qui n'a reçu aucun produit phytosanitaire depuis un à trois ans (bien que la durée de vie de plusieurs produits rende peu probable leur élimination totale en un délai aussi court). Aujourd'hui, du coton biologique, en particulier du coton naturellement coloré, est cultivé sur près de 8 000 hectares, aux États-Unis et dans une demi-douzaine d'autres pays.

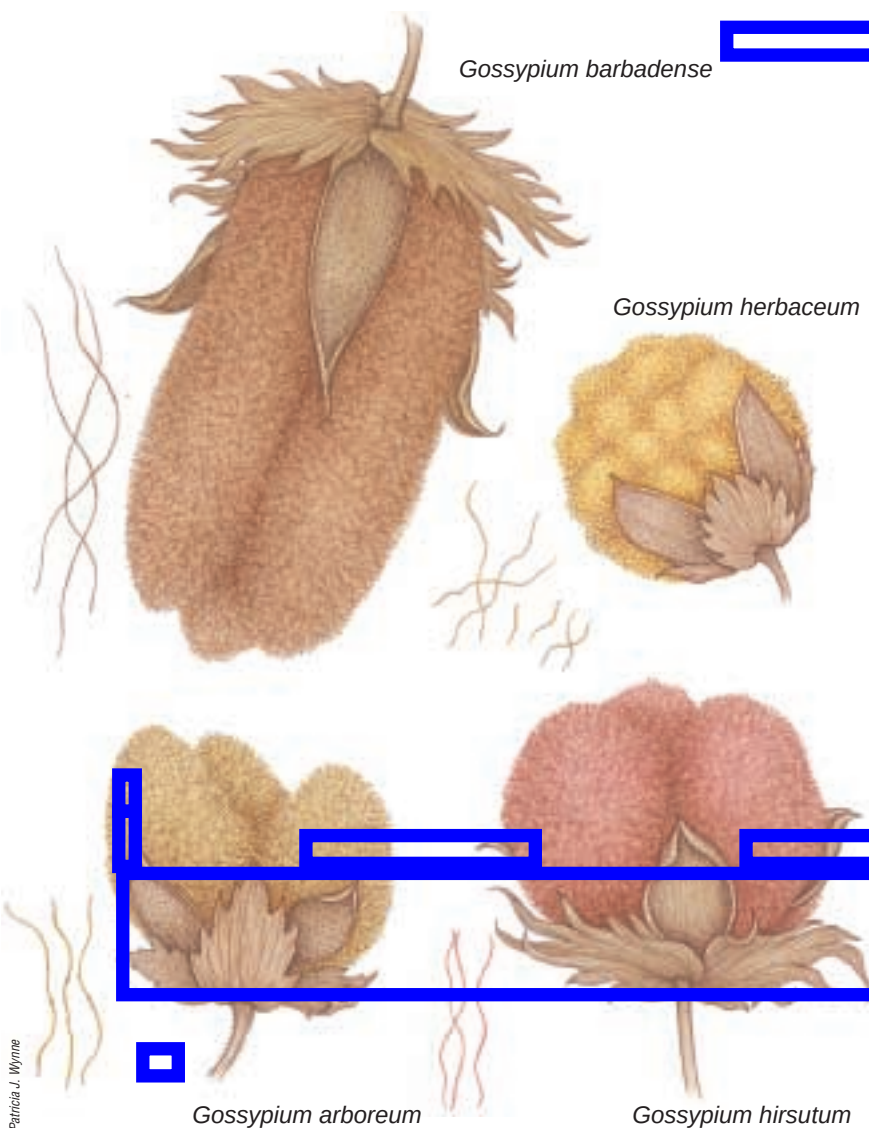
Arrêter l'arrachage

Au Pérou, en 1982, j'ai créé le Projet du coton indigène, avec le soutien des ministères du Travail et du Tourisme, afin de promouvoir la culture et l'utilisation du coton coloré. Le renouveau de cette tradition a nécessité la modification de la politique cotonnière du Pérou. Depuis 1931, en effet, le gouvernement péruvien avait adopté une série de lois et de décrets visant à la destruction du coton coloré indigène, afin de protéger les variétés blanches, plus rentables. Afin d'éradiquer les ravageurs du coton, on a éliminé des plaines côtières toutes les autres plantes hôtes, y compris les autres variétés de coton coloré, l'arbre à kapok péruvien (*Bombax discolor*) et, même, un coton dit sauvage, car dépourvu de fibres véritables (*Gossypium m. raimondii*) : ces plantes pérennes abritent des parasites dont la culture annuelle des variétés blanches rompt le cycle biologique. Les produits phytosanitaires ont été abondamment utilisés et les anciennes traditions de rotation des cultures, qui avaient pourtant fait leurs preuves, ont été abandonnées.

Malgré l'échec de ce programme, la législation des années 1930 est restée en vigueur jusqu'à dans les années 1980, avec des conséquences dévastatrices : la diversité génétique du coton



4. UN FIL DE COTON, à fort grossissement, révèle l'entortillement naturel qui facilite le filage du coton. Les taches sombres donnent la couleur.



5. LA LONGUEUR DES FIBRES du coton dépend de l'espèce. Les deux espèces présentes en Afrique et en Asie, *Gossypium arboreum* et *Gossypium herbaceum*, ont des variétés naturellement colorées et des fibres courtes ou moyennes. Les deux espèces d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud, *Gossypium barbadense* et *Gossypium hirsutum*, ont des fibres moyennes ou longues.



James M. Vreeland Jr.

6. DES CAPSULES DE COTON naturellement coloré recouvrent une tombe précolombienne dans la vallée de Chancay, au Pérou. Les anciennes populations de cette zone côtière emplissaient le corps du défunt avec du coton, qui, absorbant les fluides corporels, participait à la momification. Les sables arides de la région ont préservé le coton (retiré du corps lors du pillage de cette tombe).

avait été fortement réduite, les variétés colorées avaient été abandonnées par les agriculteurs indiens ou détruites par les nombreux organismes pathogènes apparus avec le développement de la culture du coton. Même la survie du coton commercial blanc était gravement menacée. En 1990, un nouveau Code de l'environnement a finalement interdit l'arrachage des plants de coton coloré. Toutefois, l'emploi massif de phytosanitaires continue.

Progressivement, nous avons retrouvé des souches de coton naturellement coloré. Aujourd'hui, nous conservons des variétés de diverses couleurs. Les 15 000 agriculteurs qui les cultivent forment, de loin, le premier groupe mondial de producteurs de fibres naturellement colorées.

La majorité d'entre eux utilisent des méthodes biologiques : ils éliminent

les gros insectes à la main (les enfants noient souvent les insectes dans des récipients pleins d'eau) et cultivent des plantes qui repoussent les insectes. Ces techniques sont anciennes : vers 1250, le coton était déjà cultivé en alternance avec un cousin des citrouilles. En outre, dans des échantillons de sols anciens, on a trouvé des

James VREELAND conduit des recherches sur les textiles anciens au Pérou.

John GILLIN, *Moche : A Peruvian Coastal Community*, Institute of Social Anthropology, Publication n° 3, Smithsonian Institution, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1947.

Paul A. FRYXELL, *The Natural History of the Cotton Tribe* (Malvaceae, Tribe Gossypieae), Texas A&M Press, 1979.

pollens d'une autre plante, un buisson considéré comme inutile par la plupart des paysans. Après des années d'enquête, un octogénaire nous a indiqué qu'il cultivait un rang de cette plante, nommée mastrante, près de ses plants de coton indigène, afin de lutter contre la punaise rouge du cotonnier (*Dysdercus peruvianus*), qui perfore les graines, libérant des huiles qui tachent la capsule : il en coupait régulièrement plusieurs pieds, les séchait au soleil et, quand le vent était favorable, il les enflammait ; la fumée âcre qui s'en dégageait traversait le champ de coton, chassant instantanément les punaises.

Depuis 1993, une entreprise textile d'Arequipa commercialise dans le monde entier des produits en coton naturellement coloré. Les produits de la marque *Pakucho* («coton brun» dans l'ancienne langue inca), en coton coloré, portent le label biologique de l'organisme de contrôle hollandais *Skal*. La culture du coton évite la production de coca pour la cocaïne. Cette année, les exportations péruviennes de coton naturellement coloré dépassent les 100 millions de francs.

D'autres projets semblables sont apparus en Amérique latine. Dans les collines de Santander, en Colombie, un petit groupe de producteurs a rétabli le filage et le tissage du coton indigène pour un projet de développement rural. Sur les plateaux du Guatemala, le Muséum d'Ixchel dirige un projet de renouveau dans des communautés où le filage traditionnel du coton brun, ou *ixcoco*, avait quasiment disparu. Dans l'État du Yucatán, les Indiens Chikitano espèrent aussi faire renaître la culture du coton naturel. Le coton Sud-américain, qui a conquis le monde en blanc grâce à la qualité de ses fibres, s'imposera-t-il bientôt avec ses couleurs ?

J.M. VREELAND, *Naturally Colored and Organically Grown Cottons : Anthropological and Historical Perspectives*, in *Proceedings of the 1992 Beltwide Cotton Conference*, National Cotton Council of America, 1993.

J.F. WENDEL, *Cotton*, in *Evolution of Crop Plants*, sous la direction de J. Smartt et N.W. Simmonds, John Wiley & Sons, 1995.



PHYSIQUE ET TEXTILES

Physique et textiles

La mécanique des tissus

JEAN-FRANÇOIS

MASSIMO MAGNO

Le comportement des tissus est dû à l'interaction des fils de chaîne et des fils de trame. Une analyse du tissu modélisé par un réseau de poutres, et l'utilisation de l'analyse non standard rendent compte des déformations dues aux efforts de traction. Ces modèles sont utiles en confection.

Les structures tissées ont aujourd'hui des applications de pointe (nappes géotextiles, prothèses vasculaires, blindages) qui prolongent les applications plus classiques. Les textiles sont surtout utiles parce qu'ils se déforment beaucoup (plusieurs fois leurs dimensions initiales) et s'adaptent ainsi à des variations de forme importantes, telles celles qui sont imposées par les mouvements du corps humain.

Pourquoi ces propriétés de déformation ? Parce qu'ils sont constitués d'un réseau de fils entrelacés, les fils de chaîne et les fils de trame, qui glissent les uns contre les autres. Plus précisément, le comportement macroscopique des textiles résulte d'une combinaison de mécanismes de déformation qui se produisent sur une gamme d'échelles étendue (voir la figure 1), de l'échelle microscopique (le fil) à l'échelle macroscopique (la structure). L'échelle mésoscopique, intermédiaire, est celle de quelques ondulations d'un fil, où l'on observe, par exemple, les plis formés par un tissu.

Afin de comprendre et de prévoir le comportement des tissus en fonction de l'armure et de la nature des fils (l'armure est le type d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame), afin de choisir le fil et l'armure adaptés aux applications, des équipes de mathématiciens et de mécaniciens cherchent ensemble des modèles mécaniques des structures tissées, à l'échelle mésoscopique. À Mulhouse, avec Marc Renner, de l'École nationale supérieure des industries textiles, nous avons obtenu de telles descriptions en modélisant un fil, puis en remontant à l'échelle du réseau de fils

entrelacés. C'est l'approche « micro-mécanique ». Par ailleurs, les mathématiques non standard ont donné, lors du passage du fil au tissu, des informations inaccessibles autrement. Ces descriptions ont été complétées par des modélisations des grandes déformations et, notamment, des courbures imposées par la réunion des pièces de tissu en structures complexes, telles que les vêtements.

Singulier comportement

Avant d'étudier les modélisations, examinons quelques aspects du comportement des tissus, mis en évidence par des essais mécaniques simples. Les déformations des tissus apparaissent nettement quand on enregistre une courbe de traction unidirectionnelle, c'est-à-dire quand on mesure l'allongement d'un tissu que l'on tire dans une direction. La courbe présente une allure en J, où apparaissent trois domaines, associés à autant de mécanismes de déformation (voir la figure 2).

Le premier domaine, la partie plate de la courbe, résulte de l'annulation des bosselures du tissu à l'échelle macroscopique sous faible traction : une petite traction engendre un allongement notable.

Dans le deuxième domaine, le fil sollicité perd son ondulation, sans que sa longueur change ; c'est un phénomène purement géométrique, la variation angulaire de la ligne moyenne du fil, qui conduit à elle seule à un allongement de plusieurs dizaines de pour cent. La perte d'ondulation du fil sollicité s'accompagne, à l'inverse, d'un gain d'ondulation du fil transverse :

ce transfert d'ondulation résulte du couplage des fils de chaîne et des fils de trame.

En conséquence, le tissu rétrécit dans la direction transverse ; le rapport entre la déformation transverse et la déformation dans la direction de sollicitation définit ce que l'on nomme le coefficient de contraction, ou coefficient de liage (l'équivalent de ce que les spécialistes de mécanique des milieux continus nomment coefficient de Poisson). Compris entre 0 et 0,5 pour les milieux continus, ce coefficient est supérieur à 100 pour certains textiles (dans le sens de l'épaisseur, on observe parfois un comportement singulier, avec une augmentation d'épaisseur).

Des glissements entre les fils de chaîne et de trame, là où ils sont en contact, se produisent parfois lors du deuxième stade de la déformation, tant que les espaces entre les fils permettent une mobilité. Ces glissements, lorsqu'ils se produisent dans le plan moyen des fils, permettent un gauchissement du tissu et une variation de forme qui est utilisée dans la mise en forme des surfaces textiles.

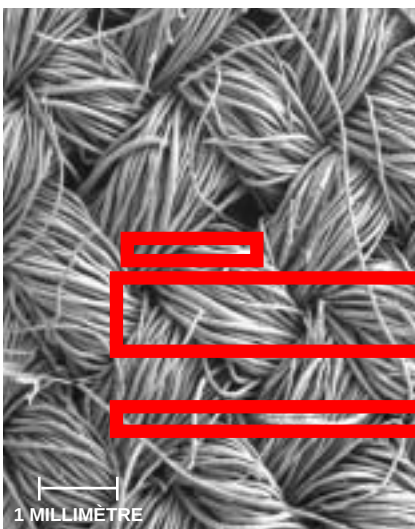
A contrario, la fin du deuxième domaine mécanique correspond à une structure bloquée, les possibilités de perte d'ondulation du fil sollicité étant interdites par la présence du fil transverse. Les fils ne pouvant plus bouger, ils se déforment : c'est le troisième domaine. La courbe qui correspond à une déformation du fil par extension, jusqu'à la rupture. Cette dernière partie de la courbe présente une pente plus accentuée, car le fil est directement sollicité dans le sens longitudinal.

Des descriptions incomplètes

Les mécaniciens ont cherché trois types principaux de descriptions du comportement des textiles : des théories géométriques, des théories mécaniques et des théories énergétiques.

Les premières, les plus anciennes, considèrent la déformation des textiles comme un problème essentiellement géométrique. Ainsi, en 1937, F. Pierce, de l'Association de recherche de l'industrie britannique du coton, décrivit l'armure de la toile (l'armure la plus simple, où les fils de chaîne et les fils

de trame alternent, en se croisant à 90 degrés) en représentant les fils par une succession d'arcs de cercle et de segments de droite, leur section étant considérée circulaire et incompressible. Pierce calcula alors des relations entre les épaisseurs des fils, les rayons de courbure, l'épaisseur du tissu, et il



1. LES DIFFÉRENTES ÉCHELLES auxquelles on doit analyser les textiles sont représentées ici. Le vêtement (*en haut à gauche*) est composé de pièces planes découpées dans les laizes de tissu (*en haut*

à droite). Le tissu est lui-même un entrecroisement de fils (*en bas à gauche*), qui sont constitués de fibres (*en bas, à droite*). Les photographies inférieures sont prises au microscope électronique.

obtint une bonne description de la variation d'épaisseur du tissu en fonction de son allongement.

Puis, à l'Université de Kyoto, Sueo Kiyabata proposa un modèle plus simple, qui négligeait l'ondulation des fils : c'était toutefois une amélioration, parce qu'il prenait en compte les modules en traction et en compression des fils (les relations entre la déformation des fils et les contraintes qui leur étaient appliquées), ce qui permettait une analyse de leur comportement mécanique sous sollicitation. Il tenait également compte des couplages dus aux contacts entre les fils.

La première théorie véritablement mécanique apparut seulement en 1964 : B. G. Olsson voulut également tenir compte de la rigidité en flexion des fils. L'inspirant du travail de Pierce, il se limita à un problème plan et considéra que chaque fil n'est soumis qu'à une force d'allongement et à des forces de traction qui proviennent des fils transverses.

En 1966, au Collège Shenkar, en Israël, P. G. Grosberg tenta ensuite d'expliquer le comportement du tissu soumis à une sollicitation de flexion, en

prenant en compte le rôle des fibres qui constituent le fil. Il considéra que les fibres d'un fil peuvent occuper deux types de région : des intersections entre les fils de chaîne et les fils de trame, où fils et fibres (considérées comme parallèles dans sa description) sont déformés ; les fibres situées à l'extérieur de la courbure sont étirées, tandis que celles de l'intérieur de la courbure sont comprimées, et des zones de raccourci. Les déformations engendrent des frottements : lorsque la différence de tension sur les fibres situées à l'extérieur de la courbure est supérieure à la résistance au frottement, par exemple, les fibres glissent les unes sur les autres. P. Grosberg décrivit ces phénomènes en assimilant le tissu à une superposition de plaques fléchies et en calculant les frottements relatifs entre les plaques.

Plus récentes, enfin, les théories énergétiques reconnaissent enfin que les fils d'un tissu se disposent de façon que la structure finale ait une énergie minimale. L'énergie totale est la somme de plusieurs énergies : l'énergie de flexion due aux ondulations, l'énergie de torsion des fils, l'énergie

de compression latérale due aux contacts entre les fils, et l'énergie d'étiement longitudinal des fils. Selon les cas, certaines de ces énergies sont négligeables.

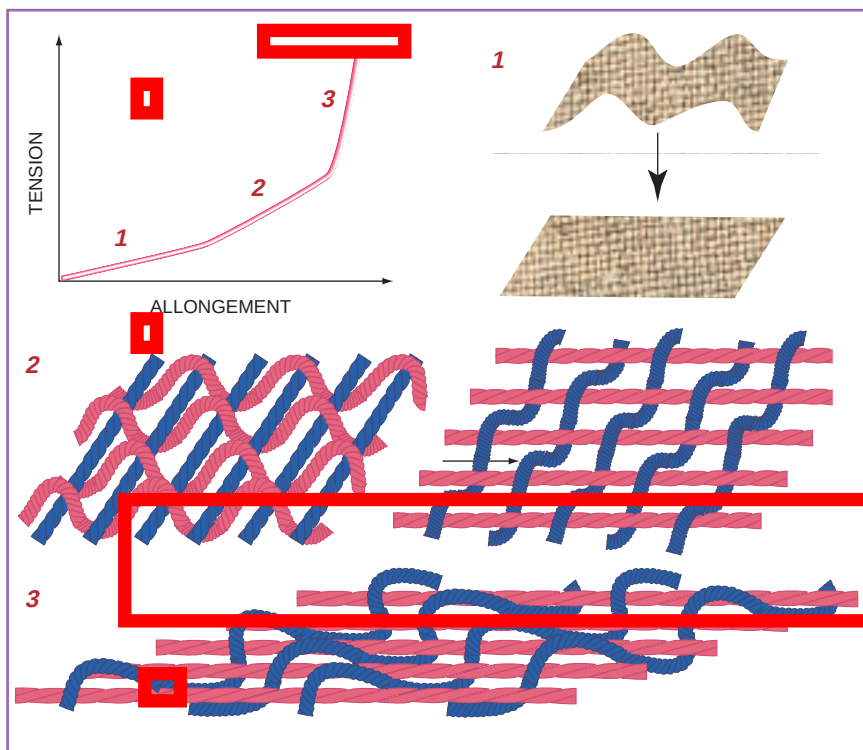
Oculant chacune des aspects importants des textiles, ces diverses descriptions sont toutefois insuffisantes. En revanche, l'analyse micromécanique, explorée depuis les années 1970, décrit les phénomènes essentiels qui déterminent le comportement des textiles.

La micromécanique du tissu

Bien que les textiles soient utilisés pour la réalisation de surfaces dans l'espace à trois dimensions, on peut souvent les considérer comme des structures à deux dimensions, parce qu'ils sont bien plus minces que longs et larges. La première étape de la fabrication d'un matériau textile est d'ailleurs la réalisation d'un patron, plan, que l'on obtient par une mise à plat des éléments de surface tridimensionnels. L'optimisation du patron, c'est-à-dire le choix des fils et de leur agencement (l'armure), nécessite une bonne connaissance du comportement mécanique du tissu, à l'échelle des pièces qui seront assemblées. Aussi une modélisation suffisamment précise et réaliste à cette échelle de description intermédiaire sert de point de départ utile.

La modélisation doit donc tenir compte des caractéristiques du tissu mises en œuvre lors de la confection : hétérogénéité du matériau, forte relation entre l'échelle microscopique et les échelles supérieures, grandes déformations et grandes rotations. L'analyse micromécanique tient compte de ces caractéristiques, parce qu'elle se fonde sur la modélisation du constituant de base du matériau (le fil), pour ensuite remonter au comportement à l'échelle supérieure, en moyennant les comportements des constituants microscopiques.

Une autre possibilité serait une modélisation directement macroscopique, qui tiendrait indirectement compte des caractéristiques propres à l'échelle microscopique, par exemple à l'aide de variables qui seraient ensuite déterminées par des expériences sur des tissus réels. Toutefois



2. UN TISSU QUE L'ON ÉTIRE se déforme par trois mécanismes successifs. Tout d'abord, les ondulations du tissu sont aplanies (*en haut*). Puis les fils étirés deviennent rectilignes, tandis que les fils perpendiculaires gagnent l'ondulation perdue (*au milieu*). Enfin les fils étirés sont allongés élastiquement (*en bas*), puis se déforment de façon irréversible. Au-delà, les fils cassent et le tissu se dégrade.

la démarche de micromécanique a l'avantage que le comportement obtenu à l'échelle supérieure incorpore toutes les caractéristiques du matériau au niveau microscopique.

Naturellement le calcul de moyennes risque de faire perdre de l'information, mais un modèle qui décrirait toutes les caractéristiques microscopiques du matériau serait excessivement complexe.

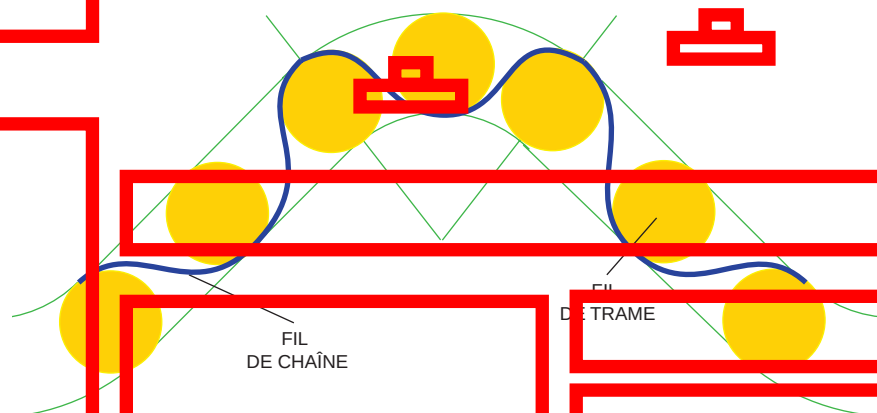
Poutres ondulées

La micromécanique modélise les tissus par un système de poutres : chaque fil du réseau est considéré comme une poutre flexible et extensible, de section faible par rapport à sa longueur. Pour décrire le comportement de la ligne moyenne (l'axe) de ces poutres, on utilise des lois de comportement linéaires élastiques : on admet que la déformation est proportionnelle à la contrainte, et que les poutres reprennent leur position initiale dès que la déformation cesse. On néglige volontairement l'hétérogénéité du fil, liée à son aspect fibreux, et susceptible d'introduire des dissipations (frottements entre fibres) et des coupages entre les différents modes de déformation (flexion/torsion) ; de même, on assimile les zones de contact entre les fils à des points (voir la figure 4).

Dans le cas de la toile, qui a l'armure la plus simple, on peut engendrer le réseau de fils par la translation de deux vecteurs de base orthogonaux, chacun étant associé à deux éléments de poutre ayant pour extrémité des nœuds qui idéalisent les zones de contact entre les fils. Ces deux vecteurs définissent la cellule de base, à l'intérieur de laquelle on analyse le comportement du tissu. Le réseau de poutres est supposé infini dans son plan.

Les éléments de poutre peuvent onduler hors du plan (ondulations transverses), tout comme les fils de chaîne et de trame d'un tissu. En revanche, on néglige les changements de forme (cisaillement) du treillis de poutres dans le plan. À chaque nœud on associe une variable de translation, le déplacement, et une variable de rotation, qui décrit l'orientation de la ligne moyenne de la poutre dans le plan vertical.

On peut alors calculer l'énergie de déformation de la cellule de base, et



3. ON DÉCRIT les grandes déformations des tissus en considérant que le fil de chaîne, par exemple, oscille dans une sorte de boîte, autour du fil de trame ; les ondulations du tube décrivent les plissements du tissu.

passer à un matériau continu équivalent en faisant tendre les dimensions de la cellule de base vers zéro. La rotation d'une poutre devient une «micro rotation».

Un matériau ainsi caractérisé par des déplacements et par des microrotations en chaque point est nommé matériau micropolaire, ou milieu de Cosserat du nom des deux frères E. Cosserat et F. Cosserat, qui les décriraient au début du XX^e siècle. Ces matériaux appartiennent à la classe plus vaste des milieux continus généralisés.

L'approche micromécanique permet ainsi de déduire le comportement du tissu à partir des propriétés des fils. Le degré de finesse de la modélisation peut être accru par la description d'interactions à plus ou moins grande portée dans le matériau. Chaque raffinement supplémentaire fait intervenir une échelle de longueur qui définit la portée des interactions relatives à un mécanisme spécifique de déformation.

Le couplage entre les fils de chaîne et les fils de trame s'exprime notamment par une relation entre les moments des forces exercées sur chacun des deux fils en contact en utilisant le principe des actions mutuelles, qui stipule que le moment exercé par le fil de chaîne sur le fil de trame est l'opposé du moment exercé par le fil de chaîne sur le fil de trame, on obtient une relation sur les microrotations de chaque fil dans son plan.

Enfin, on peut prendre en compte les glissements possibles entre fils en ajoutant des variables de déformation et de microcourbures plastiques : le glissement d'un fil est analogue à la déformation permanente d'une poutre.

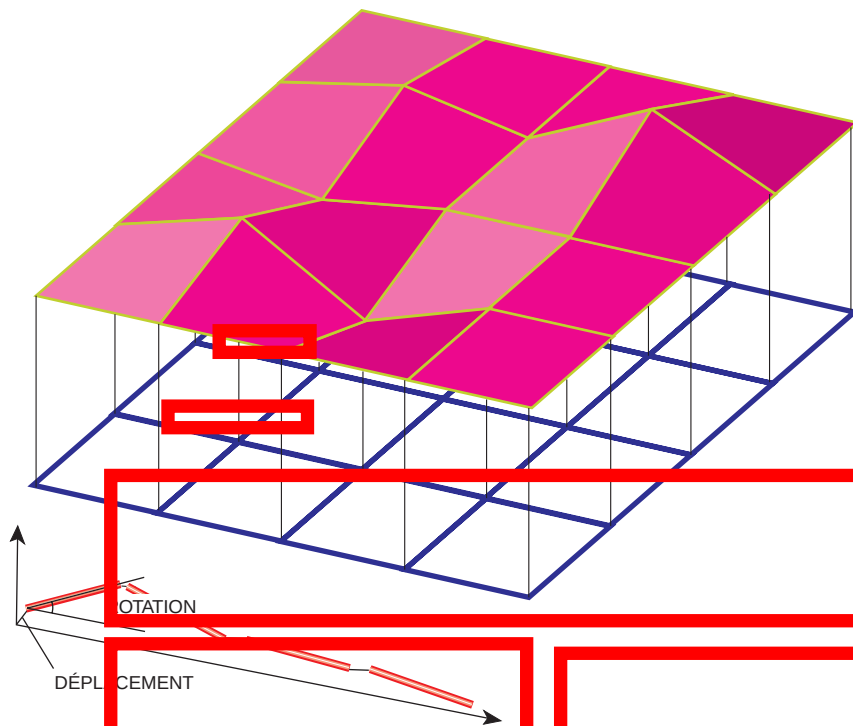
Analyses non standard et textiles

L'analyse non standard est une autre façon de passer de la description discrète à la description continue. Elle justifie mathématiquement la théorie micromécanique et, surtout, elle la complète.

L'analyse non standard fut développée dans les années 1960 par Abraham Robinson, de l'Université de Los Angeles. Elle introduit le concept de standard, qui ne peut être énoncé dans un cadre mathématique classique et qui est régi par des axiomes spécifiques nommés transfert, idéalisation et standardisation (dû à E. Nelson, de l'Université de Princeton).

Le concept de standardisation formalise l'idée intuitive d'objets mathématiques bien définis, tels les nombres entiers 0, 1, 2, 3... ou encore les ensembles de nombres relatifs, rationnels, réels... : est standard tout objet qui peut être explicitement défini par le cadre classique.

L'axiome d'idéalisation reconnaît l'existence d'entiers non standards, supérieurs à tout entier standard. De ce fait, l'ensemble des nombres réels contient, en plus des réels standards, des réels (positifs ou négatifs) très grands, très petits ou modérés. Les nombres très grands sont plus grands que tout réel standard. Les réels très petits sont plus petits que tous les nombres de la forme $1/x$, où x est un nombre réel standard : si ω est un nombre non standard très grand, le nombre $1/\omega$ est un nombre très petit non standard. Enfin, les nombres de la



4. L'ANALYSE MICROMÉCANIQUE décrit les tissus en les considérant qu'ils sont analogues à un réseau de poutres minces (ici l'armure considérée est celle de la toile). On considère que ce réseau carré est déformé de façon que, vu de dessus, sa projection reste carrée (en bleu). Les poutres sont individuellement déformées et tournées. Pour passer à un matériau continu, dont on peut calculer les déformations, on fait tendre la taille des cellules vers zéro : la rotation des poutres devient alors une microrotation.

forme $n = 1/\omega$, où n est un nombre entier, sont des non standards modérés (les nombres entiers sont standards modérés).

L'analyse non standard procure des règles de comparaison d'ordres de grandeur entre nombres réels, et elle permet de simplifier certains termes (ceux qui sont estimés très petits) dans les équations du comportement des systèmes physiques.

Les prémices de ce genre d'analyse sont déjà présentes dans les travaux du mathématicien suisse Leonhard Euler (1707-1783), qui fut surnommé le « prince des mathématiques ». Les règles du calcul non standard sont celles du calcul infinitésimal, conformes à l'intuition classique : l'axiome de standardisation stipule que tout nombre réel modéré x est très proche d'un unique réel standard noté ${}^o x$, son « ombre » ; de même, à toute fonction f qui ne prend que des valeurs modérées, on peut associer une ombre ${}^o f$, c'est-à-dire une fonction telle que, pour tout nombre standard x , la valeur prise par ${}^o f$ soit égal à l'ombre du nombre $f(x)$.

L'analyse non standard est une extension conservatrice de la mathématique

classique. Tout théorème d'analyse non standard qui peut être exprimé sans faire appel aux nouveaux concepts est vrai en mathématique classique. En revanche, elle introduit des outils nouveaux qui résolvent des problèmes difficilement solubles dans l'analyse standard.

Un outil important de l'analyse non standard est ainsi la stroboscopie, que nous avons appliquée à la modélisation des poutres. La stroboscopie permet d'obtenir une description continue d'un système à partir d'une description initialement discrète. Elle donne des conditions suffisantes pour que, à un ensemble fini de points qui donne une forme approchée d'une courbe, on puisse associer une courbe continue qui est caractérisée par la solution d'une équation aux dérivées partielles. La courbe continue est l'ombre du modèle discontinu.

Ainsi le fil du tissu, qui était assimilé à une poutre continue dans l'approche micromécanique, est idéalisé par une succession de tiges droites indéformables, connectées par des ressorts qui en constituent les articulations.

Chaque tige est soumise à un couple exercé par les tiges adjacentes. De plus, chaque nœud est soumis à une force ponctuelle, qui représente l'action des fils transverses. Ce modèle, bien que simplifié, est très riche. Tout l'intérêt de la stroboscopie est d'utiliser la puissance d'un outil continu, tout en continuant de calculer sur des objets discrets.

À partir de l'énergie du système discontinu et d'un principe de minimisation d'énergie, l'analyse non standard procure un ensemble d'équations où interviennent les variables angulaires (les angles entre les poutres). On décrit le système continu équivalent en faisant tendre la longueur de chaque tige vers un réel très petit : le théorème de stroboscopie fournit alors une équation dont l'inconnue est la variable angulaire continue, qui décrit l'orientation de la poutre ondulée en chacun de ses points.

Par cette méthode, on obtient des informations que ne donnait pas l'analyse micromécanique : par exemple, on prévoit de façon plus précise le flambement des poutres soumises aux contraintes.

La description du comportement des textiles par la mécanique des poutres ondulées (micromécanique ou non standard) s'applique à des textiles variés. Le cas de la toile que nous avons exclusivement considéré jusqu'ici est le plus simple, et la complexité de l'analyse est accrue pour des armures plus complexes, telles celle du sergé ou celle du satin (voir la page 66). Toutefois, dans le principe, on conserve la même méthode de transition d'échelles : l'énergie obtenue à l'échelle de la cellule de base doit, par sa forme, refléter le contenu microscopique de cette cellule. À l'échelle mésoscopique du matériau continu, on pourra alors envisager une classification des structures textiles selon la nature et la forme de la densité d'énergie obtenue pour le matériau continu équivalent.

Les grandes perturbations

En revanche, les deux analyses précédentes ne s'appliquent qu'à des tissus peu déformés : la description par des poutres ondulées limite les calculs à de petites perturbations d'un tissu plan, sans décrire les gauchissements

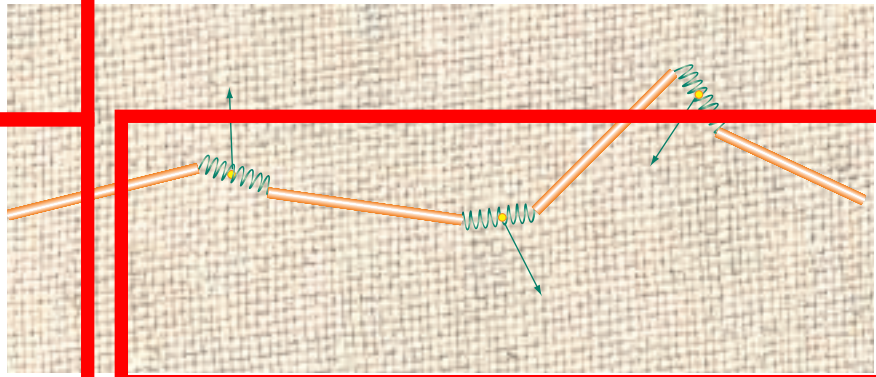
des pièces de tissu. Pour déterminer les comportements des tissus aux plus grandes perturbations, plusieurs approches ont été testées. La méthode des éléments finis, tout d'abord, divise les fils en nombreuses petites zones et calcule la déformation de chacune, à partir des lois de déformation des fils. Toutefois le nombre de calcul augmente considérablement avec la taille du tissu modélisé ; en pratique, les modélisations sont limitées à quelques centimètres carrés.

Une autre approche consiste à conserver la loi de comportement donnée par l'analyse précédente et à compléter la description : on considère une cellule du tissu sous la forme d'une boîte fictive qui entoure une ondulation du fil. La microrotation du modèle continu peut alors être identifiée avec la rotation de la cellule de base par rapport à l'axe fixe horizontal, et représente en quelque sorte l'ondulation du fil au deuxième ordre de grandeur. De même il est raisonnable de penser que les bosselures présentes dans le premier stade de déformation en traction sont associées à des ondulations d'ordre supérieur.

Gauchissement et éléments finis

Considérons alors une contrainte appliquée aux extrémités du fil, et supposons que le fil soit inextensible : la longueur de la cellule de base ne varie pas. La déformation dans la direction de traction provient alors de la diminution de la microrotation, diminution qui résulte du moment induit par la contrainte appliquée sur la cellule de base. La contrainte externe se transmet en effet le long du fil, et la cellule de base est soumise à un couple de contraintes, ayant pour bras de levier la demi hauteur d'ondulation. Cet exemple révèle bien l'origine microscopique des variables cinématique (microrotation) et statiques (couple de contraintes) de la loi de comportement micropolaire. La courbe unidimensionnelle de traction obtenue par la théorie reproduit bien la courbe mesurée, et cette analyse rend compte de façon quantitative de la courbe de traction d'un tissu.

Une des difficultés de la réalisation de vêtements est liée au caractère non développable des surfaces textiles : la



5. LE Fil des tiges est considéré par l'analyse non standard comme un ensemble de tiges inextensibles (en rouge) relier par des ressorts (en vert, on tient compte de l'élasticité des fils). Les contraintes exercées par les fils transverses sont représentées par des forces glissant entre les tiges, sur les ressorts (en vert). On obtient ainsi des équations qui décrivent la mécanique des fils (par exemple, la somme des sinus des angles que font les tiges avec l'horizontale est nulle). L'analyse classique obtient le comportement du fil en faisant tendre la longueur des tiges vers zéro, mais elle perd ainsi la possibilité de considérer des échelles intermédiaires. Quand l'analyse non standard fait tendre la longueur des tiges vers zéro, elle conserve la possibilité de décrire simultanément ces phénomènes à des échelles différentes : par exemple, une raideur du fil variable (constantes de raideur des ressorts différentes selon les tiges).

surface ne peut être déployée sur un plan sans coupure. Il faut alors savoir où et comment découper les pièces à plat qui constitueront le patron afin de minimiser la quantité de tissu utilisée, tout en obtenant une résistance aux déformations satisfaisantes. De surcroît les utilisateurs de tissus se fondent sur les gauchissements que peuvent prendre les tissus au cours de leur assemblage : la souplesse du tissu est souvent mise à profit pour raccorder les différentes pièces.

Pour prévoir le comportement des tissus, aucune des approches précédentes ne suffit, car le gauchissement, par exemple, correspond à une déformation hors du plan du tissu. Aussi doit-on utiliser alors des techniques de

calcul numérique par éléments finis, qui divisent le tissu gaucho en un grand nombre de cellules, calculent les déformations pour chaque cellule et relient ensuite au comportement global. L'analyse micromécanique, aux petites ou aux grandes perturbations, sert alors à décrire les petits éléments.

Aujourd'hui la méthode des éléments finis donne une bonne description de petites pièces de tissu et l'on cherche à étendre la taille des pièces décrites.

L'intégration d'une modélisation mécanique dans les programmes de conception assistée par ordinateur constitue un progrès de taille dans l'industrie de la confection. C'est un travail en cours.

Jean-François GANGHOFFER est chercheur en mécanique et en science des matériaux à l'Institut de chimie des surfaces et interfaces (CNRS), à Mulhouse. Massimo MAGNO est chercheur à l'École nationale supérieure des industries textiles de Mulhouse et au Laboratoire de mathématiques et applications de l'Université de Haute-Alsace.

B. OLIFSSON, *A General Model of a Fabric as a Geometric-mechanical Structure*, in *Journal of the Textile Institute*, p. 541, 1964.

A. ASKAR et A.S. Cakmak, *A Structural Model of a Micropolar Continuum*, in *Int. J. Engng. Sci.*, vol. 6, p. 583, 1968.

I.P. VANDERBERG, *On the Relation between Elementary Partial Difference Equations and Partial Differential Equations*, in *Annals of Pure and Applied Logic*, vol. 92, pp. 235-265, 1999.

Massimo MAGNO, *Modèle mécanique du comportement de structure souple aux échelles microscopique et macroscopique*, Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur de l'Université de Haute-Alsace, 1999.

Corinne JUNG, *Analyse micromécanique du comportement d'un tissu, cas de l'armure toile*, Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur de l'Université de Haute-Alsace, 1999.



Des tissus aux couleurs changeantes

SERGE BERTHIER • JACQUES LAFAIT

L'étude des structures microscopiques des ailes de papillon a fourni les clés des couleurs iridescentes. On tente de créer des tissus qui ont des structures et, par conséquent, des couleurs comparables.

L'iris est la partie colorée de l'œil ; c'est aussi l'ensemble des couleurs de l'arc-en-ciel (pour les Grecs, la déesse Iris était la personnification de l'arc-en-ciel). L'iridescence est la propriété des objets qui imitent l'iris : le physicien qualifie d'iridescent tout objet dont la couleur varie avec l'angle d'incidence des rayons lumineux qui l'éclairent ou avec l'angle d'observation. Le phénomène est assez fréquent dans la nature, mais il est surtout intense chez certains insectes (des coleoptères et des lépidoptères diurnes) ou chez quelques oiseaux. De nombreux physiciens se sont intéressés au phénomène et en ont cherché l'explication. Parce qu'elles ont révélé les structures responsables du phénomène physique, les techniques d'imagerie électronique ont dévoilé les secrets de l'iridescence.

Les papillons, qui utilisent presque tous les phénomènes physiques de variation des couleurs

et y associent parfois des pigments, représentent un excellent modèle de l'iridescence. Ils ont fait naître dans l'imagination des physiciens l'idée d'appliquer le phénomène à des tissus fabriqués avec des fibres dont la structure serait proche de celle des ailes de papillon. Pour comprendre quel serait l'aspect de tels tissus, examinons ce qu'est l'iridescence des ailes de papillon, et comment on peut appliquer les enseignements tirés d'une telle étude à l'élaboration de tissus d'un type nouveau.

L'origine des couleurs

Quand elle n'est pas due à un pigment, la couleur naît d'un des quatre phénomènes physiques suivants : la réfraction, les interférences, la diffraction et la diffusion. Cette séparation est plus historique que physique, car, si les formalismes sont souvent différents, les phénomènes sous-jacents se ressemblent. Tous reposent sur l'interaction d'une onde électromagnétique avec les atomes qui constituent les matériaux colorés. La distinction dépend de la taille et de la forme des structures où a lieu l'interaction.

Le phénomène de réfraction sépare la lumière blanche en ses divers constituants. Lorsqu'un faisceau lumineux traverse un prisme, l'angle de déviation des rayonnements qui le composent est proportionnel à la différence d'indice de réfraction du premier milieu traversé et de celui du prisme. Dans le verre, l'indice de réfraction de la lumière visible diminue continûment lorsque

la longueur d'onde augmente, c'est-à-dire du violet au rouge : les rayons situés du côté rouge du spectre sont moins déviés que ceux du côté violet. De tous les phénomènes évoqués, c'est le seul qui ne soit pas utilisé chez les papillons.

Les réseaux, systèmes constitués d'un grand nombre d'objets diffractants régulièrement espacés, décomposent également la lumière, et les papillons utilisent le phénomène. Dans les réseaux par transmission, ces objets, nommés traits, sont des fentes séparées par des zones opaques ; dans les réseaux par réflexion, tels ceux des papillons, ce sont des miroirs. Lorsqu'une onde électromagnétique atteint un tel réseau, elle est diffractée dans toutes les directions de l'espace par chaque trait, qui agit comme une source de lumière secondaire : les ondes sortantes interfèrent. Pour une longueur d'onde donnée, ces interférences sont alternativement constructives (c'est-à-dire que l'on observe effectivement une lumière) et destructives, c'est-à-dire que l'on n'observe plus rien, selon la direction d'observation (voir l'encadré page ??).

En lumière blanche, les rayonnements qui ont la même longueur d'onde interfèrent de façon constructive dans des directions qui dépendent de cette longueur d'onde. Ainsi, selon la direction d'incidence de la lumière par rapport au réseau, la couleur qui émerge du réseau varie : il y a bien iridescence. Les directions correspondant à des interférences constructives ne dépendent que du pas du réseau (l'intervalle entre deux traits) et de l'angle d'incidence de la lumière sur le réseau.

Le déphasage entre deux ondes issues de deux traits adjacents varie comme le sinus de l'angle d'incidence (c'est-à-dire dans le même sens que l'angle lui-même), et les interférences sont constructives lorsque ce déphasage est égal à un nombre entier de longueurs d'onde ; contrairement au prisme, le rouge est plus dévié que le bleu. Les réseaux que l'on observe chez les papillons comptent environ 1 000 traits par millimètre, ce qui les rend facilement observables au microscope

optique. Or, les ailes de papillon sont pourvues de telles structures en réseaux : la diffraction intervient dans l'iridescence.

Les interférences de films minces sont une autre source de variations des couleurs. Ce sont elles qui créent les irisations sur les bulles de savon ou sur les films d'huile, par exemple.

La couleur naît à nouveau de l'interaction de deux ondes en déphasage constructif. Quand on observe un film en réflexion, les couleurs naissent des interférences entre l'onde directement réfléchie par la face supérieure du film et celle qui pénètre dans le film et est réfléchie par sa face inférieure. Le déphasage, qui dépend de l'épaisseur optique du film, varie, ici, comme le cosinus de l'angle de réfraction : la longueur d'onde donnant des interférences constructives diminue quand l'angle d'incidence augmente.

De surcroît, l'épaisseur d'un film d'interférences observé en réflexion, dans une direction particulière, et qui éteint une longueur d'onde donnée, est de l'ordre du quart de cette dernière. Dans le spectre visible, cette dimension est donc de l'ordre de 100 à 150 nanomètres (un nanomètre est un milliardième de mètre), c'est-à-dire bien inférieure à la résolution des microscopes optiques. L'ordre de grandeur de ces dimensions explique que certains physiciens du début du XX^e siècle soient restés sceptiques quant à l'origine interférentielle de l'iridescence des insectes.

La dernière source physique de coloration (dernière par l'ordre choisi ici, mais pas quant à son importance) est la diffusion. Les couleurs observées résultent de la diffusion de la lumière par les petites particules, par exemple les poussières ou les gouttelettes d'eau, en suspension dans les gaz. Une onde électromagnétique interagit d'autant mieux avec une particule que la

1. SELON L'INCIDENCE DE L'ÉCLAIRAGE, la couleur des ailes du papillon *Morpho menelaus* change : c'est le phénomène d'iridescence. Ici la même aile a été photographiée sous huit incidences différentes. Après avoir découvert ce qui, chez les papillons, engendre le phénomène, des physiciens tentent de le recréer sur des tissus.

taille de l'objet est proche de la longueur d'onde : l'efficacité de la diffusion (le rapport de l'énergie diffusée sur l'intensité incidente) est maximale lorsque le rayon est voisin de la longueur d'onde. Elle tend vers zéro lorsque la longueur d'onde croît ou que la taille des particules diminue.

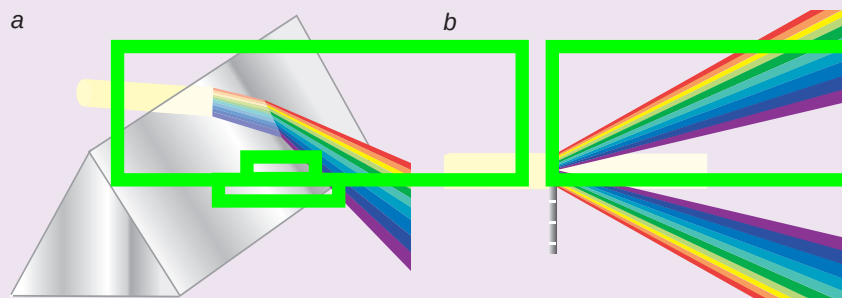
Quelles en sont les conséquences pour l'effet coloré? Quand une particule de taille donnée diffuse avec une efficacité maximale une longueur d'onde de même taille, elle diffuse aussi

(même si l'efficacité est inférieure) les longueurs d'onde plus petites : les grosses particules diffusent principalement la lumière rouge (dont la longueur d'onde est de l'ordre de 0,75 micromètre, ou même de 1 micromètre) : elles diffusent aussi, mais avec une efficacité moindre, tous les rayonnements de longueurs d'onde inférieures, de sorte que la lumière diffusée est à peu près blanche (c'est, par exemple, pourquoi la fumée de cigarette est blanchâtre). Au contraire,

les petites particules ne diffusent pas les grandes longueurs d'onde, mais les bleus (de l'ordre de 0,4 micromètre). C'est pourquoi les couleurs obtenues par diffusion sont situées à l'extrémité bleue du spectre (et que le ciel est bleu). Sauf cas particulier, la diffusion, peu sensible à l'incidence, ne donne pas lieu à un phénomène d'iridescence.

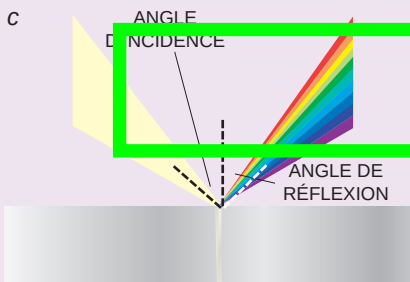
Telles sont les sources physiques des couleurs. Toutes sont liées à la structure des matériaux «colorés» tout autant qu'à leur nature. Aussi, dans cet examen des phénomènes, nous n'avons pas considéré les pigments qui absorbent une longueur d'onde donnée et qui n'interviennent dans l'iridescence que dans des conditions très particulières.

L'origine physique des couleurs



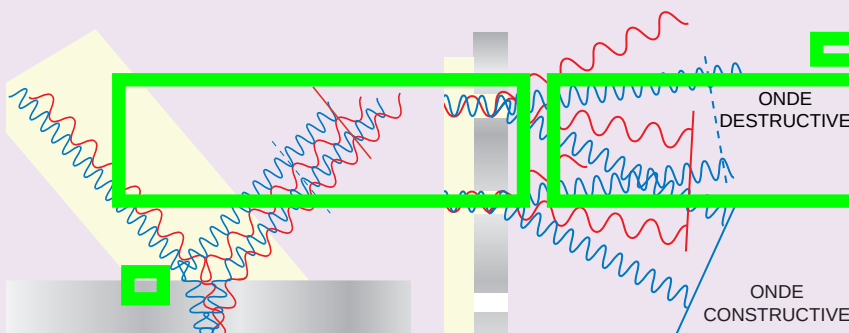
La réfraction par un prisme (a) est l'une des façons de séparer la lumière blanche en ses constituants. Elle n'est pas utilisée dans l'iridescence. La diffraction par un réseau (b) crée

de l'iridescence : à chaque structure diffractante, la lumière est décomposée, et certains rayons interfèrent de façon constructive pour redonner les couleurs de l'arc-en-ciel.



Les couches minces créent des phénomènes d'interférences (c) : certains rayons réfléchis et réfractés interfèrent de façon constructive pour créer de l'iridescence. La diffusion (d) est une autre façon de décomposer la lumière,

mais elle ne crée pas d'iridescence. Les grosses particules diffusent surtout le rouge, mais aussi les autres longueurs d'onde, ce qui donne un aspect blanc. Les petites particules ne diffusent que le bleu.



Les ondes lumineuses interagissent de façon constructive quand elles sont en phase (c'est-à-dire que leur minimums et leur maximums coïncident) : sur le schéma de gauche, c'est le cas du rayonnement rouge. Quand

elles sont en opposition de phase (c'est-à-dire que les minimums des unes correspondent aux maximums des autres), la «couleur» s'éteint : c'est le cas du bleu sur le schéma de droite, en haut.

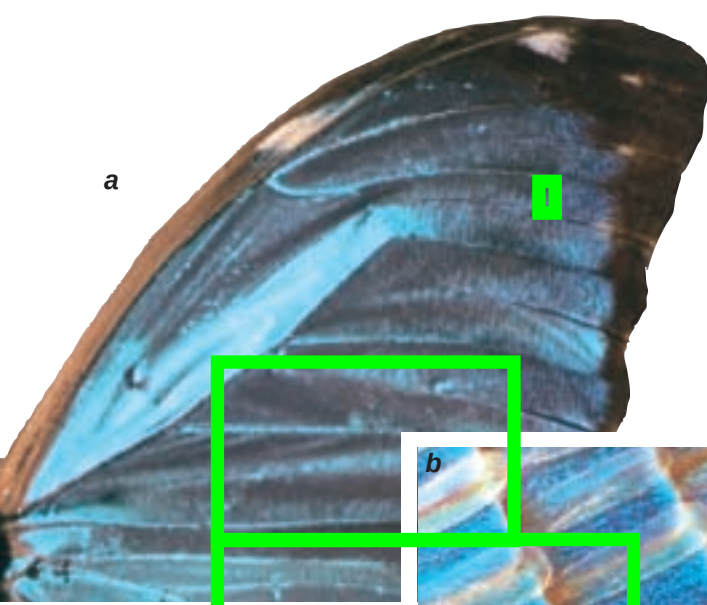
La structure des ailes de papillon

Les papillons de la famille des *Morphidae* et ceux de la famille des *Uraniidae* ont été étudiés pour les effets d'iridescence de leurs ailes. L'observation de ces ailes à cinq grossissements différents illustre le phénomène et révèle les structures nécessaires à son élaboration. Nous avons observé l'aile entière, à l'œil nu, les écailles (dont la longueur est de l'ordre de 100 micromètres, ou millionnièmes de mètre), leur stries (1 micromètre environ) et les structures des stries, dont la taille varie de 50 à 100 nanomètres ; enfin, nous avons analysé les molécules qui les constituent. L'étude d'éléments de plus en plus petits a suivi l'évolution historique, liée aux progrès de l'imagerie.

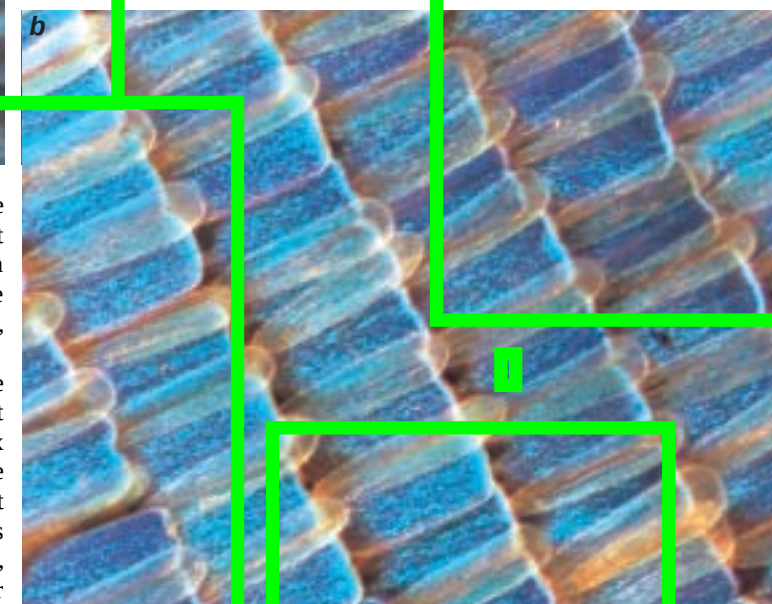
L'aile est constituée de deux membranes, qui se développent indépendamment et s'accroissent en fin de développement. Progressivement, cette double membrane s'organise autour d'un réseau de nervures caractéristique de chaque espèce ; ces nervures délimitent des portions d'aile, nommées cellules alaires, dont la surface est relativement plane et homogène. L'aile est recouverte d'écailles sur ses deux faces.

Les écailles, formées de deux feuillets de chitine (un constituant des carapaces des crustacés, par exemple), ont plusieurs rôles, mais nous aborderons seulement celui de support de la couleur et des motifs chromatiques. La forme des écailles, leur taille et leur implantation sont variées et influent sur le rendu des couleurs. Le feuillet

a



b



2. UNE AILE de papillon *Morpho menelaus*, observée à différents grossissements, révèle l'origine du phénomène d'iridescence. À l'œil nu (a), sous une incidence donnée, l'aile apparaît bleue. Si l'on observe au microscope (b, le grossissement est égal à 100), on constate que la face dorsale des ailes est tapissée d'écailles iridescentes, qui forment un fond continu. Elles sont couvertes d'écailles de recouvrement transparentes, placées aux joints des précédentes. Observée au microscope électronique, une écaille présente des stries (1 800 stries par millimètre), qui forment un réseau régulier (c, le grossissement est égal à 1 000). L'observation de ces stries, au microscope électronique à balayage montre qu'elles sont constituées d'un empilement

de lamelles de chitine séparées par de l'air et soutenues par des trabécules (trabécules) microscopiques. Une strie contient en moyenne six lamelles (vue de profil, d, x 50 000). Une écaille entière se comporte comme un empilement régulier de couches de chitine (deux stries vues en coupe, e, x 30 000) : c'est la source principale

de l'iridescence. À une échelle supérieure, les stries créent aussi un effet d'iridescence par diffraction, mais il est moins important que le précédent, car toutes les écailles ne sont pas rigoureusement identiques, et l'intensité du rayonnement réfléchi diminue.

inférieure des écailles, face à la membrane alaire, est généralement lisse, ou un peu ondulée, tandis que le feuillet supérieur, plus épais, a un relief plus marqué.

Les écailles de la face dorsale, qui nous intéressent ici, sont disposées sur deux épaisseurs : les écailles de fond sont en contact direct avec la membrane alaire ; les écailles de recouvrement, disposées en quinconce sur les précédentes, les recouvrent plus ou moins selon les espèces (voir la figure 2).

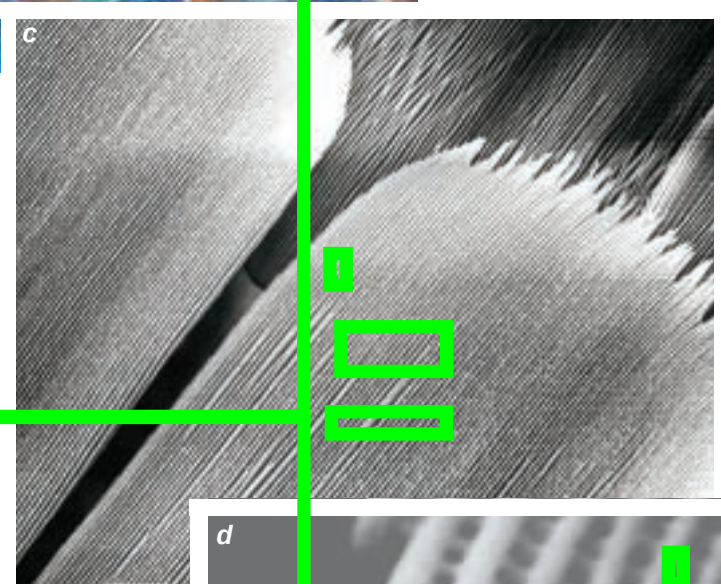
La couleur des écailles résulte soit des pigments qu'elles contiennent, soit de leur structure. Chez les papillons de la famille des *Uraniidae*, les écailles de fond contiennent des pigments et forment un écran noir, quasi continu, sur lequel se détachent les écailles de recouvrement, dites structurales (leur structure impose la couleur). Au contraire, chez les papillons de la famille des *Morphidae*, les écailles de fond sont structurales, et les écailles de recouvrement laissent passer la lumière : ou bien elles sont transparentes, ou bien elles sont atrophiées.

Les écailles structurales présentent, sur leur face supérieure, un réseau de stries longitudinales, parallèles à l'axe de l'écaille. La distance entre les stries est variable : de 500 nanomètres sur les écailles structurales de certains *Morphidae* (soit plus de 2 000 traits par millimètre) à plus de 4 micromètres sur celles des *Uraniidae*. Sur les écailles pigmentaires, la distance de deux micromètres. La hauteur des stries varie également d'une centaine de nanomètres à un micromètre.

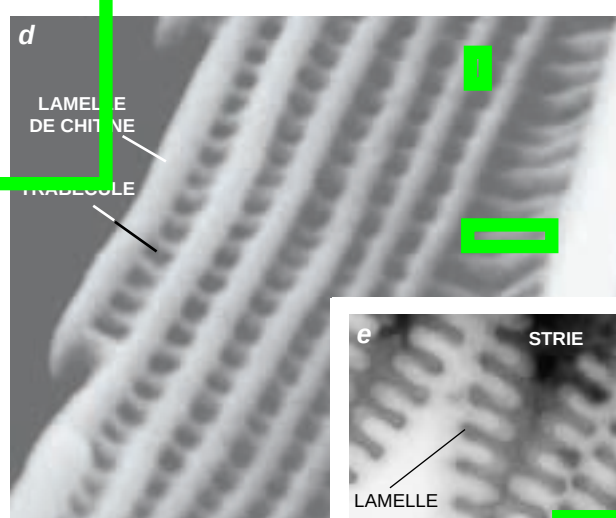
Ces stries sont constituées d'un empilement de 6 à 12 lamelles de chitine, aploïdes et légèrement arrondies à leur extrémité, et d'une épaisseur de l'ordre de 90 à 100 nanomètres. Les lamelles sont maintenues à distance constante les unes des autres par un réseau microscopique de trabécules : chaque strie se comporte comme un ensemble de couches alternées d'air et de chitine, régulièrement espacées.

Reste le dernier échelon – moléculaire – de l'échelle : les longues chaînes de chitine assurant la rigidité de l'ensemble des structures et, parfois, les pigments qui, selon les espèces, sont répartis de façon homogène au sein même des structures ou agglomérés sous forme de petites granules ovoïdes, entre les stries.

c

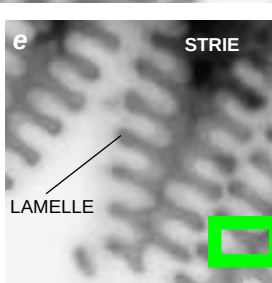


d



LAMELLE DE CHITINE
TRABÉCULE

e



STRIE

LAMELLE

Structure et couleur

Remontons maintenant un à un les barreaux de l'échelle en observant comment ils agissent sur la couleur. Dans le cas des écailles pigmentaires, la couleur est imposée par les pigments et elle est peu modifiée par les structures des autres échelons et par la disposition des écailles. Généralement, les pigments ne donnent guère d'effets d'iridescence.

Les couleurs structurales naissent à l'échelon des empilements de lamelles, qui forment une multicouche, où naissent des interférences. C'est la source principale de l'iridescence. Chez certaines espèces, comme chez les stries constituent aussi un réseau de diffraction par réflexion, qui donne lieu également à un effet d'iridescence, moins important que le précédent. Dans les deux cas, les épaisseurs

optiques des couches (de l'ordre de 100 nanomètres) ou le nombre de stries (de 1 500 à 2 000 par nanomètre) sont tels que les teintes obtenues sont à dominante bleue, avec des variations allant du pourpre au vert.

À chaque passage d'un échelon à l'échelon supérieur (les stries, les écailles puis les ailes) l'intensité et la pureté du rayonnement réémis diminuent, parce que la lumière rencontre des écailles d'un autre type, ou que la structure des écailles change, ou enfin que leur arrangement sur l'aile varie.

Chez les *Morphidae*, les écailles structurales, généralement plates et constituant d'excellents miroirs, alternent avec des écailles plus petites, qui diffusent la lumière. Parfois, ces écailles sont atrophiées et ne diffusent pas. Inversement, chez certaines espèces, les écailles de recouvrement cachent plus

de 80 pour cent de la surface des écailles structurales : l'ensemble a un aspect terne. Ainsi, le mieux étant parfois l'ennemi du bien, l'accumulation de structures susceptibles de donner naissance à un phénomène d'iridescence risque de brouiller l'effet et de donner un aspect mat à la structure.

Les mesures spectrales effectuées à l'échelle macroscopique sur des *Morphidae* et des *Uraniidae* révèlent d'importants effets d'iridescence, du pourpre au bleu-vert chez les premiers, du violet au vert-jaune chez les seconds.

Toutefois, la pureté des rayonnements iridescents est faible. Ces deux familles de papillons comptent pourtant parmi les plus éclatantes, ce qui laisse bien augurer de l'aspect de tissus iridescents : la pureté des couleurs serait comparable à celle des papillons. Examinons maintenant quelles structures confèrent l'iridescence à des fibres textiles.

La quantification des couleurs et de l'iridescence

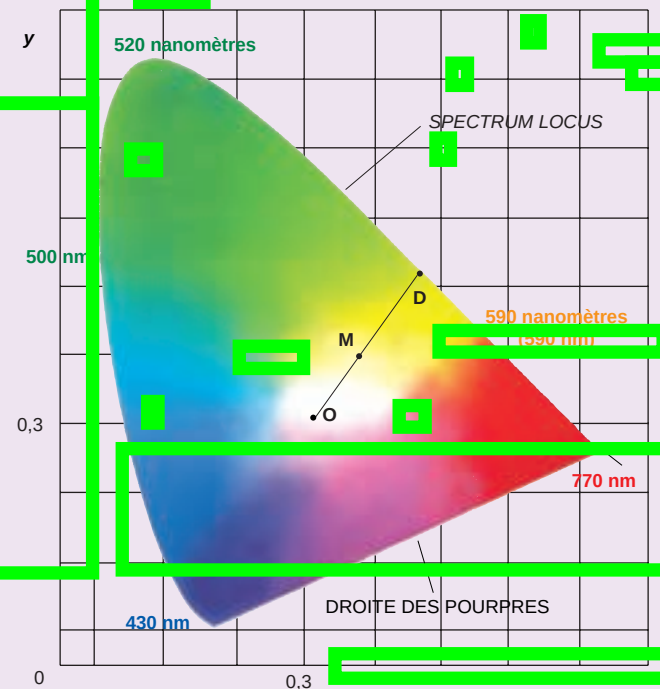
Pour définir le phénomène d'iridescence, on doit d'abord étalonner les couleurs de façon quantitative et objective, indépendamment de l'appréciation subjective d'un observateur. Les recherches en optique physiologique sur l'œil de l'observateur humain ont montré que la rétine contient trois types de cônes sensibles à la couleur, et que chaque type réagit à une gamme de longueurs d'onde particulière ; ils ont des spectres d'absorption spécifiques, qui engendrent trois types de réactions physiologiques différentes mais simultanées.

Le modèle trichromatique qui en découle rend compte de la perception visuelle de la couleur grâce à trois grandeurs qui dérivent des réactions de ces trois types de cônes à une lumière donnée. Une table standard a été établie : elle met en relation chaque longueur d'onde monochromatique du spectre visible avec trois grandeurs qui caractérisent les réactions de l'œil d'un observateur «moyen» à ce rayonnement. Ces trois grandeurs peuvent être combinées de différentes façons.

Les coloristes des tissus et de l'industrie utilisent souvent l'ensemble x, y, Y , où x et y caractérisent la couleur, et Y sa luminosité. Dans cette représentation, le diagramme chromatique est l'ensemble des points de coordonnées x, y associés à une couleur visible par l'œil humain «moyen» avec une intensité Y donnée. Ce diagramme est délimité par une courbe nommée *spectrum locus*, qui est la représentation de la table standard établie pour les couleurs pures monochromatiques. Le point de coordonnées $(1/3 ; 1/3)$, au centre du diagramme, correspond au blanc. La dominante d'une teinte associée au point M de coordonnées x et y est donnée par la longueur d'onde du point situé à l'intersection de la droite OM avec la courbe du *spectrum locus*. La pureté de cette teinte est définie par le rapport des segments OM/OD . Ainsi le blanc est associé à une pureté nulle et la pureté 1 est obtenue pour les points situés sur le *spectrum locus*, c'est-à-dire pour les couleurs monochromatiques. Plus le point M se rapproche de O , plus

la pureté de la teinte associée est faible et plus la couleur paraît délavée.

La définition d'une couleur par ses coordonnées trichromatiques est très réductionniste et ne rend pas compte de tout ce



Le diagramme chromatique est l'ensemble des couleurs, d'intensité donnée, visibles par l'œil humain. Il est délimité par le *spectrum locus*, lieu des teintes pures monochromatiques. Le point O ($1/3 ; 1/3$) correspond au blanc. La pureté de tout point M de ce diagramme est définie par le rapport des segments OM sur OD , où D est l'intersection de OM

La hiérarchie des structures évoquée pour les ailes d'un papillon existe également dans les tissus, pratiquement aux mêmes échelles : un tissu « standard » est composé de fils entrelacés à l'échelle millimétrique, et chaque fil, en général cylindrique, d'un diamètre de l'ordre d'une centaine de micromètres, résulte du filage d'une soixantaine de brins, eux aussi cylindriques et d'un diamètre de l'ordre de 10 micromètres. Ainsi existe-t-il des analogies entre les brins et les stries, les fils et les écailles, le tissu et les ailes. Or, nous avons montré que, chez les papillons, l'iridescence naît dans la structure en couches régulières des écailles. Par conséquent, c'est sur le brin cylindrique d'un tissu que l'on a imaginé de créer un effet d'iridescence : on enrobe les brins d'une structure interférentielle, composée de couches minces dont l'épaisseur et l'indice optique sont appropriés. Cette

solution, fondée sur le phénomène d'interférence, semble aujourd'hui plus facilement réalisable qu'une solution qui reposerait sur le phénomène de diffraction.

Du brin au tissu

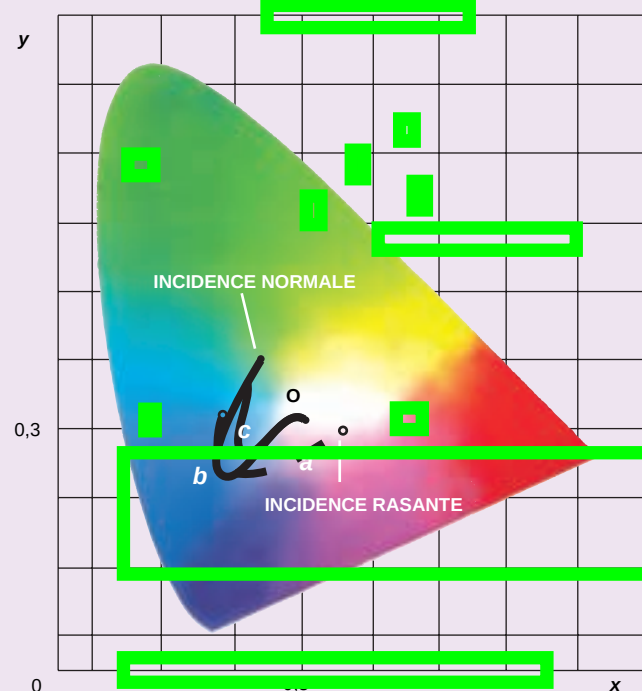
Pour prévoir l'aspect d'un tissu fabriqué avec des brins recouverts d'une telle revêtement, nous l'avons modélisé. On commence par étudier le problème sur une structure simplifiée qui se prête assez facilement à un calcul exact : on utilise une couche mince, à faces planes et parallèles, dont l'épaisseur est égale à 10 micromètres et qui joue le rôle du brin textile (voir la figure 3). On utilise alors des lois de l'optique des couches minces, comme on le fait pour la conception des traitements multicouches des lentilles des objectifs photographiques ou des lunettes, par exemple.

cherchons avec un nombre minimal de couches minces, à obtenir un effet d'iridescence maximal, c'est-à-dire une variation de couleurs dans un domaine spectral aussi large que possible, lorsque l'angle d'observation varie de 0 degré (c'est l'incidence normale) à 90 degrés (c'est l'incidence rasante).

Les procédés de fabrication imposent une épaisseur minimale pour les dépôts (de l'ordre de 100 nanomètres) et la nature des matériaux utilisables, c'est-à-dire des indices optiques compris entre 1,4 et 1,7. On sait définir, par le calcul, les paramètres expérimentaux, tels l'épaisseur et l'indice

opaque des couches, qui donneront une iridescence centrée sur une couleur donnée. En jouant sur ces paramètres et sur

qui fait la subtilité de la perception visuelle d'un effet coloré. Le paramètre principal, qui n'est pas pris en compte dans cette quantification, est la texture du matériau coloré qui peut modifier la perception de la couleur. Les caractéristiques psycho-sensorielles de l'observateur, sa culture, son éducation, certaines maladies, par exemple, modifient aussi la perception. Toutefois,

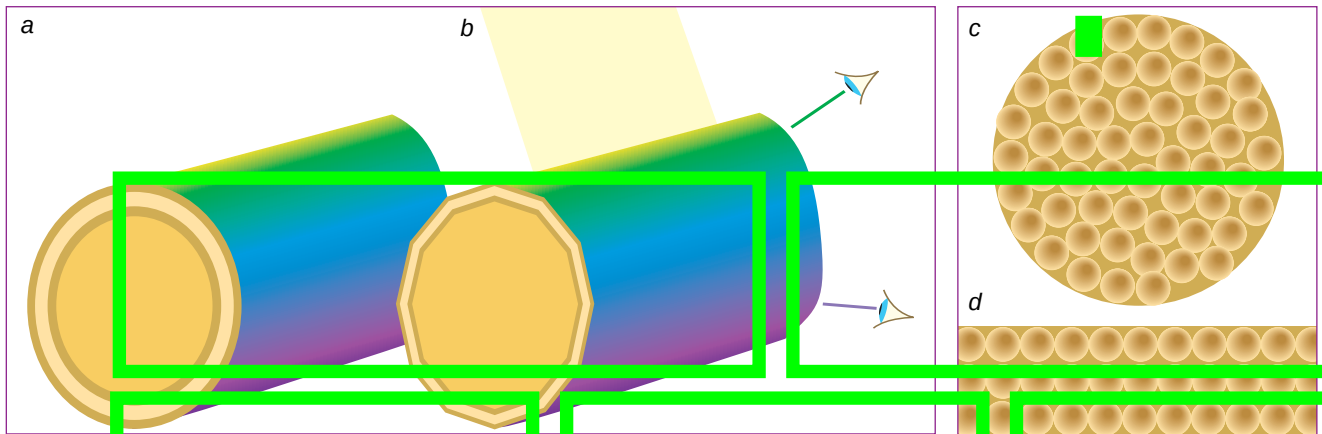


avec le *spectrum locus*. À chaque point de la courbe d'iridescence d'une aile de papillon *Morpho menelaus* (a) correspond un angle d'incidence particulier, de l'incidence normale à l'incidence rasante. La courbe d'iridescence d'un modèle de tissu simplifié (b) et celle d'un modèle plus élaboré (c) sont proches de la courbe d'iridescence du papillon.

pour un matériau donné, ayant une texture donnée, cette qualification par trois variables est généralement suffisante pour assurer la reproductibilité industrielle d'une teinte.

Les trois grandeurs colorimétriques x , y , z associées à chaque point du diagramme chromatique portent, de manière intégrée, l'information sur la répartition spectrale de la lumière qui a pénétré dans l'œil. Cette répartition est celle de la lumière qui a servi à éclairer le tissu étudié, modifiée par le spectre de réflexion du tissu : la couleur d'un tissu dépend de l'éclairage sous lequel on l'observe (lumière du jour ou lumière artificielle). Ainsi, le spectre de réflexion du tissu dépend de l'angle sous lequel il est éclairé ou observé. La variation de couleur qui en résulte constitue le phénomène d'iridescence que l'on peut ainsi étudier de façon quantitative. La courbe d'iridescence d'un objet est l'ensemble des couleurs de cet objet observé sous des incidences variables, de l'incidence normale à l'incidence rasante. Pour prévoir l'aspect d'un tissu dont la structure microscopique a été conçue pour ressembler à celle des ailes de papillons, on calcule sa courbe d'iridescence. Lorsque la structure est très simplifiée (b), le calcul prédit un effet d'iridescence qui s'étend du vert au bleu, de l'incidence normale à l'incidence rasante. La pureté de la teinte se dégrade aux angles d'observation élevés, pour tendre vers le blanc sous une incidence rasante. Toutefois, la luminosité des teintes observées reste satisfaisante puisque l'intensité de la lumière réfléchie reste comprise entre 7 et 20 pour cent de l'intensité de lumière incidente.

Quand on considère une structure de tissu plus complexe et plus proche de la réalité, on obtient une courbe d'iridescence (c) un peu plus réduite vers les grandes longueurs d'onde. Elle s'étend maintenant du vert-bleu au bleu. La pureté des teintes diminue un peu, notamment aux incidences moyennes, vers 45 degrés. En revanche, la luminosité du phénomène n'est pratiquement pas modifiée. Les courbes d'iridescence obtenues avec un tissu simplifié et avec un tissu plus proche de la réalité ressemblent à la courbe d'iridescence d'une aile de papillon *Morpho menelaus* (a) : la gamme des teintes et les puretés sont comparables.



3. LA MODÉLISATION des brins et des fils d'un tissu permet aux physiciens de prévoir quel traitement rend des fibres iridescentes. Dans le modèle le plus simple, le brin cylindrique est assimilé à une couche plane recouverte d'un empilement de couches minces planes et parallèles, qui constituent une structure interférentielle. On montre que l'on obtient un effet d'iridescence notable avec deux à trois couches d'indices de réflexion différents (a). On améliore ensuite le modèle en simulant le brin par un cylindre dont la section est un polygone de 72 côtés

recouverts des couches minces interférentielles. Le calcul montre que l'iridescence persiste : la couleur change en fonction de l'angle d'observation (b). Les fils tissés sont composés d'environ 64 brins analogues au précédent (c) ; la modélisation est alors reprise à l'échelle du fil pour s'assurer que la superposition des effets de plusieurs brins ne brouille pas l'iridescence. Une simplification consiste à assimiler chaque couche de brins à une lame à faces parallèles séparée de la suivante par une mince couche d'air (d). Les couleurs iridescentes persistent.

teinte). Étant donné les contraintes théoriques et les contraintes industrielles, on montre qu'une seule couche mince ne suffit pas à réaliser un effet d'iridescence notable, mais que l'empilement de deux ou trois couches, faisant alterner des indices faibles et élevés, donne l'effet recherché.

La modélisation des tissus iridescents

Ensuite, nous avons fait un calcul plus réaliste sur un brin cylindrique. Pour simplifier le calcul, la section du cylindre est assimilée à une section polygonale régulière de 72 côtés. Le calcul d'interférences des couches multiples est fait sur chacune de ces faces. Les faisceaux lumineux réfléchis par toutes les faces du brin sont ensuite sommés dans toutes les directions de réflexion (on suppose que l'éclairage du tissu est diffus et isotrope, c'est-à-dire qu'il est uniformément réparti en intensité dans toutes les directions de l'espace).

Ce calcul montre que l'effet d'iridescence persiste, même si la gamme spectrale est réduite un peu du côté des grandes longueurs d'onde et qu'elle s'étend plutôt du vert-bleu au violet. De surcroît, la pureté des teintes diminue aux irrégularités moyennes. En revanche, la luminosité du phénomène n'est quasiment pas modifiée par ce calcul plus conforme à la réalité.

Encore convient-il ensuite d'évaluer l'évolution du phénomène quand on passe de l'échelle du brin à celle du

fil, ce qui correspond – pour poursuivre notre analogie avec les papillons – au passage des stries aux écailles. À nouveau, on introduit des simplifications : on assimile le fil à un empilement régulier de huit couches de huit brins alignés. Ensuite, on assimile chaque couche de brins à une lame à faces parallèles, séparée de la suivante par une mince couche d'air, et l'on calcule l'intensité de tous les faisceaux lumineux réfléchis dans cet ensemble de huit couches. Cette simplification drastique sert à prévoir qualitativement le sens de l'évolution de la pureté et de la luminosité des couleurs, sachant que la gamme spectrale de l'iridescence est fixée par les propriétés du revêtement appliqué sur chaque brin. Dans cette configuration, la luminosité quadruple, mais la pureté est dégradée.

Se para-t-on, un jour, de tissus qui ressembleraient aux ailes des papillons les plus chatoyants ? Le calcul prévoit que l'on obtiendrait un large domaine spectral d'iridescence, avec des teintes un peu délavées, mais très lumineuses (l'intensité de la lumière réémise serait comprise entre 20 et 70 pour cent de celle de la lumière incidente). C'est bien ce que l'on observe sur les papillons quand on effectue des mesures optiques à l'échelle de l'aile, assemblage d'écailles. La dégradation de la pureté de la couleur quand on passe d'un brin cylindrique à une fibre, puis au tissu, serait comparable à celle que l'on obtient sur l'aile de papillon quand on passe de la strie à l'écaille, puis à l'aile.

La réalisation de fibres textiles iridescentes passe donc par le dépôt de deux ou trois couches minces interférentielles de matériaux adaptés sur les brins composant les fils. La souplesse de la technique interférentielle fournit diverses gammes de couleurs du vert au violet ou de l'orange au vert. L'obtention, par la technique interférentielle, d'une gamme d'iridescence dans le rouge semble plus difficile, et les papillons eux-mêmes ne présentent pas d'effets d'iridescence dans le rouge. Doit-on enlever à faire mieux que la nature ? Ce n'est peut-être pas nécessaire, puisque la sensibilité de l'œil humain dans le domaine spectral du rouge est inférieure à sa sensibilité aux couleurs du reste du spectre.

Serge BERTHIER est professeur de physique à l'Université Paris 7-Denis Diderot. Il mène ses recherches avec Jacques LEFAIT, directeur de recherches au CNRS, dans le Laboratoire d'optique des solides de l'Université Paris 7-Pierre et Marie Curie.

M. M. Y et A.-M. CAZABAT, *Optique*, éditions Dunod, 1996.

R. SEVE, *Physique de la couleur*, éditions Masson, 1990.

P. CALLET, *Couleur-lumière, Couleur-matière*, éditions Diderot Multimedia, 1998.

S. BERTHIER, *La couleur des papillons*, éditions Springer France, 1999.

Halte aux taches

KENNETH WONG • DANIEL JOUBERT

Les détartrants modernes font souvent d'astuces physico-chimiques conçues pour ôter les taches des tissus. Ces additifs antisalissures sont aujourd'hui dans la plupart des lessives modernes.

Dans un sketch célèbre, l'humoriste Coluche conspuait les slogans publicitaires qui stipulaient que leur lessive lave «plus blanc que blanc». Peut-on laver de mieux en mieux ? Bien évidemment oui. La lessive est devenu un produit de consommation courante, et les additifs, c'est-à-dire les matières actives qui aident à enlever les salissures, sont loin d'être des produits banals. Au contraire, ces produits résultent de recherches de haute technicité. Leur présence dans les lessives des grandes marques s'expose à l'appréciation d'un public sévère et à la concurrence féroce entre fabricants.

Les habitudes culturelles, aussi bien que les conditions physico-chimiques du lavage imposent des contraintes draconiennes sur la performance, sur l'efficacité et sur le coût de ces molécules. L'évolution darwinienne des détartrants se place dans un contexte technico-publicitaire dont les enjeux sont colossaux, les critères sévères et le progrès permanent.

Les lessives contiennent aujourd'hui une quantité de composants, des agents de nettoyage aux rôles spécifiques. De l'agent blanchissant à l'agent anti-redéposition, la liste est longue, mais dans tous les cas le rôle primordial est tenu par les molécules tensioactives. Formées d'une extrémité qui «aime» l'eau (tête hydrophile), tandis que l'autre (chaîne hydrophobe) ne l'«aime» pas, ces molécules se placent préférentiellement à l'interface entre l'eau et l'huile, ce qui permet d'isoler les salissures de graisse, puis de les éliminer. C'est le mécanisme fondamental du lavage.

Lorsque la lessive de base est élaborée, le chimiste y introduit des addi-

tifs antisalissures, en quantité relativement faible (un ou deux pour cent), mais dont le rôle est prépondérant. Ces additifs ne dissolvent pas les taches, mais confèrent aux textiles une meilleure résistance au tachage. C'est en analysant les mécanismes physico-chimiques qui interviennent pour protéger les tissus que les chimistes élaborent ces traitements.

Du savon à la lessive

Le premier produit de nettoyage a été découvert par hasard. Sur les flancs du mont Sapo, près des rives du Tibre, les graisses des animaux sacrificiels fondaient dans les cendres du feu et coulaient avec les pluies dans les terres argileuses qui longeaient le fleuve. Les lavandières remarquèrent que le lavage du linge à l'aide de ce mélange de graisses, de cendres et d'argile était facilité. Sapo a donné *soap*, qui, en anglais, signifie «savon».

Dans un pot d'argile babylonien datant de 2 800 ans avant notre ère, on a retrouvé un matériau semblable au savon, avec des indications pour le préparer par chauffage de graisse et de cendre. La présence de savon est également attestée sur un papyrus égyptien de 1 500 ans avant notre ère. La préparation du savon

est décrite ainsi que son utilisation pour le traitement des maladies de la peau et pour le lavage. Au II^e siècle, le médecin grec Galien reprend les mêmes prescriptions.

Si le procédé de fabrication et les matières premières sont aujourd'hui plus efficaces, la recette de base est inchangée depuis l'Antiquité. Le savon

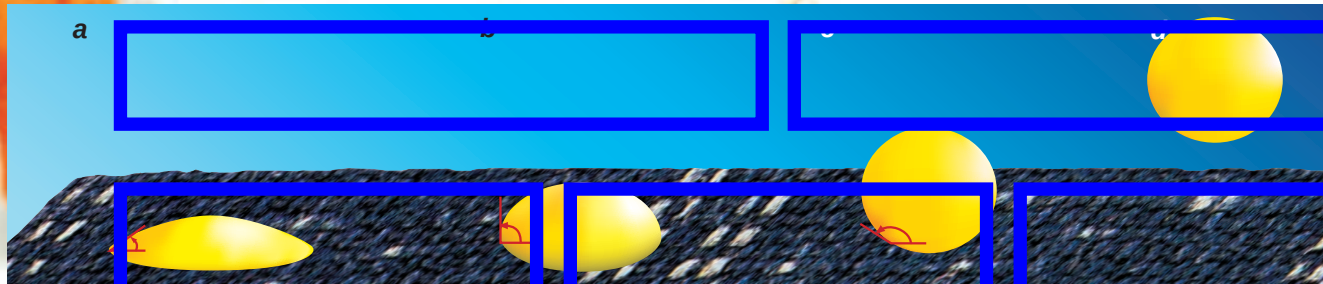
est toujours fabriqué à partir de graisses animales ou d'huiles végétales. Les chaînes d'acide gras de ces corps ne sont pas solubles dans l'eau, mais, par réaction avec une base, comme la soude (NaOH) ou la potasse (KOH), elles se transforment en des molécules tensioactives qui comportent une queue hydrophobe et une tête hydrophile.

Produit de luxe, le savon est très tôt le fruit de rivalités entre fournisseurs. Dès le VII^e siècle, les recettes de la fabrication du savon sont aux mains de guildes qui conservent jalousement leur secret. Parallèlement, d'autres applications que le lavage corporel apparaissent : savon pour le linge, shampoing, savon à barbe, etc.

Un progrès technique de fabrication ouvre la voie à la démocratisation du lavage du linge. On utilise alors la cendre de bois comme «base», sans savoir qu'elle contient en faible quantité une «vraie» base, le carbonate de sodium (Na_2CO_3). Comment purifier cette base ? En 1771, le chimiste français Nicolas Leblanc invente une méthode de fabrication de carbonate de sodium à partir des cendres et du sel ordinaire. Grâce à sa méthode, on obtient une base forte, de bonne qualité et bon marché. La production industrielle du savon peut commencer.

Les méthodes sont progressivement améliorées et, en 1823, le chimiste français Eugène Chevreul établit sur des fondements solides la chimie des corps gras.

Jusqu'au XX^e siècle, le savon à base de matière grasse naturelle (animale



1. LE DÉTACHAGE DES SALETÉS HUILEUSES se fait par un mécanisme de démouillage. La salissure est initialement une goutte d'huile étalée sur le tissu (a). La présence de molécules tensioactives dans le bain de lessive et d'autres facteurs comme l'agitation mécanique, déclenchent le démouillage (b) : l'angle de contact entre l'huile et la surface, initialement faible, augmente (b, c). Lorsque l'angle dépasse une valeur limite, la goutte est arrachée par l'agitation mécanique (d).

ou végétale) reste l'unique produit de lavage. Toutefois, la nécessité est mère de l'invention et la carence de matières grasses et d'huiles végétales durant les guerres mondiales suscite la synthèse des premiers savons synthétiques. Ces produits, issus des alcanes, des hydrocarbures de l'industrie du pétrole, et des acides forts, comme l'acide sulfurique, sont les «détergents» synthétiques. Comme celles du savon naturel, les molécules de détergent sont tensioactives. Toutefois, alors que les molécules de savon ont une tête carboxylique (COO^-), les molécules des détergents ont une tête de sulfonate (SO_3^-), toutes deux chargées négativement.

La différence n'est pas mince : les têtes carboxyliques précipitent plus facilement avec les cations (ions positifs) de calcium et de magnésium contenus dans l'eau que les têtes sulfonate. Ainsi, lorsque l'eau est très «dure», c'est-à-dire qu'elle contient beaucoup de ces cations, les molécules tensioactives de savon précipitent plus et sont moins disponibles pour le lavage : le savon est moins efficace que le détergent synthétique. Toutefois, en 1946, apparaissent les agents anticalcaires (*builders*, en anglais), des molécules qui piègent les cations de l'eau et rendent le savon et détergents beaucoup plus efficaces.

La marque de lessive Persil, d'origine allemande, est l'une des plus anciennes. Son nom résulte de la contraction de *perborate* et *silicate*, deux adjuvants que l'on ajouta aux molécules tensioactives pour fabriquer l'une des premières lessives modernes. À l'issue de la

Seconde Guerre mondiale, cette marque constituait une base de guerre des Alliés sur l'Allemagne, de sorte qu'on la retrouve aujourd'hui comme nom de marque, aussi bien chez la Société anglo-hollandaise *Lever* que chez la Société allemande *Henkel*.

Molécules tensioactives et agents antiredéposition

La lessive moderne contient de multiples espèces chimiques actives. Les proportions des différents composants varient selon la région du monde à laquelle est destinée la lessive, mais les principaux agents lavants restent les molécules tensioactives de détergent et les agents anticalcaires.

En Europe, les agents anticalcaires constituent la moitié de la lessive. Ces molécules sont basiques, de sorte que l'eau de lavage est à un pH voisin de 10 (le pH est compris entre 0 et 14, et un pH de 7 représente un milieu neutre). Or, la surface des salissures et celle du linge comportent des groupements $-\text{OH}$, qui, en milieu basique, sont ionisés en $-\text{O}^-$, caractéristiques d'un milieu basique. Ainsi, toutes les surfaces sont chargées négativement, et, comme deux charges de même signe se repoussent, les salissures, une fois enlevées,

restent en suspension dans le bain de lessive, éloignées les unes des autres. Cette répulsion électrostatique facilite aussi la séparation des taches du tissu.

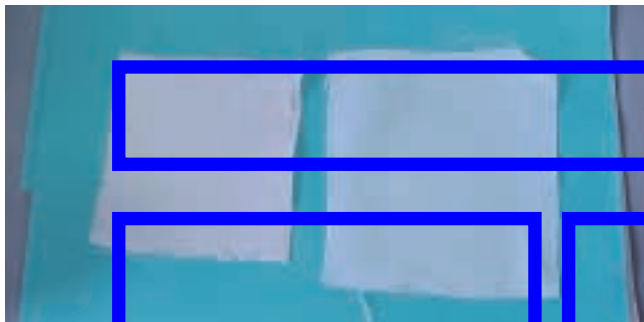
Nous avons vu que les molécules tensioactives se placent aux inter-

faces. Ainsi, elles réduisent la tension de l'interface entre l'eau et l'huile, l'énergie nécessaire à la formation d'une nouvelle surface entre ces deux liquides. La compatibilité de l'huile et de l'eau en présence de telles molécules est facilitée, c'est l'émulsification. L'émulsification est un phénomène clé qui fragmente les salissures huileuses sous forme de gouttelettes (émulsification) et les maintient en suspension dans l'eau (dispersion).

De la même façon, les molécules tensioactives se placent à l'interface entre l'eau et l'air, et elles réduisent la tension de surface : l'air s'incorpore alors plus facilement à l'eau, d'où l'apparition de mousse. L'utilisateur croit souvent qu'une mousse abondante témoigne de l'efficacité de la formule détergente. Cette croyance est erronée et trop de mousse peut nuire : par exemple, un excès de mousse amortit la force du jet d'eau qui arrive sur les assiettes dans un lave-vaisselle et réduit l'efficacité du lavage.

Les molécules tensioactives se différencient par leur charge électrique : soit elles sont chargées (ioniques), soit elles ne sont pas chargées (non ioniques). Les molécules tensioactives ioniques les plus utilisées sont les alkyls benzène sulfonate (avec des têtes $-\text{SO}_3^-$). Leur charge est négative, et on les qualifie d'anioniques. Les molécules non ioniques ne portent pas de charge : leur tête polaire se compose le plus souvent d'une chaîne oxyéthylénée (répétition du monomère $\text{CH}_2-\text{CH}_2\text{O}$).

Les enzymes, autre composant important des lessives, sont des protéines, c'est-à-dire des chaînes



D.R.

2. LES AZURANTS OPTIQUES sont l'un des composants de la lessive moderne. Ces molécules, qui contiennent du triazine et du stilbène, absorbent une partie du rayonnement ultraviolet ambiant et émettent un rayonnement visible dans le bleu. Sur la photo-

graphie de gauche, en lumière visible, le tissu de droite est légèrement plus bleuté que le tissu de gauche, qui n'a pas été traité. Dans l'ultraviolet (photographie de droite), l'effet se voit mieux : le tissu traité (à droite) renvoie une lumière plus bleue.

d'acides aminés, spécialisées dans la découpe des molécules. Une première catégorie d'enzymes, comme les protéases et les lipases, coupent les longues chaînes de protéines et de graisse. Cette réaction, nommée hydrolyse, aboutit à des salissures plus petites et donc plus faciles à enlever. En outre, certaines enzymes sont aussi des molécules tensioactives qui abaissent encore la tension de l'interface entre les salissures et le bain de lessive.

Une autre catégorie d'enzymes, les cellulases, agissent sur les fibrilles microscopiques à la surface des fibres de coton. Lorsqu'un vêtement de coton s'use, les fibres de coton se déchiquettent en fibrilles microscopiques qui, d'une part, piègent les salissures et, d'autre part, diffusent la lumière et affadissent les couleurs. Toujours par hydrolyse, les cellulases coupent les fibrilles, ce qui restaure la brillante des couleurs et redonne au tissu un aspect neuf.

Les agents de blanchiment et les azurants optiques accentuent la blancheur des tissus blancs. Les agents de blanchiment dégradent les molécules colorées qui tachent un tissu, par exemple le vin ou le café. Les molécules qui engendrent la couleur ont en général des doubles liaisons entre atomes de carbone. Les agents de blanchiment, telle l'eau oxygénée (H_2O_2), détruisent ces doubles liaisons, et la couleur de la tache disparaît. Les azurants sont des molécules qui absorbent les rayons ultraviolets et les réémettent en tant que lumière bleue, donnant ainsi aux tissus une apparence lumineuse (voir la figure 2).

Hormis l'agent d'antiredéposition, qui, en augmentant la charge néga-

tive des salissures, évite que celles qui viennent d'être enlevées d'un tissu ne se redéposent ailleurs, les autres constituants lessiviels ne participent pas directement à la suppression des salissures, mais interviennent sur la performance du produit : l'antimousse réduit le niveau de mousse dans une machine à laver et évite le débordement ; les antimottants évitent que la poudre ne s'agglomère en mottes. Enfin, on ajoute souvent du parfum, très important pour le consommateur, puisque l'on estime qu'en France c'est le critère décisif de choix entre lessives.

Comment améliorer encore l'efficacité du lavage ? En protégeant le tissu contre les taches. Pour ce faire, on traite

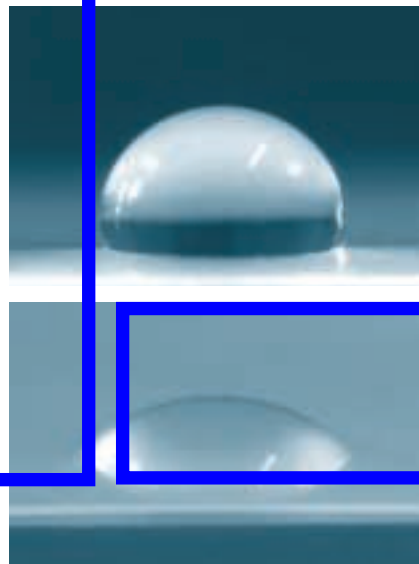
le tissu par un additif, généralement un polymère soluble dans l'eau, de façon à lui conférer une meilleure résistance au tachage. En ajoutant ce polymère lors d'un premier lessivage, on modifie la surface du textile, de sorte que les taches s'enlèvent mieux ultérieurement. Ce polymère agit selon plusieurs mécanismes physico-chimiques.

Une panoplie contre les taches

Les sources de salissures sont multiples : les taches huileuses, comme l'huile d'olive ; les salissures particulières, comme l'argile, l'oxyde de fer ou le rouge à lèvres ; les taches colorées, tels le vin de the ou le café ; les taches de protéines, tels la chlorophylle ou le sang ; les taches alimentaires, sauce tomate, chocolat, etc. La liste est interminable, et, à cette diversité de taches, le chimiste répond avec une grande variété de solutions. Le détergent complet contiendra ainsi un produit actif contre chaque famille de tache.

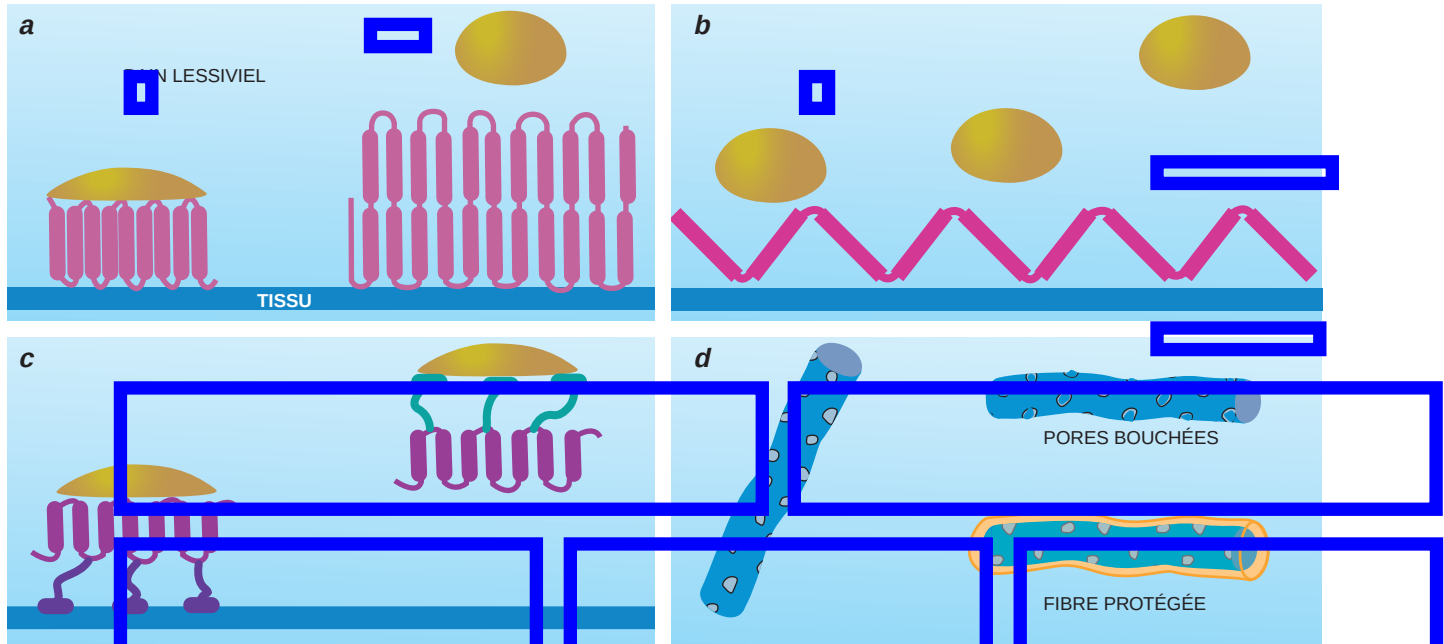
Les mécanismes de détergence agissent selon trois modes d'attaque : mécanique, chimique et physico-chimique. L'agitation déloge les salissures de la surface des tissus ou déforme les interfaces entre l'huile et l'eau, ce qui contribue à la fragmentation des grandes taches en petites salissures plus faciles à enlever. Certains types de fibre, comme le coton, gonflent au contact de l'eau. Ces fibres deviennent donc plus rigides, ce qui augmente les contraintes sur les fibres lors de l'agitation mécanique, et les salissures s'enlèvent mieux.

L'élévation de température améliore l'efficacité générale des lessives : elle accélère la cinétique des réactions,



D.R.

3. L'ANGLE DE CONTACT entre une goutte et une surface varie selon la nature de la surface, mais aussi selon la nature de la goutte. Sur un film de plastique hydrophobe, une goutte d'eau (en haut) s'étale moins bien qu'une goutte d'eau à laquelle on a ajouté des molécules tensioactives (en bas).



4. DIFFÉRENTS MÉCANISMES PHYSICO-CHIMIQUES interviennent pour enlever les taches. Une couche de polymère adsorbée par la surface du tissu gonfle au contact de l'eau et des molécules tensioactives : la salissure est repoussée (a). En recouvrant le tissu d'une couche de polymère oléophobe, on évite l'étalement de la salissure

et on facilite son enlèvement (b). Une couche sacrificielle qui recouvre le tissu se détache avec la salissure qui lui reste fixée (c). Les pores des matériaux poreux comme les fibres de coton sont bouchés par un polymère, ou protégés par un film de polymère (d). De la sorte, les salissures s'incrustent moins facilement dans les fibres.

elle augmente la pénétration des molécules tensioactives dans les salissures et la solubilité des salissures dans le bain de lessive ; elle fluidifie les salissures et les rend plus sensibles à l'enlèvement par agitation.

L'agitation mécanique est limitée : on ne peut pas agiter trop violemment, sans quoi on retrouverait ses vêtements en charpie. De même, on ne chauffe pas trop son linge. La tendance veut même que la température moyenne de lavage diminue : habituellement, il y a 20 ans, les lavages à 95 °C sont aujourd'hui plus rares. Aussi la physico-chimie prend-elle de plus en plus d'importance. Tous les mécanismes physico-chimiques pour ôter les taches sont fondés sur des modifications des propriétés des surfaces de la salissure, du tissu et de la solution de lessive.

Modification des tensions de surface

Par quel mécanisme une tache se fait-elle ? Une goutte d'huile de vidange, par exemple, se fait à l'étalement sur une surface de fibres. Pour une tache bien étalée, l'angle de contact avec la surface est faible (pour une goutte parfaitement étalée, l'angle serait quasi nul). Idéalement, pour ôter la gouttelette d'huile, il suffirait d'in-

verser l'étalement, de faire un «démouillage». Au-delà d'un angle limite, l'huile adopte une forme sphérique. La surface de contact entre la goutte et la surface diminue, et la goutte est enlevée par agitation mécanique (voir la figure 1).

Comment émulsifier l'huile pour qu'elle se disperse dans l'eau ? L'efficacité du démouillage des salissures dépend de plusieurs facteurs : concentration en molécules tensioactives, agitation mécanique, etc. Parfois, lorsque l'adhésion des salissures au tissu est forte, le démouillage ne se déclenche pas facilement, et l'on cherche à modifier la surface du tissu de façon à diminuer l'interaction avec les salissures.

En général, pour des tissus synthétiques et naturels, on cherche à rendre la surface hydrophile. Par exemple, le polyester est plutôt hydrophobe. Ainsi, une tache d'huile, également hydrophobe, a une affinité importante pour cette surface : les chaînes carbonées de l'huile adhèrent bien à la surface de polyester. En déposant sur le tissu synthétique une couche de polyester hydrosoluble, on le rend hydrophile. Le polyester hydrosoluble comprend dans sa chaîne d'atomes des groupements polaires hydrophiles. L'affinité de la

salissure pour la surface textile est réduite et elle s'enlève plus aisément.

Au contraire, on modifie le tissu pour le rendre «oléophobe», c'est-à-dire que son énergie de surface est inférieure à celle de l'huile (l'énergie de surface mesure l'énergie nécessaire pour augmenter cette surface), de sorte que l'huile ne s'étale pas sur cette couche et reste sous forme de gouttelettes. Sur une telle surface, l'eau ne pénètre pas dans les fibres, ce qui nuit à l'efficacité du lavage. Pour résoudre ce problème, les physico-chimistes ont mis au point des copolymères fluorés (des polymères formés de plusieurs sortes de monomères) qui créent une surface tantôt hydrophile, tantôt oléophobe (comme le *Scotchgard* de la Société 3M). Ces polymères sont déposés lors du façonnage des textiles.

Couche gonflable et couche sacrificielle

Toute diminution de la surface de contact entre la salissure et le tissu aide au lavage. Une couche qui gonfle dans l'eau et repousse la salissure faciliterait son arrachement. La solution lessivante et les molécules tensioactives pourront par la suite pénétrer entre le tissu et la salissure : le

démouillages de la salissure en serait plus efficace.

Les longues chaînes hydrophiles, comme celles de l'oxyéthylène, absorbent l'eau. En plaçant dans la lessive un additif contenant ces fonctions chimiques, les chaînes gonflent au

contact de l'eau, ce qui repousse les salissures. En outre, si ces chaînes contiennent des sites anioniques, les répulsions électrostatiques s'ajoutent au gonflement stérique et augmentent la protection du tissu contre les taches. L'ajout d'un polymère amo-

vible sur le tissu est également un moyen efficace de protection. La salissure s'incruste sur le polymère, qu'il suffit d'ôter pour retrouver un tissu propre.

Des facteurs géométriques, tel la rugosité des fibres naturelles, notamment du coton, nuisent également à l'efficacité du lavage. Les fibres de coton ont des crevasses et des fissures où s'incruste la saleté. L'élimination de ces défauts formés lors de la préparation mécanique et chimique des fibres (filage, tissage, mercerisage et finition) rendrait le lavage plus facile. À l'inverse, une fibre de polyester est bien plus lisse et homogène qu'une fibre de coton (voir la figure 5). C'est l'un des raisons pour laquelle le lavage des tissus en polyester est plus aisé du point de vue géométrique.

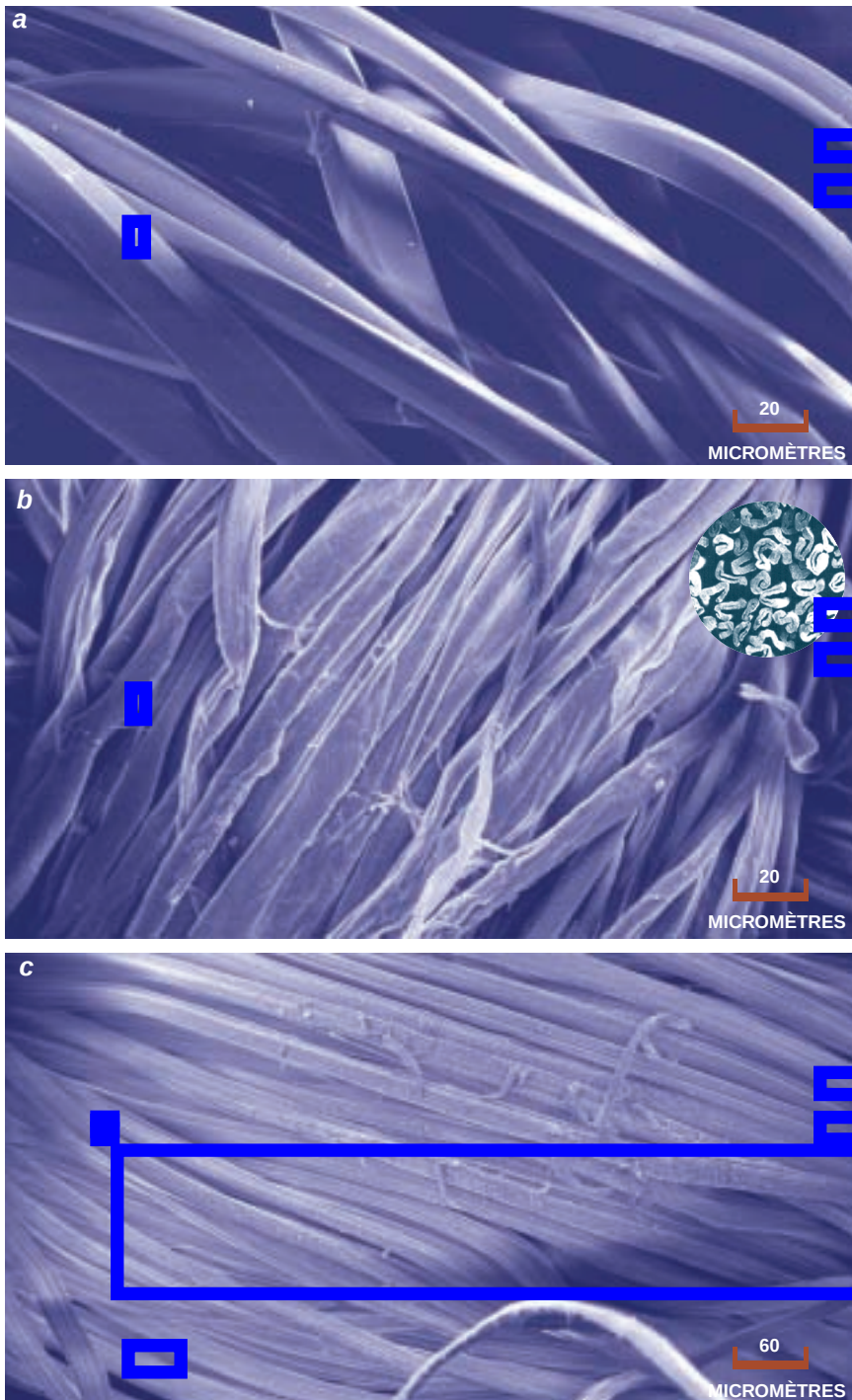
Comment pourrait-on lisser les fibres de coton? En bouchant les pores avec un polymère ou enroulant les fibres dans un film de polymère. L'idée est dans les cartons.

Les polymères antisalissures

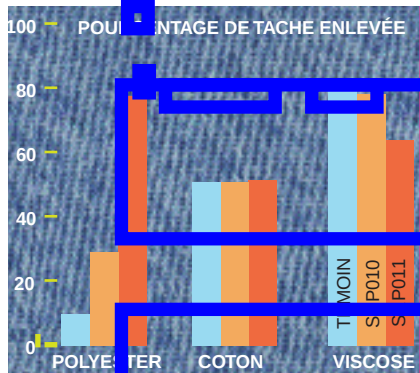
En analysant les fonctions chimiques qui président au déclenchement des différents mécanismes physico-chimiques mentionnés, nous avons conçu, dans notre laboratoire, deux polymères antisalissures que nous avons testés sur différents tissus. Ces polymères sont un mélange d'essentiellement deux groupes chimiques, l'oxyéthylène et le terephthalate, et comprennent également des fonctions sulfonates.

Pour comparer leur efficacité, nous avons lavé ces trois tissus différents (polyester, coton et viscose) avec ces additifs en les attachant de manière à obtenir une couche protectrice. Nous avons ensuite comparé, selon les tissus, la manière dont une tache d'huile de vidange s'enlevait après un second lavage. Des tissus non traités et tachés de la même façon servaient de témoins. On mesure l'efficacité de la couche protectrice par le pourcentage de tache enlevé (voir la figure 6).

Sans traitement, le polyester se nettoie bien moins facilement que le coton, qui se nettoie lui-même moins bien que la viscose. La raison en est que l'huile a plus d'affinités avec la surface de polyester et qu'elle s'y accroche



5. COMPARAISON DU POLYESTER ET DU COTON. Alors que les tissus synthétiques, tel le polyester, sont lisses et homogènes (a), les fibres de coton naturel sont irrégulières : elles sont fissurées, rugueuses et tordues (b). De surcroît, elles sont creuses (cartouche). Les salissures s'incrustent plus facilement sur les fibres de coton que sur les fibres de polyester. Les fibres de viscose, une cellulose reconstituée, sont toutes identiques, marquées de stries longitudinales (c).



6. L'EFFICACITÉ DES POLYMÈRES ANTITACHAGE (SRP010 et SRP011) varie selon le type de support. Ils sont très efficaces sur du polyester mais ont peu d'effet sur les fibres de cellulose comme le coton ou la viscose.

donc mieux. La différence d'efficacité du lavage entre le coton et la viscose illustre l'importance de la géométrie de la surface : avec plus de défauts, les fibres de coton sont plus difficiles à laver.

Les deux polymères détachants sont efficaces sur le polyester, avec un avantage notable pour l'un des détachants. Pourquoi ce détachant facilite-t-il l'enlèvement de l'huile ? Parce qu'il hydrophylise mieux le polyester qui devient incompatible avec l'huile. À partir de cette seule constatation, on ne peut distinguer entre deux interprétations : soit ce détachant s'adsorbe mieux sur le polyester et, couvrant mieux la surface, il améliore la protection ; soit, pour une même adsorption, il possède des fonctions chimiques antitachages plus performantes qui repoussent mieux les salissures. Des études ultérieures permettront de préciser les mécanismes.

En revanche, aucun de ces deux polymères n'a d'effet sur le coton ou sur la viscose. Là encore, deux interprétations : soit ils ne s'adsorbent pas sur les surfaces cellulosiques, ce qui est plausible, car ces polymères s'adsorbent bien sur le polyester, qui est une surface « opposée » à celle de la cellulose ; soit ces polymères n'apportent pas d'effets antitachages plus marqués que ceux de la surface de cellulose seule.

Outre ces tests, les chimistes évaluent l'efficacité des polymères antisalissures par d'autres expériences : mesure de l'adsorption, examen au microscope électronique, essai de dif-

fusion des fonctions chimiques, mesure des charges superficielles, etc. Grâce à ces études, on évalue l'importance des différents facteurs et l'on améliore la composition et la structure des polymères antisalissures.

Aujourd'hui, la plupart des lessives contiennent des additifs antitachages qui augmentent la performance du lavage des polyesters. En revanche, pour le coton, il n'existe pas de produit commercialisé : aucun polymère antitachage appliqué par la lessive n'est efficace.

Toutefois, un produit extrêmement performant coûterait cher. Ce produit ne percera que si le consommateur estime que ses performances valent le prix demandé. De fait, des produits vraiment universels pourraient être mis au point, mais ils ne trouveraient pas de marché : peu d'utilisateurs seraient prêts à acheter une boîte de lessive plus de 100 francs. La mise au point de tels produits, performants, industrialisables et économiques, est l'un des enjeux majeurs pour les détachants du futur.

Paradoxalement, alors que ce sont les pays riches qui mettent au point ces produits, un additif antisalissure de bonne qualité et de prix raisonnable serait utile surtout aux pays en développement. Dans le monde, le linge est encore essentiellement lavé à la main (en Inde, au Brésil, en Chine, en Afrique), et une des annuées tangibles du lavage réside dans l'effort physique nécessaire pour ôter les taches. Un produit qui réduirait ce travail physique serait très apprécié. Coluche s'amuserait sûrement de ce paradoxe.

Kenneth WONG et Daniel JOUBERT sont chercheurs au Centre de recherches Aubervilliers de la Société Rhodia.

J.M. SHICK (éditeur), *Surface Characteristics of Fibers and Textiles*, Marcel Dekker, 1977.

P.J. GROLL, *Physical Aspects of Detergency*, in *Colloids and Surface A : Physical, Chemical and Engineering Aspects*, John Wiley, pp. 131, 1993.

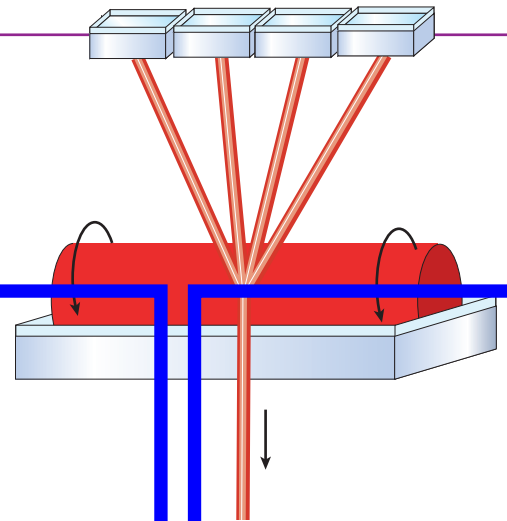
Une page de notre site rassemble quantité de liens sur le savon et sur les molécules tensioactives :

<http://www.pourlascience.com/pls-266/sommaire.htm>

L'ensimage

DAVID QUÉRÉ

La vitesse de tirage d'un fil hors d'un bain détermine la quantité de liquide entraîné. On explore la physique de cette opération.



Une fraction de seconde après sa fabrication, une fibre textile est ensimée, c'est-à-dire rapidement entraînée hors d'un bain contenant un lubrifiant. Cette opération limite la casse pendant le tirage des fibres et donne de la cohésion aux mèches ainsi formées (sur la figure ci-dessus, à droite, les fibres tirées sont réunies en un fil par l'intermédiaire d'un rouleau contre lequel elles frottent). Parfois, aussi, on profite de l'ensimage pour déposer des promoteurs d'adhésion à la surface des fibres, quand on les destine à renforcer des matériaux composites. C'est là une affaire de chimistes, mais c'est la physique qui permet le dosage des molécules qui seront déposées sur la fibre.

En effet, il existe plusieurs manières de faire cette opération : on peut pulvériser sur les fibres un aérosol (dispersion de gouttelettes) ou les faire passer dans un bain dont elles ressortent continuellement mouillées (voir la figure 1). Chaque fois qu'un solide est tiré d'un bain (ou, inverse-

ment, chaque fois qu'un liquide est déplacé sur un solide), le solide s'enrobe du liquide, du moins si celui-ci est mouillant, c'est-à-dire s'il a la propriété de s'étaler spontanément sur le solide. Dans le cas inverse, le mouvement relatif du solide et du liquide n'engendre pas nécessairement un dépôt : prenons à une goutte d'eau glissant sans laisser de trace sur une feuille de matière plastique ou de nénuphar. La première tâche de celui qui formule l'ensimage est donc d'assurer le mouillage, par exemple en incorporant dans le bain de liquide des molécules tensioactives (des détergents) qui favorisent l'étalement des liquides.

Vitesse et dépôt

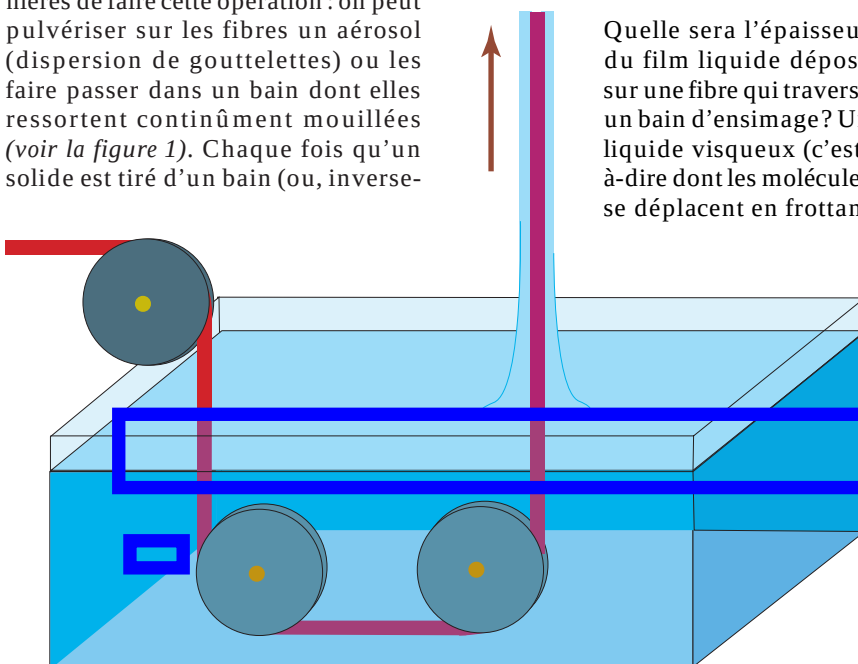
Quelle sera l'épaisseur du film liquide déposé sur une fibre qui traverse un bain d'ensimage ? Un liquide visqueux (c'est-à-dire dont les molécules se déplacent en frottant

les unes par rapport aux autres), au voisinage immédiat d'un solide, se déplace à la vitesse du solide. Ainsi, quand on peint un mur (fixe), la peinture adhère à ce mur : les molécules du liquide, au contact du solide, y adhèrent en raison des forces d'attraction intermoléculaires. De même, au cours de l'ensimage, le liquide au voisinage de la fibre que l'on tire part avec elle. La question est donc d'identifier quel est ce voisinage. Il existe plusieurs réponses à cette question, selon la vitesse à laquelle s'effectue le dépôt.

Les cas des vitesses faibles a été compris, dans les années 1940, par trois physiciens russes : Lev Landau, Benjamin Levich et Boris Derjaguin. À la sortie du bain, la surface du liquide est déformée par le mouvement de la fibre ; cette déformation est limitée par les forces de tension superficielles qui tendent à réduire l'aire de la surface liquide (la tension superficielle est engendrée par les forces de cohésion entre les molécules du liquide).

L'épaisseur du film résulte ainsi des actions antagonistes de la viscosité, qui provoque le dépôt, et de la tension superficielle, qui s'y oppose. Un paramètre unique et sans dimension, nommé le nombre capillaire, compare l'intensité de ces deux actions : c'est le produit de la viscosité par la vitesse du dépôt, que divise la tension superficielle du liquide. L'épaisseur d'ensimage est égale au rayon de la fibre que multiplie le nombre capillaire élevé à la puissance $2/3$.

À vitesse de tirage supérieure, l'inertie du liquide emporté par le solide complique la physique de l'ensimage. Quand ce fluide, entraîné dans le bain par le contact du fil, arrive en surface, dans la zone très



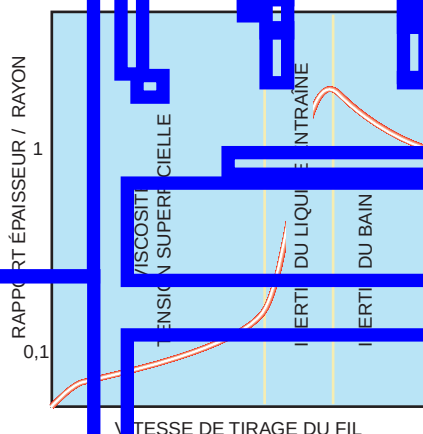
1. L'ENSIMAGE est l'opération par laquelle on charge les fils d'un liquide portant diverses molécules qui en modifient l'aspect ou les propriétés. L'épaisseur de liquide entraînée peut être ajustée par la vitesse d'entraînement.

petite où le dépôt se forme, son inertie peut ne pas être négligeable par rapport aux forces de tension superficielle et d'entraînement par viscosité. On devine que l'inertie du fluide déjà en mouvement près du fil, dans le bain, a pour effet d'augmenter l'épaisseur du film : l'inertie fait que le fluide n'a pas le « temps » de s'écouler le long du fil. Cette inertie peut même vaincre la tension superficielle, si bien que l'épaisseur du film, dans ce cas, augmente de façon critique en fonction de la vitesse : à partir d'une vitesse égale à un mètre par seconde environ, doubler la vitesse du dépôt fait plus que décupler son épaisseur.

Plus vite encore (les vitesses usuelles d'ensimage sont de l'ordre de 10 à 30 mètres par seconde), l'inertie à considérer devient celle du bain, qui lui, globalement, est au repos. Or, le fil communique son mouvement au liquide : couche de molécules par couche de molécules, ce qui prend du temps. À grande vitesse, le temps de contact d'un morceau de fil avec le réservoir est faible et devient donc le facteur qui limite le volume entraîné. Dans sa célèbre théorie de la couche limite visqueuse (1904), Ludwig Prandtl a montré, plus précisément, que l'épaisseur du fluide ébranlé par le solide (et donc susceptible de partir avec lui) augmente comme la racine carrée de ce temps de contact. À ces vitesses, l'épaisseur du dépôt cesse donc de croître et, même, diminue comme l'inverse de la racine carrée de la vitesse d'ensimage. La loi de dépôt exprime alors un compromis entre viscosité (qui est responsable du dépôt) et inertie : celle du fluide qu'il faut mettre en mouvement. L'action de la tension superficielle, qui était prépondérante à faible vitesse, devient négligeable.

Ensimage et bulles de savon

Les liquides utilisés dans la pratique de l'ensimage sont le plus souvent des liquides complexes : des émulsions (dispersions de gouttelettes d'huile dans l'eau) ou de l'eau contenant des molécules tensioactives, susceptibles de s'adsorber à la surface de la fibre et du liquide. Dans le cas où les effets inertiels dominent (à haute vitesse), les



2. LES DIFFÉRENTS PHÉNOMÈNES qui déterminent l'épaisseur de liquide entraîné au cours de l'ensimage dépendent de la vitesse de tirage du fil.

phénomènes restent ceux que nous avons considérés, parce que les paramètres caractéristiques du liquide qui interviennent sont des paramètres de volume (viscosité et densité). En revanche, la situation est beaucoup plus riche à faible vitesse. On le devine en soufflant une bulle de savon : la bulle sort d'un bain d'eau savonneuse, avec une épaisseur bien définie, mais sans qu'aucun solide l'entraîne (et ça tient !). Une surface savonneuse a donc la même aptitude qu'un solide à tirer avec elle de la matière fluide. Si l'on retire (lentement) un objet solide d'un bain savonneux, on s'attend donc à ce qu'il tire avec lui environ deux fois plus de matière que si le liquide était pur, puisqu'il y a deux interfaces (entre le solide et le liquide, et entre le liquide et l'air) participant cette fois au dépôt. C'est bien ce que l'on observe quand on réalise l'expérience.

Il est frappant, et à première vue surprenant, que la gravité n'intervienne pas pour fixer l'épaisseur du dépôt. Cela est dû à la petite taille des fibres (10 à 100 micromètres) : à cette échelle, la force capillaire (nous sommes bien à l'échelle d'un cheveu), qui découle de la tension superficielle du liquide, domine les phénomènes liés à la gravité. Il n'en serait évidemment pas de même pour un gros objet (ou un individu) tiré d'un bain : on attend alors la même succession de lois pour l'épaisseur en fonction de la vitesse (croissance lente, puis progression rapide autour de un mètre par seconde, décroissance lente enfin), mais émoussées par la gravité, qui limite l'épais-

seur du film entraîné. Sortir quasi sec d'un bain est donc une tâche malaisée : il faudrait le faire soit à vitesse presque nulle, soit à vitesse presque infinie !

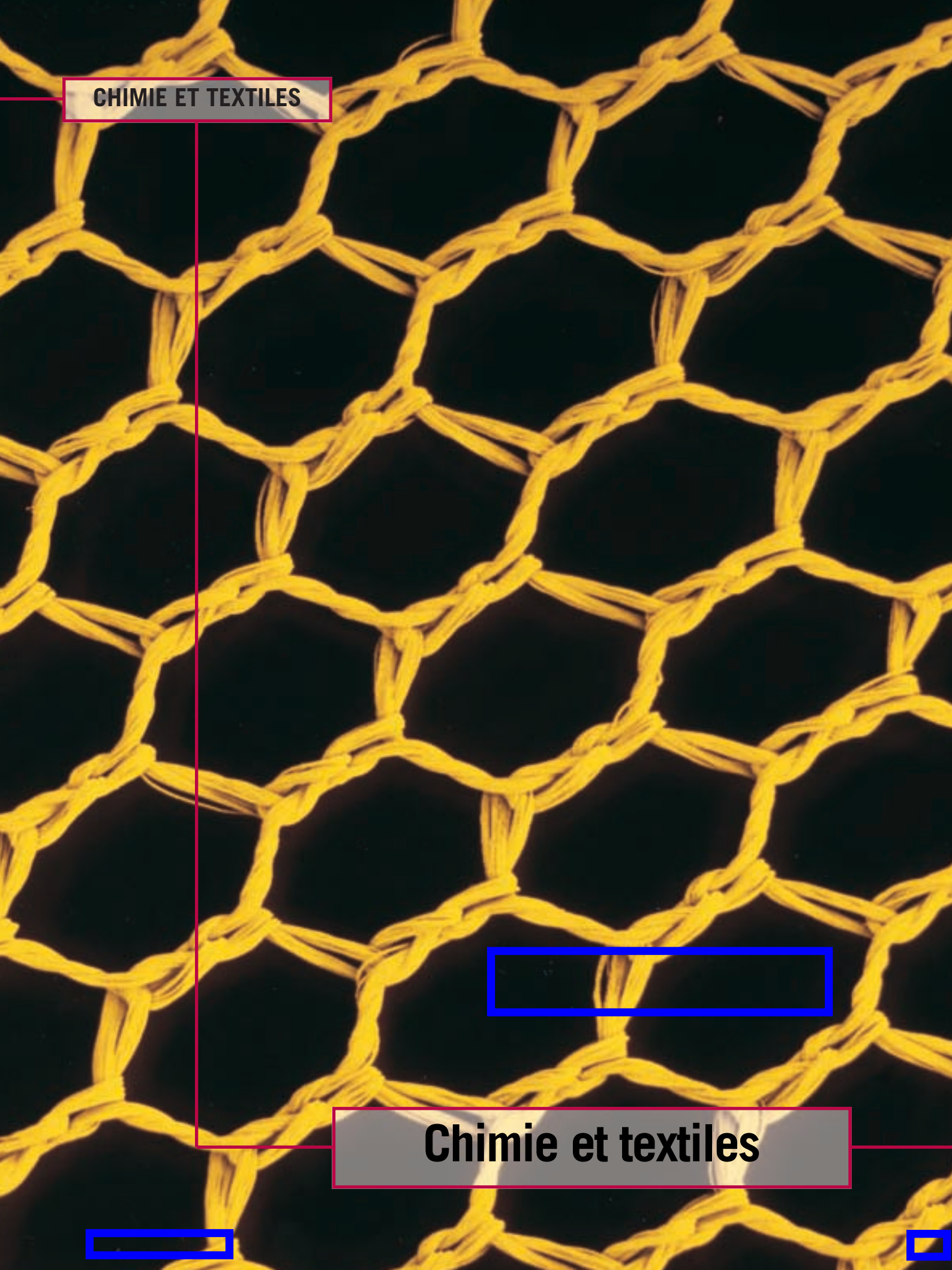
Gouttes filantes

Soulignons enfin qu'il pourrait être intéressant, dans certains cas, que l'ensimage se produise par lui-même, au lieu d'être forcé. Certes, un liquide mouillant posé sur un solide s'étale spontanément, mais le film de mouillage (qui est microscopique) progresse avec une lenteur extrême.

De ce point de vue, les gouttes filantes imaginées en 1994 par Colin Bain, à Oxford, et Thierry Ondařuhu, à Paris, sont un progrès remarquable : ces gouttes avancent toutes seules. Le principe en est le suivant : la goutte est constituée d'un solvant mouillant où sont dissoutes des molécules qui ont la double propriété de se greffer à la surface du solide et de n'être pas mouillées par le solvant. Si le greffage commence à se produire d'un côté de la goutte plutôt que d'un autre, alors ces deux côtés reposent sur des substrats de nature chimiquement différente : le solide vierge d'une part, et le solide tapissé de réactifs de l'autre. Cette asymétrie provoque le mouvement spontané de la goutte – jusqu'à épuiser le réservoir en réactifs, ou jusqu'à couvrir l'ensemble du solide.

Cette fois, c'est donc le dépôt qui engendre le mouvement (et non le mouvement qui provoque le dépôt, comme dans l'ensimage classique). La vitesse de ces gouttes automotrices dépend de la nature du réactif (et de la viscosité du solvant), mais elle est souvent de l'ordre de quelques centimètres par seconde. On peut donc imaginer de bombarder les fibres par un aérosol de gouttes filantes, pour réaliser un ensimage à la fois spontané et ciblé. Au total, toutes ces questions (qu'elles soient ouvertes comme celle-ci, ou mieux comprises comme dans le cas du dépôt forcé) sont de bons exemples où recherche appliquée et recherche fondamentale s'irriguent mutuellement.

David QUÉRÉ est physicien au Laboratoire de physique de la matière condensée (Collège de France, Paris).



CHIMIE ET TEXTILES

Chimie et textiles

Les fibres artificielles résistantes

DOETZE SIKKEMA • MAURITS NORTHOLT

Grâce à la compréhension des mécanismes moléculaires qui régissent leur comportement, on met au point des fibres de plus en plus résistantes.

En 1892, trois chimistes anglais inventent la viscose à partir de la cellulose des végétaux dissoute dans une solution de soude, puis à nouveau cristallisée. Dans les années 1930, Wallace Carothers, chimiste de la Société Dupont de Nemours, crée la première fibre entièrement synthétique. Ces travaux précurseurs marquent le début de l'ère des fibres artificielles résistantes que l'on utilise aujourd'hui sous forme de câbles ou pour renforcer des matériaux divers, nommés alors composites, et des objets tel un gilet pare-balles.

Les fibres artificielles sont composées de polymères, c'est-à-dire de longues chaînes obtenues par liaison chimique de petites molécules, ou monomères. Pour être résistantes, elles doivent être rigides, solides et peu déformables. De plus, elles doivent tolérer les chocs, être légères, supporter les variations de température et adhérer aux matériaux qu'elles renforcent.

La plupart de ces qualités s'obtiennent par de nombreuses liaisons physiques et chimiques entre les chaînes de polymères ; ainsi, les forces se répartissent dans toute la fibre. Cependant,

la solidité d'une fibre résistante dépend aussi de l'alignement des liaisons chimiques du polymère le long de son axe. Plus les liaisons entre les monomères seront parallèles à l'axe de la fibre, plus elles résisteront à une traction. Ces contraintes sont dans tous les cahiers des charges des chimistes spécialisés dans la fabrication de fibres.

En outre, dans de nombreuses applications, par exemple l'aérospatiale, la qualité primordiale est la légèreté : les fibres résistantes doivent être composées d'atomes légers, tels ceux du carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène.

Depuis la découverte des polymères, les chimistes ont inventé des matériaux filables variés : nous étudierons les fibres de polyéthylène, d'aramide, de carbone et de polybenzobisoxazole, mises au point par l'armée de l'air américaine.

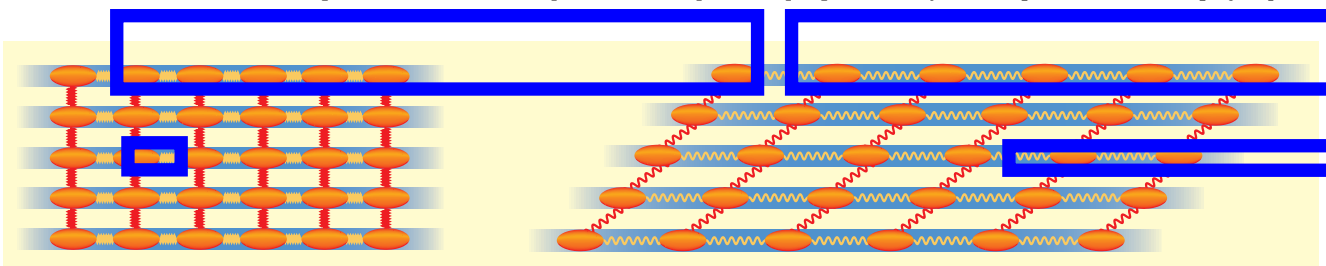
Toutefois, des progrès restent possibles. La conception de matériaux polymères organiques ayant des propriétés mécaniques déterminées impose la compréhension des fondements moléculaires des propriétés mécaniques. Quelques équipes,

notamment, étudient comment la structure moléculaire des fibres artificielles procure à ces dernières une résistance aux contraintes. Après avoir étudié leurs résultats, nous exposerons et comparerons les qualités de principales fibres disponibles.

Enfin, nous décrivons la structure de la fibre M6, que nous avons récemment mis au point dans notre laboratoire au Centre de recherche de la Société Arzo Nobel. Ses performances sont encore supérieures aux fibres précédemment citées.

La mécanique des fibres

À l'inverse de nombreux matériaux, tels les métaux et le caoutchouc, qui ont les mêmes propriétés quelle que soit la direction de la force qui s'exerce sur eux, les fibres artificielles réagissent différemment selon que la force est parallèle ou perpendiculaire à leur axe. Les chaînes de polymères sont beaucoup plus courtes que les fibres elles-mêmes : dans une fibre, la contrainte est transmise d'une chaîne moléculaire à une autre, parallèle et adjacente, par des liaisons physiques,



1. LES CHAÎNES DE POLYMÈRES D'UNE FIBRE RÉSISTANTE (en bleu) sont soumises à plusieurs contraintes lorsque la fibre est étirée : l'allongement des chaînes de polymères concerne les liaisons covalentes

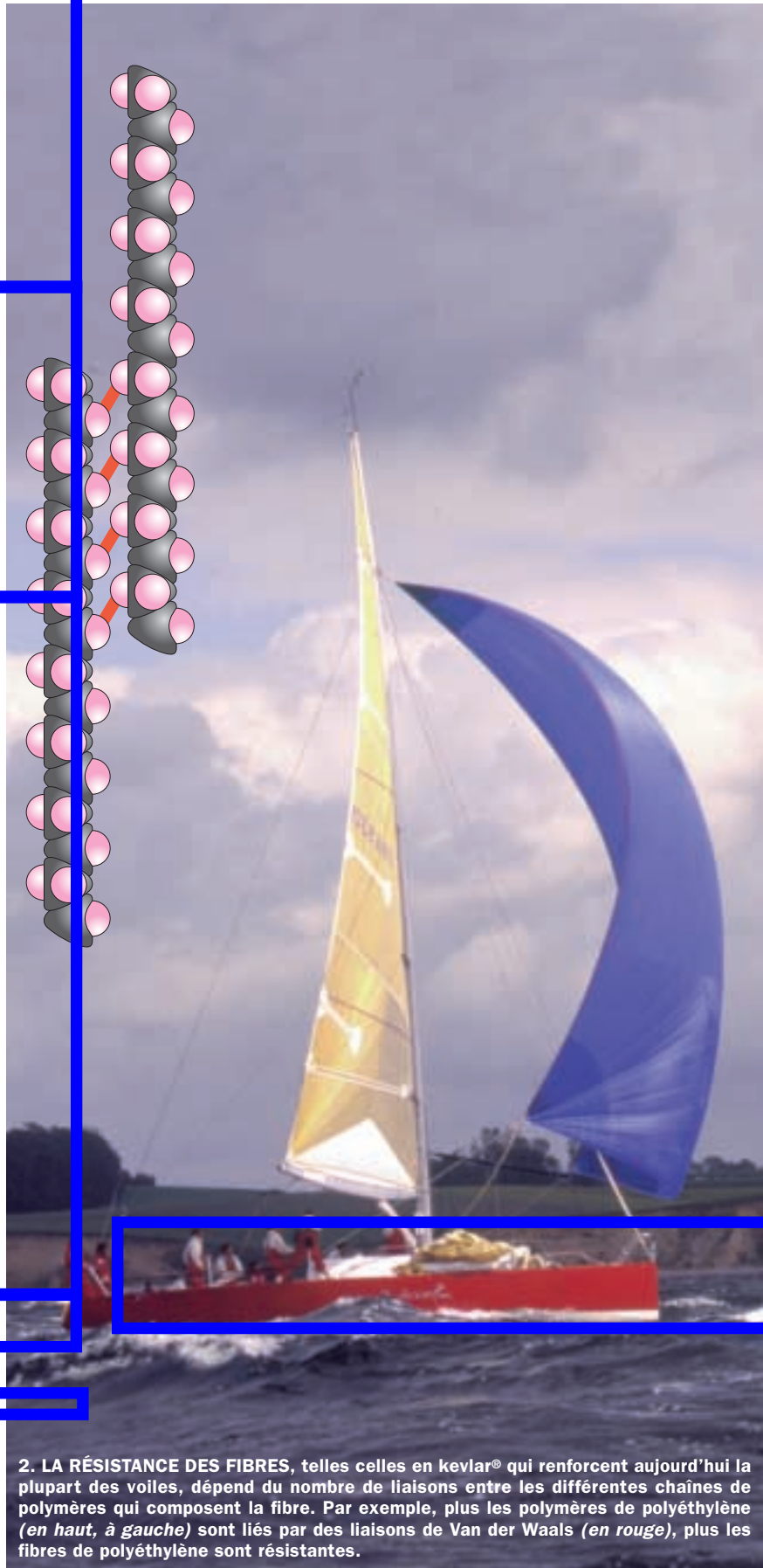
(en jaune) qui relient les monomères (en orange) du polymère, tandis que les forces de cisaillement s'appliquent sur les liaisons faibles (en rouge) qui joignent les chaînes de polymères.

plus faibles que les liaisons chimiques qui lient les atomes au sein des molécules. Plus ces liaisons physiques sont nombreuses, plus la force est répartie et plus la fibre est résistante. Ces liaisons physiques, dont la faiblesse permet la dissolution ou la fusion des polymères nécessaires au filage des fibres, comme nous le verrons plus loin, sont de deux types. Les liaisons hydrogène relient des atomes d'hydrogène à des atomes d'oxygène ou d'azote (dont certains électrons les plus externes ne sont pas engagés dans des liaisons chimiques). Les liaisons de Van der Waals, plus faibles encore, relient des atomes voisins dont les électrons ne sont pas uniformément répartis autour des noyaux : les dipôles électriques ainsi formés s'attirent.

Les fibres de carbone sont très différentes : elles sont formées de grandes nappes d'atomes de carbone disposés aux nœuds de réseaux hexagonaux orientés plus ou moins parallèlement à l'axe de la fibre. Ces nappes de graphite rigides s'étendent sur 5 à 100 nanomètres (milliardièmes de mètre). Elles sont reliées par des liaisons chimiques covalentes qui transmettent et répartissent l'effort appliqué sur la fibre.

Ces liaisons transverses confèrent aux fibres leur résistance aux contraintes de cisaillement, d'extension et de compression. Ces résistances, exprimées en pascals, sont mesurées par des modules qui décrivent la contrainte nécessaire pour produire une déformation d'une unité de la dimension considérée (diamètre, longueur...). Leurs valeurs révèlent la qualité des fibres (il s'agit d'une valeur calculée, car on effectue les mesures pour de très petites déformations). La résistance à la rupture, c'est-à-dire la contrainte au-delà de laquelle un matériau se rompt ou se fracture, rend également compte de la qualité d'une fibre. Cependant, sa valeur dépend de la longueur de l'échantillon testé, car les fibres contiennent toujours des défauts de fabrication qui concentrent les forces et provoquent une rupture (voir *Pour la Science*, mai 1998, page 112, par Mark Eberhart, *Pour la Science*, octobre 1999). Plus l'échantillon est long, plus la résistance à la rupture est faible.

Pendant la fabrication d'une fibre, les chaînes de polymères se forment.



2. LA RÉSISTANCE DES FIBRES, telles celles en kevlar® qui renforcent aujourd'hui la plupart des voiles, dépend du nombre de liaisons entre les différentes chaînes de polymères qui composent la fibre. Par exemple, plus les polymères de polyéthylène (en haut, à gauche) sont liés par des liaisons de Van der Waals (en rouge), plus les fibres de polyéthylène sont résistantes.

Sea and See, C. Borlenghi

Les liaisons covalentes sont orientées plus ou moins parallèlement à l'axe de la fibre. La structure d'une fibre est ainsi constituée de chaînes de polymères sinueuses (voir la figure 3).

Lorsqu'une fibre de polymères est étirée selon son axe, elle s'allonge parce que les polymères eux-mêmes s'allongent, en même temps que le cisaillement déforme les liaisons entre les chaînes de polymères qui glissent les unes par rapport aux autres : alors que l'allongement d'une chaîne s'exerce sur les liaisons chimiques covalentes, très rigides, le cisaillement s'exerce sur les liaisons physiques interchaînes, plus faibles (voir la figure 1). Pour les fibres principales, le module de traction est compris entre 90 milliards de pascals, pour les chaînes de cellulose régénérées, telle la viscose, et 550 milliards de pascals pour la nouvelle fibre M5 que nous avons mise au point (à titre de comparaison, le module d'élongation de l'acier est de 200 milliards de pascals).

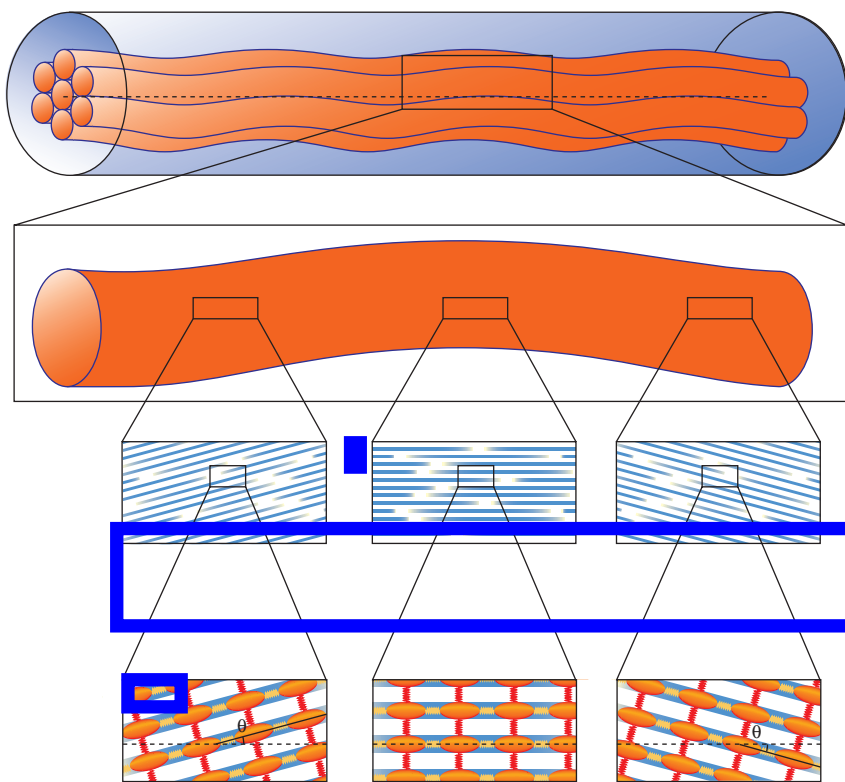
La valeur du module de cisaillement, qui résulte de l'attraction entre les chaînes de polymères, est souvent 50 à 200 fois inférieure au module de

traction. C'est donc la rupture par cisaillement des liaisons interchaînes, et non la rupture des liaisons covalentes de la chaîne, qui limite la résistance des fibres. Plus les chaînes de polymères d'une fibre sont longues et reliées entre elles, plus la fibre est résistante. En outre, une fibre de polymères est plus rigide lorsque les monomères sont eux-mêmes rigides, c'est-à-dire qu'aucun groupe d'atomes ne peut tourner autour de l'axe d'une liaison covalente. Par exemple, la liaison centrale dans l'éthane, ($\text{CH}_3\text{--CH}_3$) n'est pas rigide : les deux groupes méthyle (CH_3) tournent l'un par rapport à l'autre. En revanche, dans l'éthylène ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$), la double liaison est fixe : aucune rotation n'est permise. Le module de traction croît également lorsque les liaisons interchaînes sont fortes (les liaisons hydrogène sont plus fortes que les liaisons de Van der Waals) et lorsque les chaînes sont peu sinueuses, c'est-à-dire qu'elles s'écartent peu de la direction de l'axe de la fibre : leurs liaisons sont plus parallèles à l'axe de la fibre et donc plus résistantes. Comment obtenir de telles qualités lors d'une production industrielle ?

La technique des fibres

L'industrie textile produit des fibres résistantes de plusieurs façons. Le procédé d'« étirage » consiste, comme son nom l'indique, à étirer, à l'état solide, un précurseur des fibres. Par exemple, lorsqu'elle est sous forme de gel, une fibre de polyéthylène (le monomère des chaînes de polyéthylène est l'éthylène), peut être allongée jusqu'à 40 fois sa taille, car les molécules de polyéthylène glissent dans le sens des chaînes de polymères. L'attraction interchaîne ne confère alors une résistance notable aux contraintes que lorsque les chaînes de polymères sont très longues (environ dix micromètres). Les fibres ainsi obtenues ont un module de traction d'environ 100 milliards de pascals et une résistance à la rupture de six milliards de pascals. Néanmoins, l'attraction relativement faible des forces de Van der Waals, dans les fibres de polyéthylène, provoque, sous l'effet d'une charge constante, une déformation indésirable, et la résistance à la compression est très mauvaise. Ces défauts, auxquels s'ajoutent de médiocres propriétés adhésives, font des fibres de polyéthylène de mauvaises candidates pour le renforcement de matériaux composites. Toutefois, elles résistent bien aux forces de courte durée et aux chocs : on les utilise pour les câbles de sécurité et des gilets pare-balles.

On obtient également des fibres résistantes par « extrusion », en plaçant des molécules rigides en solution, puis en les poussant à travers une filière : les molécules, tels des bâtonnets, s'orientent au cours du filage. Par exemple, les fibres d'aramide, où des cycles de benzène sont reliés par des groupements amide (--C(O)NH--), commercialisées par les Sociétés *Acordis* et *Dupont de Nemours* sous les noms de *Twaron®* et de *Kevlar®*, s'obtiennent à partir de monomères dissous dans un mélange de solvants, les polymères qui se forment sont alors isolés, lavés et séchés. Ils sont ensuite redissous dans de l'acide sulfurique concentré, en une solution qui sera filée : la solution s'écoule à travers de petites orifices de 60 micromètres de diamètre (voir la figure 5). Avant d'être extrudée, la solution est composée de régions où les polymères sont orientés plus ou moins parallèlement. Cet arrangement interne, qui dépend de la concentration en polymères, de la température



3. UN FIL est composé de petites fibres identiques issues des filières (par étirage ou par extrusion). À l'intérieur des fibres, les chaînes de polymères (en bleu) sont sinueuses. À un endroit donné, les chaînes de polymères (les monomères sont en orange) forment un angle θ avec l'axe de la fibre.

et de la rigidité et de la longueur des polymères permet de manipuler une solution peu visqueuse, puisque les polymères ne sont pas complètement enchevêtrés. L'écoulement du liquide organise cette orientation locale des chaînes en une orientation générale : les chaînes sortent quasi parallèles des filières. À la sortie de l'extrudeuse, la traction de la solution accentue l'orientation des fibres. Dans un bain d'extrusion, la probabilité de conserver l'orientation des chaînes de polymères à la fin de la phase d'étirement, après la coagulation, dépend du temps de relaxation des polymères, c'est-à-dire du temps nécessaire pour perdre une organisation donnée par agitation thermique : plus ce temps de relaxation est long, plus l'orientation sera maintenue. Les filaments sont enfin lavés, séchés et enroulés sur une bobine.

Plus les polymères sont rigides, plus le temps de relaxation est long, car la rigidité accroît la viscosité : le procédé de filage par extrusion est ainsi extrêmement efficace. L'orientation trans, c'est-à-dire que deux monomères consécutifs sont situés de part et d'autre du plan de leur liaison (dans l'autre orientation, nommée cis, les deux monomères consécutifs sont du même côté), augmente également le temps de relaxation.

Le renouveau de la cellulose

Après un siècle de filage de fibres artificielles ou de cellulose par étirage ou extrusion, les chimistes peuvent-ils encore améliorer les performances et les qualités des fils produits ?

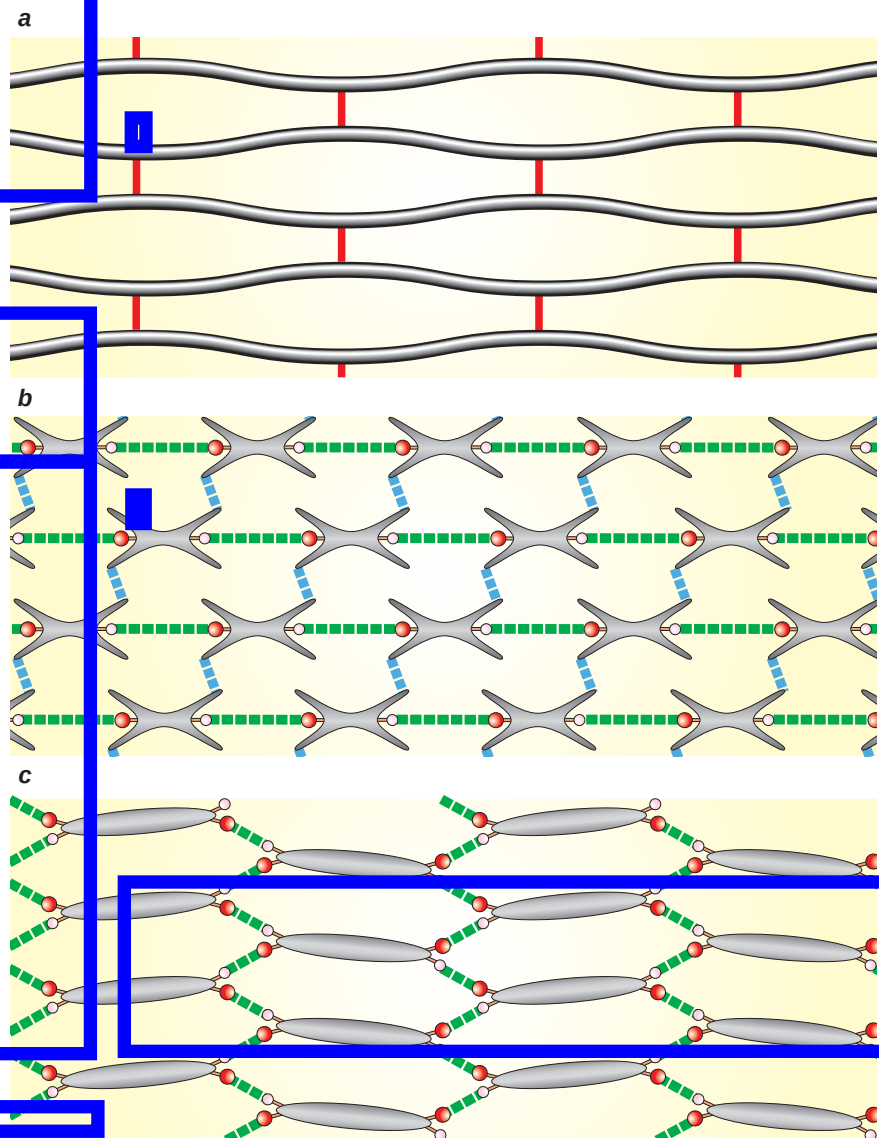
La cellulose, un des principaux constituants des végétaux, est le polymère biologique le plus abondant sur la Terre. Formée par l'enchaînement de molécules de glucose, elle compose notamment les fibres de coton, de lin et de sisal (une plante grasse du Mexique). Dans sa forme naturelle, nommée cellulose I, deux liaisons hydrogène relient deux monomères de glucose successifs. Son module d'élongation atteint 90 milliards de pascals, mais cette forme est difficile à fabriquer : classiquement, on dissout de la cellulose naturelle, que l'on cristallise à nouveau en milieu humide. Dans la cellulose régénérée, nommée cellulose II, deux monomères de glucose successifs ne sont reliés que par une seule liaison hydrogène : le module d'élongation est inférieur à celui de la cellulose I.

Notre collègue Hanneke Boerstel a obtenu ces fibres de cellulose II très orientées par une méthode élégante de dissolution et de précipitation. Ces nouvelles fibres ont un module d'élongation de 45 milliards de pascals et, surtout, une résistance de 1,5 milliard de pascals. Les nouvelles fibres peuvent servir de produits flexibles, tels les pneus et les tuyaux souples : leurs propriétés mécaniques sont intermédiaires entre celles des chaînes d'aramides et celles des fibres classiques de polyamides, tel le Nylon, et elles adhèrent bien aux mélanges de caoutchouc.

De nouvelles fibres

Parallèlement à l'amélioration des fibres classiques, les chimistes créent de nouvelles fibres plus performantes. Dans les années 1980, en étudiant la synthèse de polymères plus rigides que les aramides, l'armée de l'air américaine a inventé la fibre de polybenzobisoxazole (PBO), où la molécule de polymère est un bâtonnet rigide.

Dans la molécule de PBO, les doubles liaisons sont conjuguées, c'est-à-dire que les électrons des doubles liaisons se répartissent sur les liaisons simples adjacentes : les



4. LES FEUILLETS DE GRAPHITE, ou les chaînes de polymères, ici vus de face, sont reliés par des liaisons diverses. Les feuillets de graphite des fibres de carbone (a) sont reliés par des liaisons covalentes (en rouge). Dans une fibre d'aramide (b), grâce à des liaisons hydrogène (en vert) entre des atomes d'oxygène (billes rouges) et des atomes d'hydrogène (billes roses), les chaînes de polymères forment des feuillets ; ceux-ci sont joints par des liaisons de Van der Waals (en bleu). Dans une fibre M5 (c), les chaînes de polymères sont reliées dans deux directions par des liaisons hydrogène qui tissent un réseau hexagonal.

liaisons entre les atomes sont plus fortes qu'une simple liaison covalente, telle celle de la chaîne de polyéthylène. Des mesures montrent que les polymères de PBO sont très allongés ; on peut les orienter au cours du filage, de sorte que le PBO résiste mieux à la traction que les fibres d'aramide. Toutefois, les performances sous compression des fibres de PBO sont encore décevantes. Or, un matériau composite soumis à un effort est souvent plié. Il subit alors des contraintes opposées de traction, à l'extérieur, et de compression, à l'intérieur : le PBO ne constitue donc pas une bonne fibre de renforcement pour les matériaux de pointe.

Récemment, nous avons fabriqué un polymère, que nous avons nommé – arbitrairement – M5 : il est aussi

que le PBO et, de plus, il a de fortes liaisons hydrogène intermoléculaires grâce aux groupes chimiques hydroxyle (–OH) et imidazole (un cycle à trois atomes de carbone et deux atomes d'azote). La répartition inégale de ses charges électriques en fait une molécule polarisée qui adhère facilement aux matériaux que l'on souhaite renforcer. Cependant, ses monomères ne sont pas encore commercialisés, de sorte que nous allons chercher des procédés économiques pour les préparer. Lorsque l'acide polyphosphorique (des molécules composées de groupes phosphate liés après l'élimination de molécules d'eau) est le solvant, les polymères, en se tordant, s'orientent plus ou moins parallèlement : la solution est ainsi prête à être filée. L'analyse de la fibre M5 par diffraction aux rayons X montre un réseau de liaisons hydrogène qui s'étendent dans deux directions perpendiculaires à l'axe principal de la fibre (voir la figure 4). Cette propriété rend les fibres plus résistantes au cisaillement que le PBO ou l'aramide.

Les fibres, étirées pendant leur extrusion, ont 8 à 14 micromètres de diamètre. Elles sont ensuite lavées jusqu'à disparition presque complète du solvant, puis étirées à nouveau à une température supérieure à 400 degrés. Ainsi, les utilisateurs disposent de plusieurs types de fibres artificielles (polyéthylène, aramide, PBO, M5, fibres de carbone). Mais sont-elles toutes de même qualité ? Leurs performances sont-elles équivalentes selon les usages ?

Grâce à leur rigidité et à leur composition chimique, les fibres d'aramide de PBO ou de M5 résistent mieux à la chaleur et aux déformations que les meilleures fibres de polyéthylène.

À chaque fibre, ses qualités

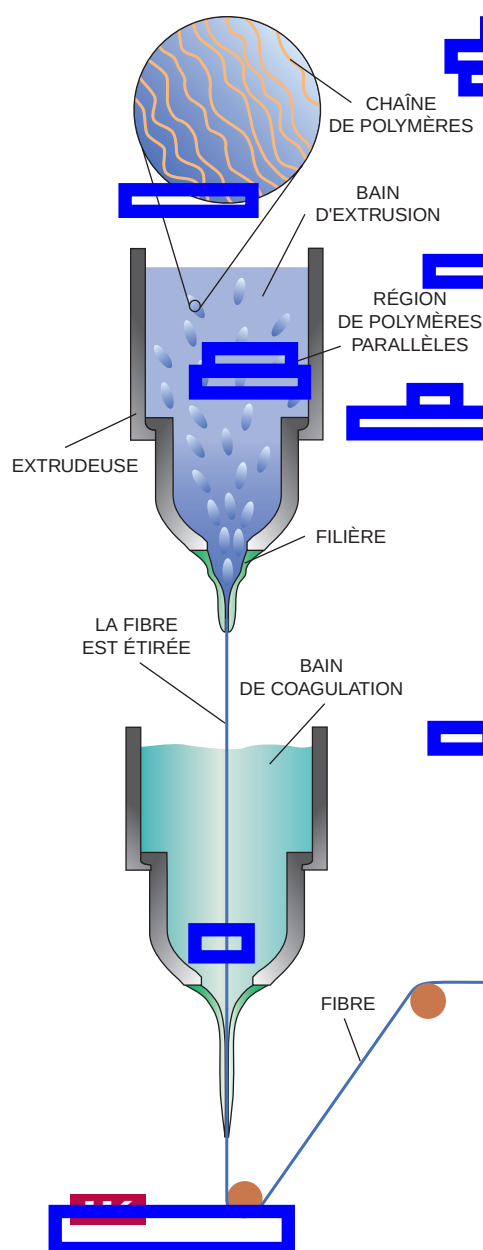
La structure en feuillets des chaînes de polymères collées par les liaisons hydrogène confère aux fibres d'aramide une bonne résistance à la compression. Cependant, les faibles liaisons de Van der Waals entre les feuillets sont brisées quand la charge devient plus importante : les feuillets se désolidarisent et glissent les uns par rapport aux autres.

Les fibres de carbone se déforment moins et résistent plus à la compression que les fibres d'aramide, mais elles sont plus ductiles et plus fragiles aux chocs : pour obtenir des matériaux rigides et résistants aux chocs, on construit souvent des matériaux dont la structure est renforcée par des fibres de carbone (pour la rigidité) et garnie de fibres d'aramide (pour les protéger contre les chocs).

Bien que les fortes liaisons transverses (covalentes) confèrent aux fibres de carbone des modules et une résistance élevés, elles ne se restaurent pas lorsqu'elles sont rompues, même quand la contrainte exercée sur la fibre disparaît. Dans une fibre de carbone soumise à un effort de traction constant, un défaut concentre les contraintes jusqu'à la rupture des liaisons covalentes. Ainsi, les fibres de carbone ne résistent pas aux chocs.

En revanche, les liaisons de Van der Waals et les liaisons hydrogène des fibres de polymères se rétablissent spontanément, jusqu'à ce qu'une déformation plus importante rende la fibre plastique : elle ne reprend alors pas sa forme initiale.

Par ailleurs, cet affaiblissement des liaisons interchaînes diminue la contrainte exercée sur la fibre grâce à un réarrangement localisé des chaînes autour des défauts et des impuretés,



5. LA FIBRE M5 est fabriquée à partir d'une solution où les molécules de polymère s'orientent parallèlement grâce à la rigidité des molécules. L'étirage de la fibre au sortir de l'extrudeuse renforce le parallélisme des chaînes de polymères avant que ceux-ci ne coagulent dans un bain. La fibre est ensuite lavée et débarrassée du solvant avant d'être chauffée. Elle est enfin enroulée sur une bobine.

qui ne modifie pas le comportement des fibres aux déformations. Cette capacité de récupération des liaisons physiques est probablement la cause de l'élasticité et de la résistance au choc des fibres de polymères.

La fibre M5 est prometteuse, parce que son module d'élongation, supérieur à 300 milliards de pascals, est bien supérieur à ceux des fibres de carbone haute ténacité aujourd'hui commercialisées. De plus, ses résistances aux contraintes sont au moins égales à celles des aramides. Les premiers essais de fibres M5 coulées dans une matrice de résines époxy ont montré un

comportement et une déformation plastique qui commence avec des contraintes supérieures à 1,7 milliard de pascals. Ce résultat confirme la relation théorique selon laquelle la résistance à la compression est environ trois fois inférieure au module de cisaillement. Avec une compression importante, les composites mixtes de résines époxy et de fibres M5 conservent le même aspect et procurent une résistance au choc comparable à celle des meilleures matières plastiques, elles aussi composées de polymères, disponibles sur le marché. En outre, nous avons souvent observé que le

tion dans une usine pilote s'accompagne d'améliorations importantes des propriétés des fibres.

Des fibres de plus en plus performantes

Grâce à ses propriétés mécaniques et à la vitesse à laquelle elle est produite, la nouvelle fibre M5 concurrencera les fibres de carbone dans la plupart de leurs applications, notamment dans l'aérospatiale. Les fibres de carbone ne sont utilisées que pour des produits qui demandent beaucoup de soin et d'attention (fusées spatiales ou avions militaires), ou pour des produits dont l'endommagement est sans conséquences graves.

De surcroît, grâce à sa résistance électrique, cette nouvelle fibre sera certainement utilisée dans des domaines où les fibres de carbone présentent des problèmes ou sont inutilisables, telles l'électricité et l'électronique. Enfin, dans de nombreux matériaux, la forte polarité des fibres M5 leur confère une plus grande adhérence que les fibres de carbone.

La protection des gilets pare-balles est fondée sur une répartition extrêmement rapide de l'énergie d'impact du projectile sur une surface aussi étendue que possible du gilet sans qu'il y ait rupture de la fibre. Comme le carré de la vitesse de l'onde de déformation, qui transmet l'impact de la déformation sur tout le gilet, est proportionnel au rapport entre le module d'élasticité et la densité, les fibres utilisées requièrent un module et une résistance très élevés, une faible densité volumique et une forte résistance au choc. C'est le cas des fibres PBO et M5!

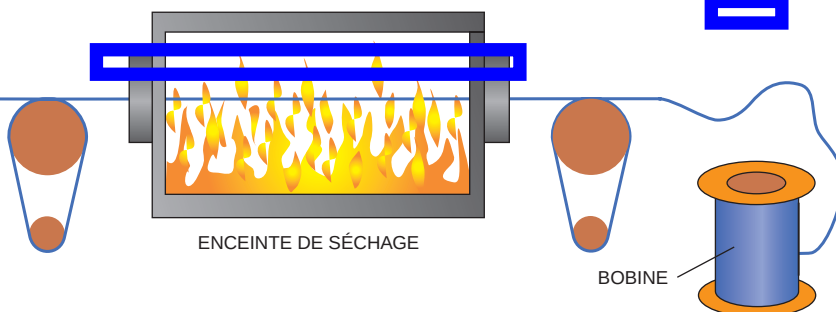
Une manipulation adroite des liaisons chimiques et physiques, la réduction des impuretés et l'amélioration de la régularité de la structure de la fibre augmenteront sans doute encore la qualité des fibres et des produits qui en dérivent, mais elles permettront aussi la mise au point de matériaux dont on n'aurait pas osé rêver il y a un siècle, ni même aujourd'hui.

L'élasticité

L'élasticité (E) d'une fibre de polymères est une fonction du module d'élasticité de la chaîne de polymère (E_c), du module de cisaillement des chaînes (ou des feuillets de graphite pour les fibres de carbone) les mesurés par rapport à d'autres (g) et d'un angle que font les chaînes avec l'axe principal de la fibre (θ).

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_c} + \frac{(\sin^2 \theta)}{2g}$$

Fibres	Aramide	Carbone	PBO	M5
Module d'élasticité du polymère (E _c) (milliards de pascals)	24	900 - 1100	500	550
Module de cisaillement (g) (milliards de pascals)	1,5 - 2	4 - 30	1,0	3,0
Type de liaisons intermoléculaires	Hydrogène dans une direction et Van der Waals	Covalentes	Van der Waals	Hydrogène dans deux directions
Module d'élasticité de la fibre (E) (milliards de pascals)	115	230	280	380
Élongation (pour cent)	2	1,5	2,5	1,4
Résistance à la compression (milliards de pascals)	0,58	2,1	0,4	1,6
Déformation sous compression (pour cent)	0,5	0,9	0,15	0,5
Densité	1,45	1,8	1,56	1,7
Résistance aux chocs	+	--	++	++
Propriétés de tissage	+	-	+	+



L'ennoblissement des textiles

PIERRE VIALIER

Après le tissage, les fabricants ont subi de nombreux traitements aux tissus : teinture, nettoyage, apprêts... L'industrie de l'ennoblissement rationalise ces opérations en se fondant sur l'étude physico-chimique des fibres et des produits utilisés.

L'ennoblissement transforme un tissu brut, tombant du métier à tisser en un matériau noble, apte à être confectionné et, surtout, ayant un toucher agréable. Naguère l'ennoblissement était effectué par des hommes de l'art, d'expérience. Aujourd'hui, il est assuré par une industrie spéciale, mais qui travaille, évidemment, à côté de l'industrie textile. Les procédés empiriques sont remplacés par des méthodes rationnelles, fondées sur une compréhension physico-chimique des transformations effectuées.

L'ennoblissement consiste en trois grandes familles de traitements : le nettoyage du tissu, pour ôter les substances étrangères (par exemple, les lubrifiants employés pendant les opérations de filature, de tissage, etc.) et les impuretés naturelles (cires du coton, suint de la laine, etc.) ; la coloration du textile (teinture ou impression) ; les apprêts, qui confèrent au tissu des caractéristiques de toucher ou de résistance à des agents externes.

Nous examinerons ici, notamment, des méthodes pour rendre les tissus infroissables ou résistants aux moisissures. L'ignifugation, elle, relève à la fois de l'ennoblissement et de la conception des fibres. Toutefois le cas le mieux étudié est celui de la teinture, que nous considérerons d'abord.

La teinture n'est pas une peinture : en raison de l'usure des textiles, une coloration sur la seule surface des fibres disparaîtrait trop rapidement. Pour éviter que le fond des culottes ne blanchisse, par exemple, on fait diffuser le colorant de sorte qu'il soit réparti de façon quasi homogène dans tout le volume des fibres.

Depuis longtemps, les chimistes sont mis à contribution pour mettre au point des molécules de colorant qui résistent à la lumière, au lavage, etc. Toutefois, depuis une trentaine d'années, le point de vue des ennoblisseurs a changé : ils cherchent à obtenir des produits non toxiques et non polluants qui donnent des résultats reproductibles. Nous verrons comment les physico-chimistes ont sélectionné les produits satisfaisant ces trois conditions.

Teinture à cœur

Les fils avec lesquels on confectionne les tissus sont composés de fibres généralement torsadées (les frottements entre fibres assurent la bonne tenue des fils). Chaque fibre est elle-même composée de microfibrilles, torsadées ou non, qui sont composées de macromolécules (voir la figure 2). Par exemple, le polymère du coton et du lin est la cellulose, composée par un enchaînement de molécules de glucose ; la différence entre les deux tient à la torsion des microfibrilles : torsadées dans le coton, elles sont parallèles dans le lin.

Enfin les macromolécules des microfibrilles forment des zones de polymère alternativement amorphes et cristallines : dans les zones cristallines, les macromolécules sont parallèles ; à l'extérieur de ces zones, encore nommées cristallites, les molécules sont désordonnées.

Les zones cristallines ne sont pas solubles dans l'eau, tandis que les zones amorphes le sont : les molécules étant désordonnées, peu de liaisons physiques s'établissent entre elles. Pour les dissoudre, on doit rompre peu de

liaisons. Ainsi, ce sont les zones cristallines qui structurent le matériau quand il est plongé dans les bains de teinture. L'hydratation des zones amorphes provoque seulement un gonflement de la fibre.

Au total, chaque microfibrille est comme une ficelle dont les fibres seraient alternativement collées avec de la colle forte et avec de la colle à papier peint : dès qu'on la mouille, la «ficelle» devient pâteuse sur les sections «collées à la colle à papier peint», et elle se déforme. Nous reviendrons à cette structure particulière quand nous examinerons l'infroissabilité des tissus.

Les zones cristallines structurent les ficelles, mais, en solution, l'eau (et certains des molécules qui y sont éventuellement dissoutes) diffuse jusqu'au cœur du matériau le long des joints entre les zones cristallines. Ce comportement caractéristique des matériaux polymères est exacerbé dans le cas des fibres textiles par le parallélisme et l'orientation des macromolécules (une fibre est filiforme). Dès que l'eau et les macromolécules en zone amorphe forment un «gel», le colorant peut diffuser dans la fibre, s'il est soluble ou si l'on peut le disperser dans l'eau.

Quelles molécules migrent-elles ainsi au cœur des fibres ? Aujourd'hui les chimistes ne cherchent plus à synthétiser de nouveaux colorants ; au contraire, ils suppriment des catalogues tous les colorants toxiques ou peu résistants au lavage ou à la lumière. Ainsi a disparu le célèbre rouge garance (voir *L'avènement des colorants synthétiques*, par Georges Bram et Nguyễn Trong Ahn, page 56), qui imposait l'usage d'un mordant contenant des métaux

lourds. En 1970, on traitait encore la laine avec des sels de chrome pour obtenir des teintures solides, et nombre de colorants étaient cancérogènes, mais les produits polluants ou dangereux sont aujourd'hui proscrits de tous les articles traités en Europe.

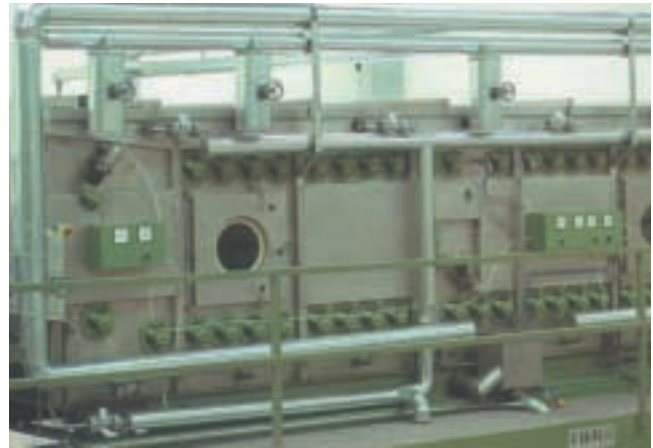
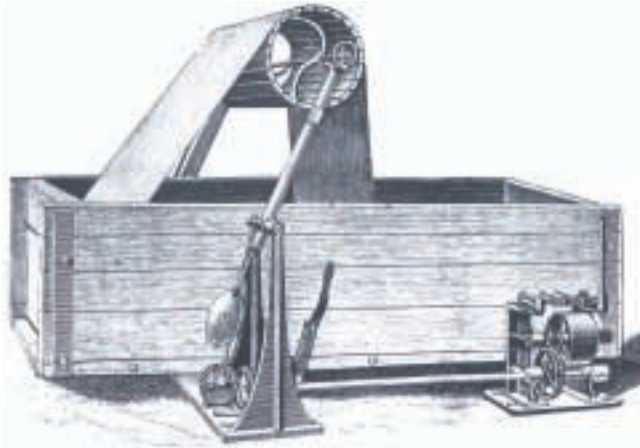
Parallèlement les spécialistes de l'ennoblissement désirent augmenter

le rendement de la teinture, c'est-à-dire la quantité de colorant qui se fixe par rapport à la quantité de colorant qui reste dans le bain : moins il reste de colorant dans le bain en fin d'opération, plus il y en a sur le tissu, et moins on pollue les rivières.

Comment obtenir un tel résultat ? Les physico-chimistes utilisent des

colorants ou des procédés tels que les interactions du colorant et de la fibre soient plus fortes que celles du colorant et de l'eau. Examinons comment régler ces affinités.

Tout d'abord, on privilégie des colorants peu solubles dans l'eau en modifiant certains groupes chimiques liés au centre «chromophore», qui donne



1. INSTALLATIONS D'ENNOBLISSEMENT. La machine en haut à gauche est une «barque» de teinture (1885). À sa droite figure un vaporisateur moderne et, en bas, une machine à mélanger les couleurs.

la couleur. Par exemple, les chimistes savent préparer à coût raisonnable trois colorants rouges d'une même famille : le CI 16011, le CI 15970 et le CI 16100 (voir la figure 6). Ces molécules diffèrent seulement par des groupes hydroxyle ($-OH$) et sulfonate ($-SO_3Na$), hydrophiles, et par des groupes méthyle ($-CH_3$), hydrophobes. À des températures et à des pH égaux (le pH mesure l'acidité du bain colorant), les fibres fixent dix pour cent de plus du premier

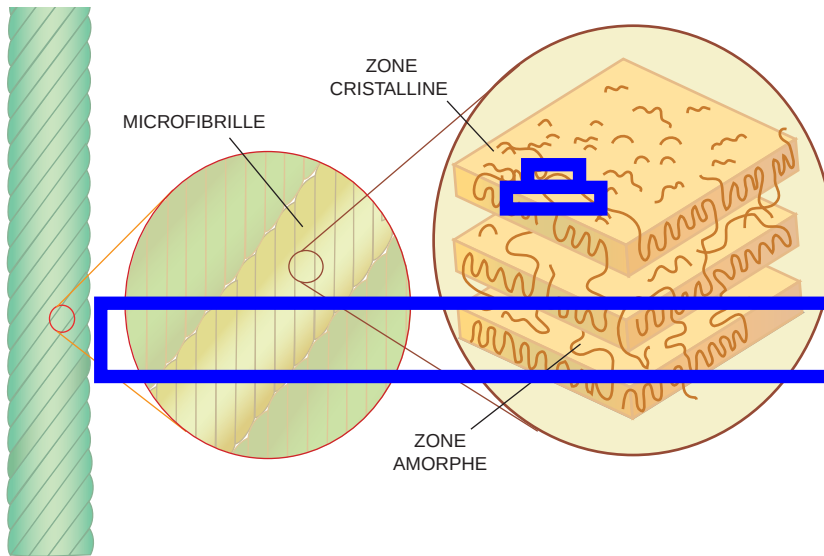
composé que du deuxième, et 50 pour cent de plus que du troisième : plus le colorant est hydrophobe, mieux il se fixe sur la fibre, et mieux il résiste au lavage (la couleur est peu modifiée).

Les colorants hydrophobes ont également un intérêt de mieux satisfaire les exigences sur la pollution imposées depuis 20 ans : plus un colorant est hydrophobe, plus le rendement de teinture est élevé, et moins la rivière est colorée. En revanche, plus le colorant

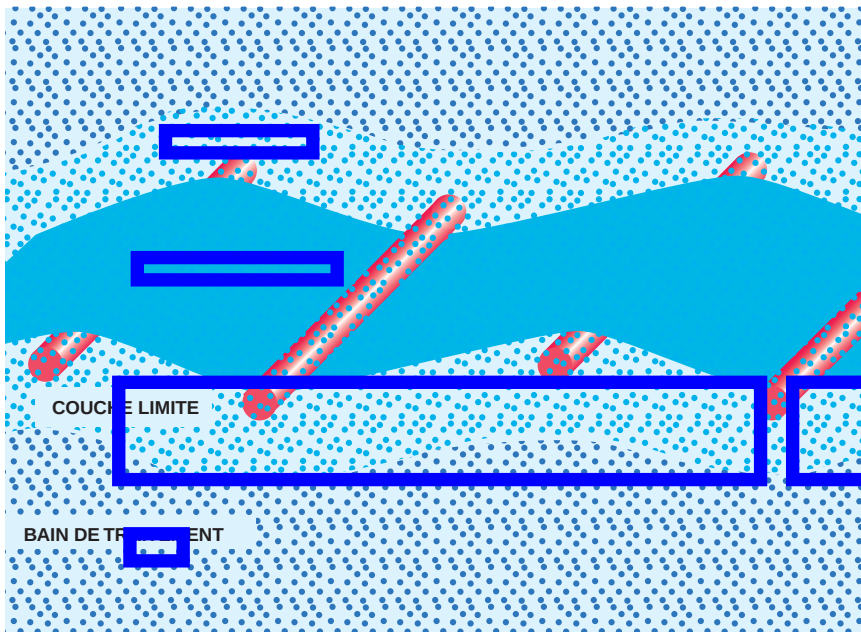
est hydrophobe, et plus le risque de mauvais tissage est grand : le colorant risque de ne pas se répartir également sur le tissu s'il se fixe de façon irréversible dès qu'il vient au contact de la surface ; comme la fibre n'est pas saturée en colorant, la teinte n'est pas uniforme. De surcroît, comme l'époque où l'eau était gratuite et l'énergie peu coûteuse est révolue, on économise l'eau. Enfin il existe une limite à l'hydrophobicité du colorant, qui est sa solubilité dans l'eau (quand il y est dissout et non en suspension). Ce problème est résolu par l'emploi de pompes doseuses, qui régularisent les concentrations en colorant dans le bain en cours de teinture (on dissolvait jadis tout le colorant au début du traitement, et le bain s'épuisait lentement, d'où des difficultés de reproduction des couleurs).

Les échanges entre le bain et le tissu

Il y a encore 30 ans, on teignait les tissus en les immergeant dans de grandes cuves où l'on agitait une solution du colorant. Toutefois le tissu n'entrait ainsi en contact qu'avec la couche de liquide directement adjacente (voir la figure 3). On a compris que, pour teindre

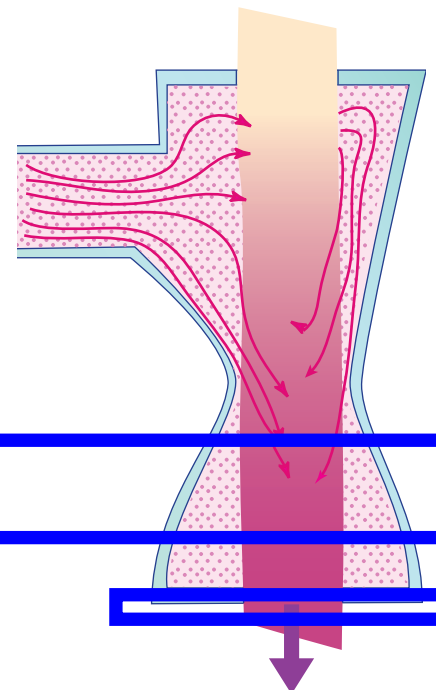


2. LES FIBRES sont composées par association de microfibrilles, lesquelles sont des alternances de zones où les macromolécules sont désordonnées (zones amorphes) et de zones cristallines où les macromolécules sont régulièrement arrangées (cet arrangement est grossi à droite).



3. DANS UNE SOLUTION d'un colorant, seul le colorant présent dans la couche limite, au contact immédiat du tissu, diffuse dans le tissu et le colore (à gauche). Pour que tout le colorant du bain participe à la teinture, on suce la solution colorante à travers le tissu

ou l'on fait passer le tissu (bande verticale, à droite) et la solution colorante dans un tuyau rétréci : la solution est alors plaquée contre le tissu, parce que la pression du liquide est réduite dans la zone rétrécie, où le liquide est accéléré au voisinage du tissu.



rapidement, on devait éviter cette «couche limite». De nombreuses techniques ont été inventées, tels le suçage du bain à travers le tissu ou le «jet» : on fait passer le tissu et la solution colorante dans un conduit rétréci ; l'accélération du liquide s'accompagne d'une réduction de la pression au voisinage du tissu – c'est la loi de Poiseuille – qui plaque la solution colorante contre le tissu.

On maîtrise alors la cinétique d'échange entre le colorant dans le bain et le colorant sur le tissu en réglant la circulation des fluides et les paramètres chimiques de l'opération. Ainsi, la température des bains détermine le coefficient de diffusion : à haute température, les molécules sont plus rapides et, donc, migrent plus vite entre les fibres et à l'intérieur d'elles.

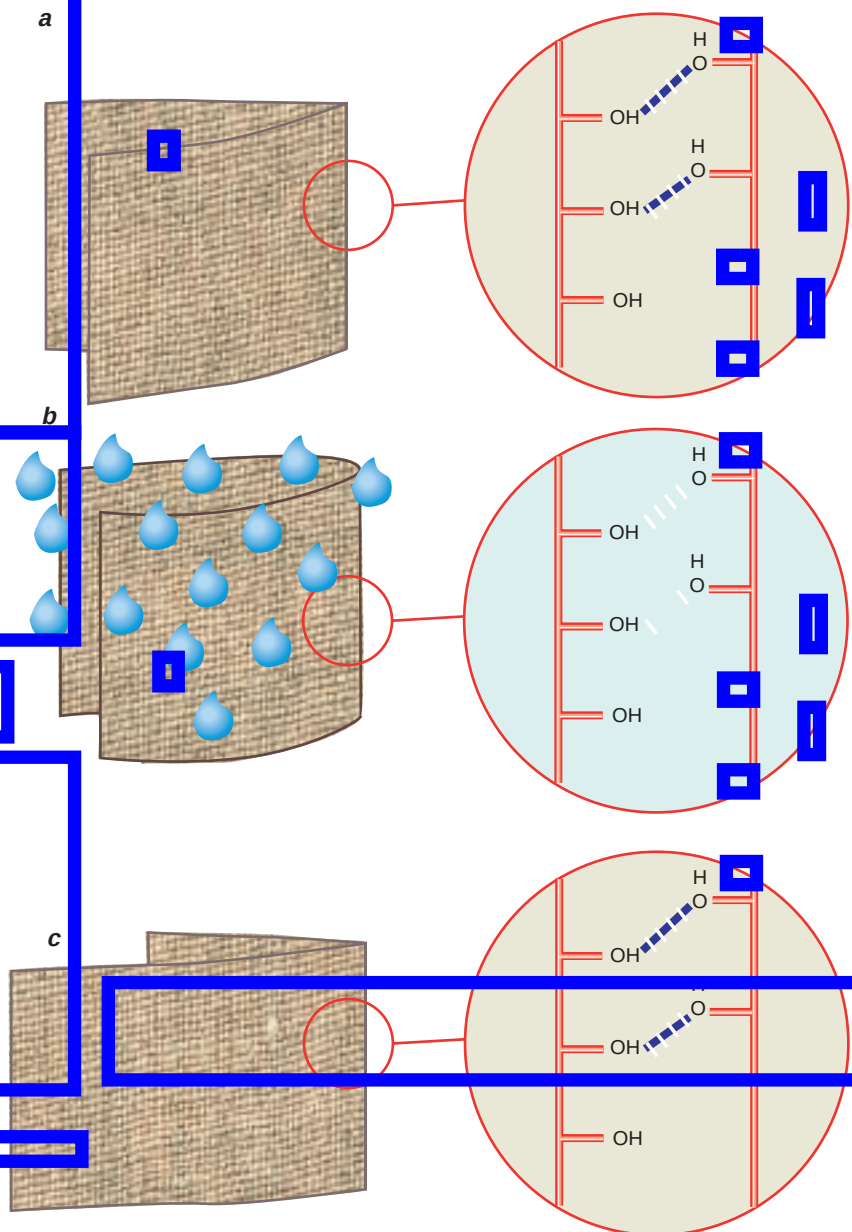
Toutefois la fixation du colorant sur la fibre correspond à la création de liaisons chimiques «hydrophobes» : l'énergie des molécules de colorant est inférieure quand ces molécules sont au contact du tissu que quand elles sont en solution dans le bain colorant. De ce fait, l'établissement des liaisons hydrophobes s'accompagne d'une libération de chaleur. Cette dernière est gênante, car elle réduit la quantité de colorant sur le tissu conformément au principe énoncé par le chimiste français Henry Le Chatelier : lorsqu'un système est en équilibre stable, toute modification de ses paramètres provoque un déplacement de l'équilibre qui s'oppose à la modification.

Par conséquent, si l'on chauffe une solution colorante, le système s'adapte de telle façon que l'échauffement soit réduit : moins de colorant se fixe. Pour colorer rapidement, on doit chauffer, mais pour colorer beaucoup, on doit ne pas trop chauffer.

Freins et accélérateurs de teinture

La mise au point d'agents d'unisson impose ainsi la prise en compte de nombreux phénomènes simultanés. Examinons, par exemple, la coloration de la laine par un colorant anionique. Un tel colorant a une molécule formée d'un gros groupe colorant négativement chargé et d'un petit ion positif. Par exemple, certains centres chromophores sont sulfonés, c'est-à-dire qu'ils sont liés à un groupe $-\text{SO}_3\text{Na}$, lequel se dissocie

en $-\text{SO}_3^-$ et Na^+ quand le solvant le perméabilise (c'est le cas de l'eau). Or la laine porte des groupes amine $-\text{NH}_2$, qui, en milieu acide, se transforment en groupes chargés ammonium $-\text{NH}_3^+$, auxquels se lie fortement la partie négativement chargée du colorant. Pour ralentir la fixation du colorant et obtenir un meilleur unisson, on ajoute dans le bain de teinture un sel, tel le sulfate de sodium : beaucoup plus petit que le colorant, l'ion sulfate SO_4^{2-} se fixe sur les groupes ammonium de la laine beaucoup plus rapidement que le colorant (voir la figure 5).



4. LES PLIS DES TISSUS sont dus à l'établissement de liaisons hydrogène entre macromolécules voisines (a). Quand de tels tissus sont mouillés (b), ces liaisons sont rompues, puis rétablies au séchage, en d'autres sites (c). On évite ces modifications en saturant les groupes susceptibles d'établir des liaisons hydrogène.

Ce moyen n'est pas une panacée, car les composés peu solubles précipitent quand les solutions contiennent beaucoup d'ions : les molécules d'eau s'y lient alors plus facilement qu'aux molécules peu solubles. De ce fait, la réduction de solubilité provoquée par le sulfate de sodium augmente la fixation du colorant sur les fibres.

On peut aussi modifier l'affinité du colorant pour la fibre en modifiant l'acidité du bain : la forme acide du colorant est moins soluble dans l'eau que le sel ; en outre, l'ajout d'acide augmente le nombre de groupes ammonium sur la laine, ce qui augmente la vitesse de coloration.

Enfin, l'exposé du problème serait incomplet si l'on omettait de mentionner que la laine porte également des groupes acide carboxylique $-COOH$ qui, pouvant se charger négativement, compliquent la tâche de l'enoblisser. Au total, les chimistes disposent de plusieurs freins et accélérateurs avec lesquels ils maîtrisent la vitesse de teinture.

Ils savent également que la réaction ne doit pas être trop rapide : si elle l'était, le colorant se fixerait d'abord sur certaines zones du tissu, de sorte que le bain s'appauvrirait en colorant ; les derniers mètres de tissu seraient blancs (ce défaut se nomme le « queutage »). On suppose que, dans 10 ou 20 ans, les machines de teinture seront couplées à un spectrophotomètre, qui mesurera la teinte des tissus et des bains, afin de régler les vitesses d'échange ; aujourd'hui, le coloriste joue sur des vitesses de chauffage et des ajouts progressifs des produits auxiliaires que nous avons mentionnés.

Enfin les chimistes explorent les particularités chimiques des fibres pour optimiser la fixation des colorants. Par exemple, à Mulhouse, nous étudions les fibres polyamides, où des enchaînements de groupes hydrophobes $-CH_2-$ alternent avec quelques groupes hydrophiles amides $(-C(O)NH-)$. Un colorant tel qu'une anthraquinone aminée, c'est-à-dire une molécule qui porte une partie hydrophobe et un groupe amine $(-NH_2)$, peut se fixer de deux façons différentes sur la fibre : soit sa partie hydrophobe vient se lier par des liaisons faibles sur les segments hydrophobes de la fibre, soit le groupe amine du colorant se lie aux groupes amides.

Le mécanisme privilégié dépend de la structure des fibres. Si les parties cristallines sont nombreuses, la fixation du colorant se fait surtout par les groupes hydrophobes, mais si les fibres sont amorphes, les groupes amides des fibres sont exposés, et les fixations se font par les groupes amine (en pratique, on règle

la cristallinité des fibres au filage) ; les colorations obtenues dans les deux cas sont différentes. D'où la nécessité d'une très bonne maîtrise de la production, afin d'avoir une fibre de structure bien reproductible.

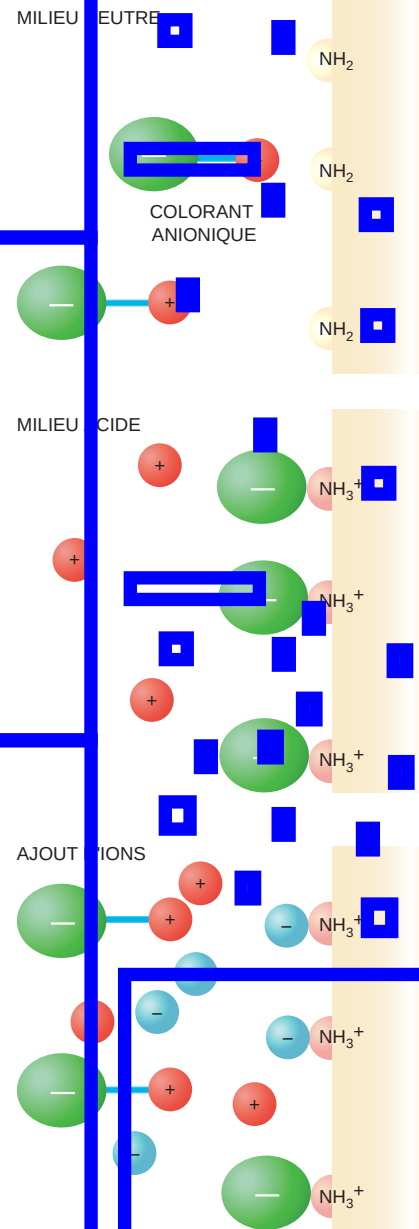
Textiles « intelligents »

Après teinture, la couleur désirée est éventuellement obtenue, mais peut-on faire mieux ? Comment rendre les chemises infroissables, par exemple ? Les textiles composés de certaines fibres synthétiques le sont, mais leur contact n'est pas encore agréable.

Considérons le coton. Les zones amorphes de ce polymère du glucose sont constituées par des macromolécules mal organisées, liées par des liaisons hydrogène. Dans l'eau, ces zones se dissolvent, et, quand un pli se forme, les liaisons hydrogène qui s'établissent au séchage figent le pli (voir la figure 4).

Le chimiste a la tentation d'éviter les plis en faisant réagir sur les groupes hydroxyle $(-OH)$ qui assurent les liaisons hydrogène un composé qui, lui, n'établit pas de liaisons hydrogène. Toutefois, le coton ainsi obtenu est alors hydrophobe : il sèche plus vite, mais il se lie davantage aux graisses, et son toucher est modifié. On a longtemps réalisé cette opération avec du formaldéhyde, ou formol $(HCHO)$, qui réagit avec les groupes hydroxyle pour former des groupes $-O-CH_2OH$, lesquels réagissent avec d'autres groupes hydroxyle ; on substitue ainsi aux groupes hydroxyles des groupes organiques hydrophobes qui, eux, ne forment pas de liaisons rompues dans l'eau. Aujourd'hui on utilise des produits plus efficaces et moins toxiques, tels des acides polycarboxyliques (avec plusieurs groupes $-COOH$). Il reste à améliorer le toucher des tissus ainsi traités.

La cellulose qui devient infroissable est également irrétrécissable. Pourquoi la cellulose naturelle rétrécit-elle au lavage ? La molécule, nous l'avons vu, s'organise en zones cristallines et en zones amorphes. Lorsqu'elle est mouillée, on peut tirer sur les zones amorphes. Quand on sèche le tissu, on bloque le système de macromolécules, mais sous tension. Quand on le mouille à nouveau, surtout dans les machines à laver, les macromolécules reprennent une configuration repliée, et le matériau rétrécit. Pour éviter ce phénomène, on



5. UN COLORANT IONIQUE, c'est-à-dire dont le groupe colorant peut se détacher d'un ion, teinte différemment les fibres selon la concentration en ions présents dans le milieu. En réglant cette concentration, on peut ainsi modifier la force colorante d'une teinture. On voit ici la fixation d'un même colorant ionique à de la laine en milieu neutre (en haut), en milieu acide (au milieu) et dans une solution où l'on a ajouté des ions (en bas). Ces derniers ont remplacé les colorants sur les fibres.

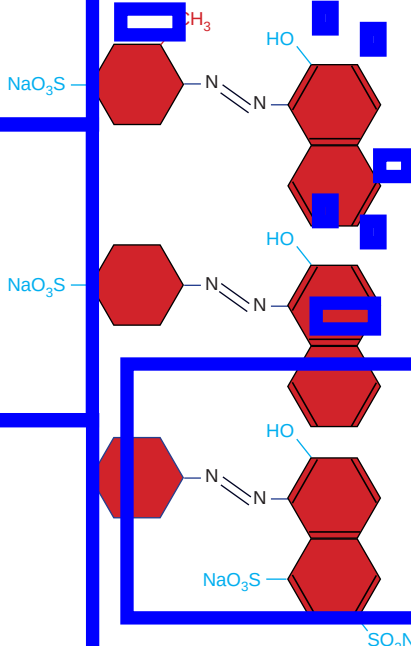
supprimer les liaisons qui se rompent dans l'eau de sorte que les macromolécules ne glissent plus les unes par rapport aux autres.

De même, par cette technique, on peut fixer une forme, tel un pli de pantalon. En pratique, on mouille le tissu afin de faire gonfler les zones amorphes. Puis, lorsque les zones amorphes sont mises à la forme voulue sous une presse à repasser, on réalise une réaction chimique. Elle est irréversible.

Cette technique d'apprêt sur le coton n'est qu'un exemple parmi cent autres. Modifier le toucher, le brillant, le comportement au feu, à la moisissure, à la lumière, etc. impose des transformations physico-chimiques. Ces traitements doivent pouvoir se combiner : on veut souvent produire un tissu qui soit à la fois ignifuge, infroissable et antitache.

Comment conférer cette dernière propriété? En évitant que les corps gras ne mouillent le tissu, c'est-à-dire ne s'étalent et ne pénètrent entre les fibres. Contrairement à la teinture, on doit ici traiter les fibres en surface. Pour empêcher le mouillage par des corps gras, une bonne solution consiste à disposer à la surface des textiles des produits ayant une énergie de surface très faible. L'effet est analogue à celui qui est mis en œuvre dans les poêles anti-adhésives : on obtient celles-ci en frittant du polytétrafluoréthylène (PTFE, ou Téflon) en poudre. Le PTFE est une substance dont l'énergie de surface est inférieure à celle des corps gras, de sorte qu'ils ne la mouillent pas. Cependant cette substance n'est pas directement applicable sur les tissus : lors du frittage, indispensable à la constitution des fibres, elle transformerait complètement le toucher du textile.

Les ennoblisseurs ont trouvé un apprêt antitache différent : ils utilisent de grosses molécules qui restent en surface apportant des groupes chimiques qui confèrent au tissu les propriétés du PTFE. Par exemple, une longue molécule où tous les atomes de carbone sont liés à des atomes de fluor à l'exception d'un seul, qui porte un groupe acide carboxylique ($-\text{COOH}$), s'adsorbe à la surface du coton par le groupe acide ; le tissu ne se mouille alors plus, parce qu'il ne présente à son environnement que des groupes fluorés hydrophobes.



6. CES TROIS MOLÉCULES ont une structure colorante commune, mais les groupes qui y sont greffés donnent des propriétés différentes d'adhérence aux fibres. Les groupes hydroxyle ($-\text{OH}$) et sulfonate ($-\text{SO}_3\text{Na}$) sont hydrophiles, tandis que les groupes méthyle ($-\text{CH}_3$) sont hydrophobes. En modifiant ainsi la structure chimique des colorants, on règle leur affinité pour les divers tissus.

L'application d'un traitement antitache impose d'abord de bien choisir l'agent de dispersion de l'agent antimouillant. Cet agent n'étant pas soluble dans l'eau, on doit employer conjointement des molécules tensioactives. Cependant, si ces molécules tensioactives restent sur le tissu, après le traitement, elles risquent de favoriser le mouillage du tissu par l'huile. On doit donc choisir un tensioactif qui puisse s'évaporer ou être lavé par le rinçage (un alcool décapyle, du butanol).

Remarquons, de surcroît, que si l'ennoblissement est une science appliquée, la lessive devrait l'être aussi :

lorsque nous lavons une nappe traitée antitache, les adoucissants risquent de détruire l'effet du traitement antitache. En effet, certains adoucissants sont des ammonium quaternaire alkylé, c'est-à-dire des molécules composées d'un atome d'azote chargé positivement, lié à un atome d'hydrogène et à deux chaînes hydrocarbonées. L'atome d'azote s'adsorbe sur le coton qui présente alors des chaînes hydrocarbonées hydrophobes, sur lesquelles les corps hydrophiles glissent. Toutefois le mouillage par les corps gras est alors favorisé, ce qui détruit l'effet du traitement antitache. La formulation des lessives est donc compliquée par les ennoblislements demandés par les utilisateurs.

Dans les années 1950 et 1960, les traitements des tissus étaient quasiment limités à la teinture, et les usines avaient un aspect archaïque : grosses cuves d'eau fumantes, rejets aqueux et atmosphériques abondants. On ne parlait d'ailleurs pas d'ennoblissement, mais de manutention. Le personnel était surtout choisi pour son expérience, et les conducteurs de machine opéraient à l'instinct : ils savaient que, si la bonne couleur n'était pas obtenue, ils devaient ajouter du sel ou de l'acide (qu'on ne dosait pas). Les traitements n'étaient pas reproductibles.

Aujourd'hui on ne travaille plus sur stock et les traitements doivent être reproductibles. En outre, l'industrie textile a également voulu améliorer le rôle du textile, pour l'adapter mieux à ses fonctions. La couleur (qui doit être plus résistante que par le passé) ne suffit plus ; on pratique des traitements beaucoup plus complexes, mais à des prix qui ne doivent pas augmenter. Jamais la recherche en physico-chimie fondamentale n'a été aussi nécessaire.

Paul VIALLIER est professeur de chimie à l'École nationale supérieure des industries textiles de Mulhouse.

Finishing Industry, Comett-Eurotex, Guimarães, 1990.

P. VIALLIER, *Heat Transfer in the Textile Finishing Industry*, Comett-Eurotex, Guimarães, 1991.

M. PETER et H.K. ROUETTE, *Grundlagen der Textilveredlung*, Deutscher Fachschriften-Verlag, 1989.

Giles Laboratory Course in Dyeing, Monographie de la Society of Dyers and Colourists, Perkin House - Bradford, England, 1989.

P. VIALLIER, *Energy Uses in the Textile*

G. FISCUS et D. GRUNEWALD, *Ennoblement Textile*, Guide complet, Éditions High Tex. BP 5 - Sausheim, 1993.

P. VIALLIER et C. JORDAN, *Teinture à la continue : le queutage des pièces*, in *L'industrie textile*, n° 1305, pp. 1-3, janvier 1999.

Du crustacé au tissu

ALAIN DOMARD

On utilise la chitine de la carapace des crustacés pour confectionner des tissus utiles en médecine et pour ennoblir des textiles spéciaux.

Les organismes vivants fabriquent d'innombrables molécules qui intéressent l'industrie chimique : la cellulose des végétaux est utilisée dans l'industrie du papier et dans l'industrie textile (pour la confection du coton, par exemple) ; l'amidon des céréales ou des tubercules est le principal constituant des féculs et des farines alimentaires, et on l'utilise aussi pour la fabrication d'emballages ou de colles ; et nombre de molécules biologiques sont les principes actifs des médicaments.

Aujourd'hui, l'industrie textile s'intéresse à une molécule abondante dans les organismes vivants : la chitine. On estime qu'il s'en synthétise 10 à 100 milliards de tonnes par an : la molécule constitue la structure du squelette externe des crustacés et des insectes, et c'est un composant majeur de la matière fibreuse de la paroi cellulaire de champignons, d'algues, etc. En revanche, elle est totalement absente de tous les végétaux terrestres ou des animaux supérieurs (mammifères, poissons, oiseaux...).

La chitine fut découverte en 1811 par le chimiste français Henry Braconnot (1780-1855), alors qu'il étudiait la composition chimique des champignons supérieurs au Jardin botanique de Nancy, dont il était le directeur. Cette découverte, antérieure de 30 ans à celle de la cellulose, fait de la chitine le polysaccharide (ou « sucre » complexe) le plus anciennement connu. En 1823, un deuxième Français, A. Odier lui donna son nom de chitine, du grec *chiton* qui signifie tunique ou enveloppe. Un dérivé de la chitine, le chitosane, très rare dans la biomasse (on ne le trouve que chez certains champignons ou certaines levures), fut découvert en 1859 par un troisième chimiste français, Claude Rouget, qui traitait la

chitine par de la potasse concentrée et chaude ; il obtenait un résidu qui, contrairement à la chitine, était soluble dans les acides dilués.

Quel que soit l'organisme qui synthétise la chitine, celle-ci, comme la cellulose, est toujours produite sous forme de fibres. D'où la question évidente : la chitine et le chitosane pourraient-ils également servir à la réalisation de fibres textiles ?

À l'état natif, la chitine est souvent accompagnée d'une proportion notable de matières minérales et de protéines : aussi ne peut-on pas l'utiliser directement pour des applications textiles. Nous verrons que les

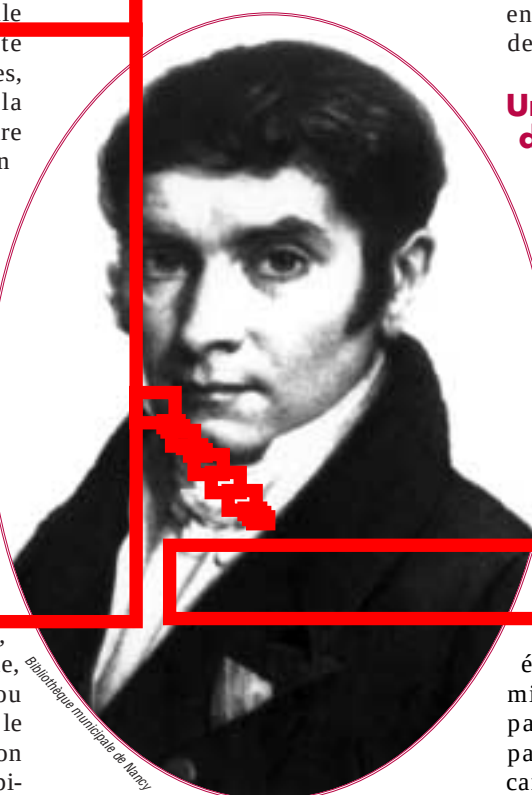
particularités chimiques de la chitine et du chitosane, ainsi que le type de matières premières dont on les extrait, confinent aujourd'hui les fibres à base de chitine ou de chitosane à des usages spéciaux : le coût élevé de la chitine et du chitosane, par rapport à la cellulose, limite leurs applications à des secteurs à haute valeur ajoutée.

Toutefois, les cours de ces polymères n'ont cessé de décroître au cours des 20 dernières années et pourraient, dans les conditions actuelles de production, se stabiliser à environ 40 francs par kilogramme pour le chitosane. De surcroît, les propriétés biologiques de ces molécules en font des constituants de choix pour la réalisation de textiles utiles en médecine. L'ère des textiles à base de chitine ne fait que commencer.

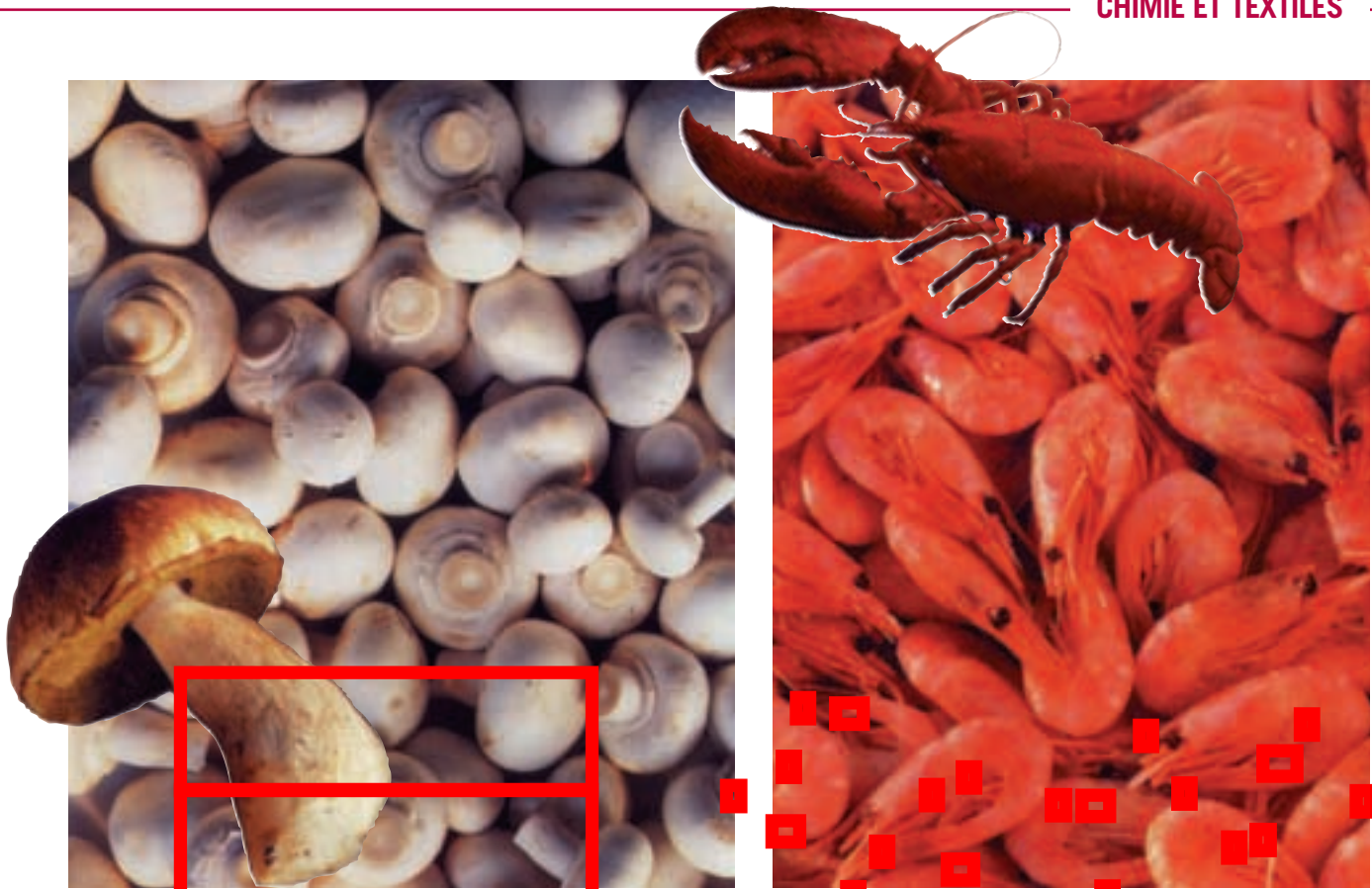
Une valorisation de déchets

Les cuticules du zooplancton (notamment les petites crevettes qui constituent le krill) sont la source la plus importante de chitine. Toutefois la pêche de ces organismes minuscules (quelques millimètres de longueur) est trop difficile pour qu'on puisse utiliser industriellement leur chitine. On valorise plutôt les déchets des conserveries de crustacés (carapaces de crevettes ou de crabes), où la concentration en chitine est comprise entre 8 et 33 pour cent.

Comme dans les industries qui récupèrent la cellulose du bois, on élimine d'abord les composants minéraux et organiques qui accompagnent la molécule : on dissout la partie minérale (essentiellement du carbonate de calcium) à l'aide d'acide chlorhydrique, puis on attaque le produit à la soude en chauffant légèrement afin d'éliminer les protéines.



1. LE CHIMISTE HENRY BRACONNOT (1782-1855), qui dirigeait le Jardin botanique de Nancy, découvrit la chitine en 1811.

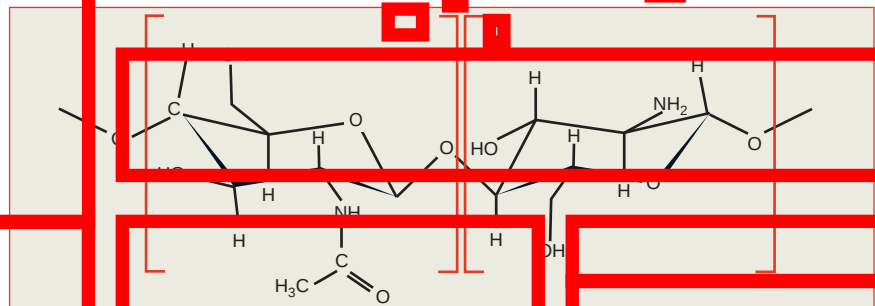


Après lavage, neutralisation et séchage, on obtient un matériau fibreux, composé de chitine dont la structure a été légèrement endommagée.

On obtient de meilleurs résultats à partir des endosquelettes de céphalopodes, tels les «plumes» de calmars, parce que la concentration en chitine y est supérieure (environ un tiers) et que leur très faible concentration en carbonate de calcium (environ 0,5 pour cent) rend inutile l'étape de déminéralisation : la chitine est moins dégradée. Malheureusement, les difficultés d'approvisionnement, font que cette source n'est presque pas exploitée.

Le chitosane a une structure chimique analogue à celle de la chitine, mais une partie des groupes latéraux acétylamine ($-\text{NHC}(\text{O})\text{CH}_3$) est remplacée par des groupes amine ($-\text{NH}_2$) : on dit qu'ils sont désacétylés. Le chitosane s'obtient après une ou deux opérations, selon le degré de désacétylation souhaité, par attaque de la chitine à la soude concentrée (20 à 45 pour cent) à une température d'environ 100 °C pendant une à trois heures.

Les tentatives d'amélioration de ce procédé n'ont pas débouché sur une évolution notable des méthodes industrielles ; à une ou deux exceptions près,



2. LA CHITINE ET LE CHITOSANE sont des polysaccharides, c'est-à-dire des enchaînements de sucres nommés glucosamine (à droite dans la formule) et N-acétylglucosamine (à gauche). La chitine et le chitosane, présents dans de nombreux organismes (crustacés, insectes, champignons, etc.), diffèrent par le degré d'acétylation, supérieur à 60 pour cent pour la chitine, inférieur pour le chitosane.

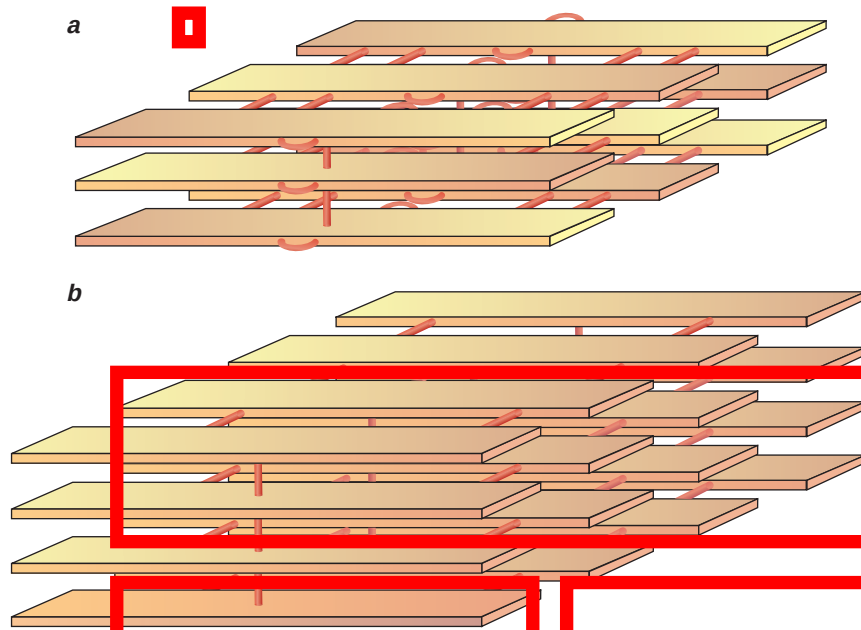
cette production est assurée artisanalement par une nuée de petites entreprises, dont les productions dépassent rarement cinq tonnes de chitosane par mois.

Une fois la chitine et le chitosane obtenus, une succession de traitements du matériau brut conduit au textile. Ces traitements sont fondés sur une bonne connaissance de la composition chimique de la chitine et du chitosane.

La famille chimique de ces deux molécules est celle des glycosaminoglycanes, où l'on trouve aussi l'acide hyaluronique et les chondroïtines, molécules respectivement présentes

dans le liquide synovial et dans le cartilage.

Les molécules de cette famille sont des copolymères, c'est-à-dire que deux sucres élémentaires s'enchaînent. Dans le cas de la chitine et du chitosane, ces «monomères» sont la glucosamine (du glucose portant le groupe amine $-\text{NH}_2$) et la N-acétylglucosamine (NAG), où le groupe amine est acétylé. Ces deux unités de base sont réparties au hasard et leurs proportions respectives distinguent la chitine et le chitosane : on nomme chitine les polymères dont le degré d'acétylation est supérieur à 60 pour cent, et chitosane les polymères moins acétylés.



3. LES CHAÎNES DE CHITINE ou de chitosane se disposent de deux façons différentes : en configuration alpha (a), les chaînes d'une même couche sont antiparallèles (le sens des molécules est représenté par les dégradés), et associées par des liaisons hydrogène nombreuses (*traits rouges*). Dans la configuration bêta (b), les chaînes sont parallèles, et les liaisons hydrogène plus lâches ; la dissolution de la chitine en configuration bêta est plus aisée (cette configuration est plus rare ; c'est celle que l'on trouve dans les endosquelettes des céphalopodes).

Cette acétylation est importante pour la structure des textiles réalisés, car le groupe acétyle, volumineux, rigidifiant la chaîne, perturbe le repliement des polymères. Nous verrons qu'elle explique aussi les propriétés biologiques utiles qu'ont les matériaux à base de chitine et de chitosane dans les organismes vivants.

À l'état natif, la chitine est fortement cristalline et, selon l'origine, elle existe sous deux formes. Dans la première, nommée chitine alpha, les chaînes sont alignées mais en sens inverse (voir la figure 3). C'est la forme la plus abondante, puisque c'est elle qui constitue, notamment, la cuticule des arthropodes et des parois cellulaires des champignons. Les molécules se tiennent par de nombreuses liaisons hydrogène, entre les atomes d'hydrogène d'une chaîne, et des atomes d'oxygène ou d'azote d'une chaîne voisine.

D'autre part, la chitine bêta, présente dans les endosquelettes des céphalopodes, est composée de chaînes toutes parallèles et dans le même sens ; l'empilement est alors plus compact, mais le matériau est moins résistant, parce que les distances entre les atomes qui établissent des liaisons hydrogène sont augmentées et que ces liaisons sont moins nombreuses.

Ces répartitions de chaînes expliquent pourquoi la chitine des céphalopodes est plus facile à extraire que celle des crustacés : les réactifs peuvent s'immiscer entre les chaînes, et ils doivent rompre moins de liaisons hydrogène pour séparer les polymères. On peut même hydrater la chitine bêta

sans la solubiliser afin de former des films par les mêmes procédés que ceux qui sont employés dans l'industrie du papier. Malheureusement cette structure est totalement détruite par dissolution, et la chitine régénérée à partir d'une solution recristallise uniquement sous la forme alpha.

Pourquoi la nature produit-elle de la chitine bêta, alors que la forme alpha semble être la plus stable ? La question n'est pas seulement académique : en maîtrisant les empilements, on détermine les produits que l'on obtient à partir de la chitine ou du chitosane. La réponse doit être trouvée dans le type particulier de matériaux que produisent les animaux : on suppose que, dans la chitine bêta, les chaînes sont produites simultanément et en continu, dans un unique organe intracellulaire, où elles s'assemblent spontanément, lorsqu'elles sont extrudées sous forme de fibres parallèles vers l'extérieur. Dans le cas de la chitine alpha, les chaînes seraient repliées sur elles-mêmes avant assemblage et extrusion.

Le filage industriel de la chitine ou du chitosane s'effectuant toujours à partir de solutions, les fibres industrielles sont nécessairement toujours sous la forme alpha. Néanmoins, les chimistes cherchent des procédés pour élaborer des matériaux à partir de chitine bêta de masse moléculaire très élevée : on produirait ainsi des



4. L'EXTRACTION DES PLUMES DE CALMARS est une opération longue, qui ne s'effectue que dans des pays où la main-d'œuvre est bon marché. On obtient ainsi du chitosane presque pur.

fibres textiles de ténacité supérieure à celle que l'on obtient aujourd'hui.

Trois états physiques

Comment dissocier les agrégats naturels de ces polysaccharides, afin de filer ensuite des fibres? Nous avons rapidement esquissé le procédé, mais la chimie révèle un large champ, en même temps qu'elle indique les impossibilités.

Comme les molécules de chitine sont liées par un réseau de liaisons hydrogène trop dense pour que l'on puisse simplement fondre le matériau, les chimistes doivent d'abord mettre les molécules en solution ou sous la forme de gels. Toutefois, la chitine et le chitosane portent de nombreux groupes chimiques qui peuvent établir un réseau très dense de liaisons hydrogène et d'interactions hydrophobes (entre des groupes chimiques qui ne sont pas solubles dans l'eau : quand la molécule est tout entière dans l'eau, ces groupes se rassemblent). Ainsi, quel que soit le degré d'acétylation, ni la chitine ni le chitosane ne sont insolubles dans les solvants organiques classiques.

Dans l'eau, le problème est différent pour le chitosane et pour la chitine. Lorsque le degré d'acétylation est inférieur à 60 pour cent (chitosane), on obtient la dissolution dans l'eau par une acidification (voir la figure 6) : l'ajout

d'ions hydrogène positivement chargés H^+ aux nombreux groupes amine $-NH_2$ de la chitine conduit à une ionisation de ces derniers ($-NH_3^+$). Portant ainsi une forte charge électrique, les molécules de chitosane se séparent, parce que les répulsions électrostatiques sont plus fortes que les liaisons hydrogène ; simultanément, les chaînes moléculaires se déplient, et les sites positivement chargés s'entourent de molécules d'eau.

On règle cet effet à l'aide d'ions négatifs que l'on ajoute à la solution : en venant entourer les ions positifs de la chitine, ces ions négatifs écrantent les répulsions électrostatiques et limitent l'expansion des chaînes ; de la sorte, on diminue la viscosité des solutions, et l'on facilite le filage. En pratique, on ajoute simplement un électrolyte simple tel le chlorure de sodium, le sel de table, qui libère à la fois des ions sodium, positivement chargés, et des ions chlorures, négativement chargés) ou l'on acidifie le milieu à un pH inférieur à deux (le pH, qui mesure l'acidité d'un milieu, est compris entre 0, pour les milieux très acides, et 14 pour les milieux très basiques).

Une solubilisation difficile

Dans cette gamme des degrés d'acétylation inférieurs à 60 pour cent, les comportements varient considérablement : le polymère totalement

désacétylé n'est soluble qu'en milieu acide (au pH compris entre 2 et 6), tandis que le polymère acétylé à 50 pour cent est soluble dans l'eau quelle que soit l'acidité : les groupes acétylé rigidifient les molécules, évitant que celles-ci ne s'emboîtent les unes dans les autres de façon compacte, liées par de fortes liaisons hydrogène.

Ainsi, on utilise plutôt le chitosane très désacétylé pour des applications textiles : ce type de polymère est soluble facilement dans une solution dont le pH est voisin de 4, puis, après passage au travers d'une filière ou enroulement d'un système textile, la forme solide est régénérée par élévation du pH au-dessus de 6. Les propriétés mécaniques sont excellentes.

Lorsque le degré d'acétylation est supérieur à 60 pour cent – c'est-à-dire dans le cas de la chitine –, le polysaccharide n'a plus assez de groupes susceptibles de se charger, et il n'est soluble sans composition que dans des solvants organiques particuliers, auxquels on doit ajouter du chlorure de lithium. Ce dernier s'introduit entre les molécules et détruit les liaisons hydrogène par liaison aux groupes hydroxyles ($-OH$). Ce type de traitements est celui qu'utilisent classiquement les industriels qui s'intéressent aux applications textiles de la chitine. L'état solide est alors régénéré par ajout d'alcools ou de cétones, qui se dissolvent dans le solvant et réduisent la solubilité de la chitine, laquelle précipite en fibres.

La solubilité de la chitine, comme celle de tous les polymères, décroît lorsque la longueur de la chaîne augmente : les enchaînements de huit monomères sont solubles dans l'eau, quelle que soit son acidité, en concentrations quelconques ; en revanche, lorsque le nombre de monomères enchaînés est supérieur à huit, les comportements deviennent ceux que nous avons considérés précédemment. Cette observation explique que les diverses sources industrielles de chitine et de chitosane, qui renferment des molécules comprenant entre 100 et 5 000 monomères, produisent des matériaux et des fils de qualités variées.

D'autres paramètres déterminent les propriétés des solutions. Dans le cas du chitosane, sa solubilité dans l'eau diminue, comme on l'a vu, avec la quantité d'ions dissous (la «force



5. DÉCORTICAGE DES CREVETTES dans l'usine de la Société *France Chitine*, au Nigeria. Les carapaces, qui étaient naguère jetées, sont aujourd'hui récupérées pour la préparation de chitine.

ionique». On peut aussi modifier son comportement en la plaçant dans des solvants, tels que les alcools polaires, qui se lient au polymère par moins de liaisons hydrogène, ou modifier la température pour modifier la viscosité ou la solubilité.

Les solutions de chitine ou de chitosane ont été beaucoup étudiées, mais elles posent des problèmes techniques variés. Leur forte viscosité, qui augmente avec la masse moléculaire des polysaccharides dissous, impose l'emploi de grandes quantités de solvant, de sorte qu'on récupère ensuite difficilement des extraits secs. Dans le cas de la chitine, les solvants sont toxiques, et les sels de lithium utilisés à concentration élevée (5 à 7 pour cent) rendent les solutions relativement corrosives.

Dans le cas du chitosane, le milieu légèrement acide des solutions risque de dégrader les installations industrielles et le polymère. On évite ces problèmes en travaillant préférentiellement avec des sels de chitosane facilement solubles avant leur utilisation. L'opération, très simple, évite

la présence de résidus de solvants toxiques, rédhibitoires pour certaines applications, telle la chirurgie.

Des gels prometteurs

Si les solutions de chitine et de chitosane sont déjà largement utilisées pour la confection de fibres, des gels de ces polysaccharides pourraient conduire à la réalisation de fibres spécialisées.

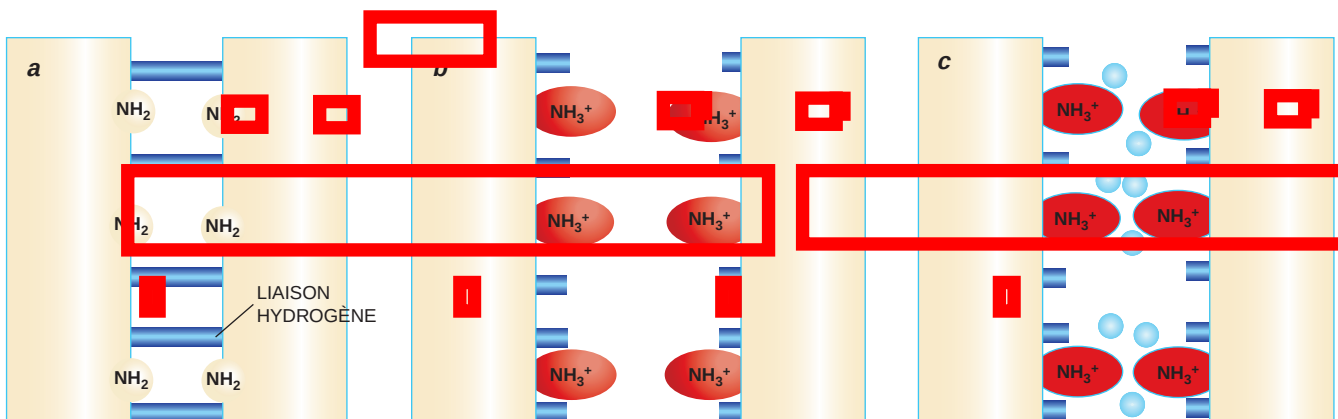
Un gel est un réseau continu, à trois dimensions, où sont piégées des molécules d'un solvant (l'eau dans un hydrogel) et des molécules éventuellement dissoutes dans ce solvant. Par exemple, la confiture est un hydrogel : les molécules de pectine font un réseau qui piège de l'eau et des molécules sapides ou aromatiques. C'est un gel physique, réversible : quand on le chauffe, les molécules de pectine se séparent, laissant une solution, laquelle gélifie à nouveau quand on la refroidit ensuite. Les gels chimiques, eux, sont irréversibles.

Les hydrogels de chitine ne sont pas thermoréversibles, mais ceux de

chitosane peuvent fondre. Dans les deux cas, on obtient ces gels à partir de solutions en perturbant l'équilibre entre les interactions hydrophiles et les interactions hydrophobes : les chaînes se lient alors au hasard, grâce à des liaisons hydrogène. On dispose ainsi de systèmes aux propriétés modulables selon le degré d'acétylation, qui s'appliquent, et s'appliqueront de plus en plus, dans des domaines aussi variés que les biotechnologies, l'agriculture, l'agro-alimentaire, la pharmacie, les cosmétiques, les biomatériaux, etc.

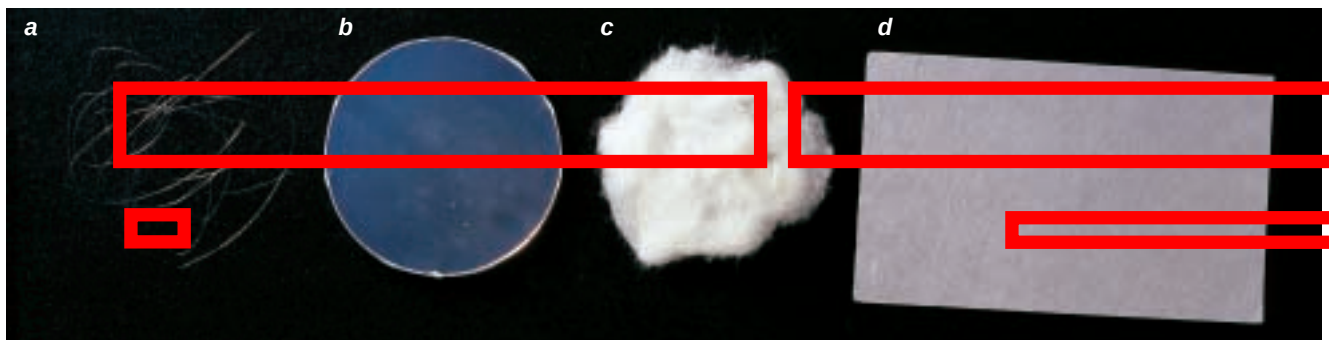
En effet, avec ces gels, on peut fabriquer des matériaux composites qui incluent différents types de matériaux, telles des particules organiques et minérales, etc. En fait, surtout, on peut préparer des textiles spéciaux pour les diverses branches mentionnées. Les fibres peuvent être de diverses natures, notamment en proportions de chitine et de chitosane.

On fabrique des réseaux interpénétrés : on associe au chitosane et à la chitine d'autres polymères qui gèlent dans des conditions différentes, de sorte



6. POUR SÉPARER les molécules de chitine, fortement associées par des liaisons hydrogène (a), on traite le matériau par de l'acide. La transformation des groupes amine ($-NH_2$) en formes électriquement

chargées provoque une répulsion électrostatique des chaînes (b). On ajuste ces répulsions en ajoutant des ions (en bleu clair, c), qui font un écran électrique entre les charges de même signe.



7. QUELQUES STRUCTURES TEXTILES réalisées à partir de chitine ou de chitosane. Des fils en chitosane pur (a) ont une très bonne régularité et une ténacité prometteuse. Quand on dissout la chitine

ou le chitosane, on obtient des solutions qui peuvent gélifier (b). En filant les solutions et en les coagulant, on obtient des fils à partir desquels on prépare des tissus (c) ou des non tissés (d).

qu'en ajustant les conditions, on modifie le comportement du matériau global. On place facilement dans ces gels de petites molécules, des macromolécules ou des systèmes plus complexes, tels le sang ou des cellules vivantes.

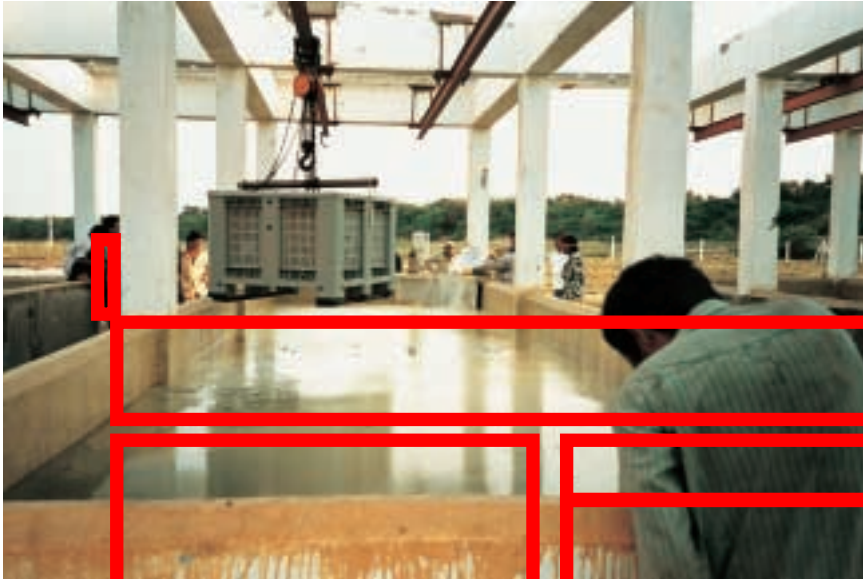
Du liquide au solide

Les endosquelettes de céphalopodes procurent de la chitine bêta, qui peut être traitée de la même façon que la pâte à papier, formant des films aux propriétés équivalentes à celles du papier. À partir des autres matières premières, on obtient des fibres solides par coagulation de solutions à l'aide d'un agent précipitant, puis par lavage et séchage. On peut aussi évaporer le solvant d'une solution : après avoir coulé une solution dans un récipient, on obtient des films ou des plaques ; après lyophilisation d'une solution, d'un gel ou d'un précipité, on obtient des éponges plus ou moins rigides. Dans tous les cas, les matériaux sont semicristallins, et les propriétés mécaniques sont équivalentes à celles des celluloses régénérées de même nature physique.

On produit aussi des microparticules à partir d'émulsions, c'est-à-dire de dispersions de gouttelettes de solution aqueuse de chitine ou de chitosane dans un liquide non miscible à l'eau (par exemple, une huile), et des équipes cherchent à fabriquer des nanoparticules, qui seraient utiles en pharmacie. Ces particules pourraient être associées à des textiles : soit elles apporteraient aux fibres les propriétés intrinsèques de la chitine ou du chitosane, soit elles serviraient à relarguer des principes actifs qu'elles contiendraient.

Les propriétés des différents systèmes solides obtenus à partir de cette série de polysaccharides dépendent de paramètres intrinsèques comme le degré d'acétylation, le degré d'ionisation (la proportion de groupes aminés électriquement chargés), les dimensions moléculaires et le taux de cristallinité. Tous ces paramètres sont parfaitement modulables, ce qui donne une très grande variété de propriétés physiques, chimiques ou biologiques.

Les textiles réalisés à partir de fils de chitine ou de chitosane bénéficient des propriétés chimiques de leurs molécules constitutives. Le chimiste peut modifier ces propriétés de diverses façons.



France Chitine

8. DISSOLUTION DU CALCAIRE présent dans les carapaces de crevette, dans une usine en Inde. Le bain est une solution d'acide chlorhydrique. Le traitement dure environ deux heures à la température ambiante. Il fournit une chitine peu dégradée, dont il faut encore extraire les protéines.

Examinons d'abord le cas des liaisons hydrogène : tous les groupes chimiques liés au squelette de la glucosamine ou de la N-acetylglucosamine peuvent établir des liaisons de ce type. Nous avons vu que ces liaisons déterminent la solubilité et la stabilité des structures cristallines ; elles peuvent également assurer la liaison de la chitine et du chitosane à d'autres polymères naturels comme la cellulose ou les protéines.

La réunion de la chitine avec la cellulose, notamment, augmente l'affinité des fibres de cellulose pour les colorants : utilisé en ensimage, le chitosane favorise la fixation de nombreux colorants, parce que les électrons des groupes qui donnent la couleur (généralement peu liés) peuvent se lier soit aux atomes d'oxygène, soit aux atomes d'azote des glucosamines. Mieux encore, on peut fixer des enzymes (ayant, par exemple, des activités médicales) sur des fibres de cellulose-chitine ou sur un revêtement de fibres recouvertes seulement de chitine, lors d'une opération d'ensimage.

Deuxièmement, les interactions hydrophobes, c'est-à-dire les liaisons entre des groupes chimiques non solubles dans l'eau, représentent une part importante des interactions que les polymères naturels peuvent établir avec d'autres molécules. Dans le cas de la chitine ou du chitosane, ces interactions sont utilisées pour créer des

interactions avec les domaines hydrophobes de certains colorants.

Troisièmement la protonation du groupe amine (ce groupe $-NH_2$ est transformé en $-NH_3^+$) est à l'origine d'interactions électrostatiques fortes. Le chitosane est un polyélectrolyte relativement faible, mais c'est le seul polymère naturel qui ne porte que des charges électriques positives. De ce fait, il forme facilement des complexes avec des polymères qui ne portent que des charges négatives.

Pour les polymères qui portent des groupes très acides, le complexe est définitif : c'est le cas des sulfates, des sulfonates et certains groupes acide carboxylique des polymères synthétiques ou naturels. Ce type d'interaction est classique avec les fibres de cellulose qui portent toujours des groupes acide carboxylique ($-COOH$). Dans tous les cas, ces complexes, associés aux deux formes précédentes ont pour intérêt de renforcer les propriétés mécaniques, de diminuer l'hydrophilie et de rendre les polymères moins sensibles aux micro-organismes et à leurs enzymes.

Les charges portées par le chitosane, associées dans de nombreux cas à la possibilité de liaisons hydrogène et d'interactions hydrophobes, font de ce polymère un excellent flocculant ou un excellent dispersant (selon la concentration utilisée) de la plupart des dispersions aqueuses :

généralement, les particules organiques ou minérales portent des charges de surface négatives. Cette propriété intéresse l'industrie textile : pour introduire très simplement des particules dans des non tissés de chitine ou de chitosane (des textiles formés par la réunion de fibres, comme le papier), on plonge seulement ces derniers dans des suspensions contenant les particules à déposer.

Enfin la forme amine libre ($-NH_2$) du chitosane permet une liaison de la molécule à de nombreux métaux. On arrive facilement à fixer un atome de métal sur les deux sites glucosamine, ce qui, dans l'exemple de l'uranium naturel permet de capter 0,8 gramme d'uranium par gramme de polymère fortement désacétylé.

L'interaction alors est très forte, de sorte que la coloration par des ions métalliques est excellente. En outre, les textiles de chitosane, en captant les ions lourds sont aussi des concentrateurs de métaux : on peut les utiliser pour recueillir les métaux à l'état de trace, et détruire les complexes formés par incinération, ne laissant pour cendres que les oxydes métalliques récupérés. Le chitosane à l'état solide (fibre, poudres, films, etc.) peut ainsi être utilisé comme décontaminant, dépolluant. Dans le domaine textile, la fixation de métaux peut être intéressante contre les acariens et contre les micro-organismes. Elle peut aussi être utilisée pour renforcer les propriétés mécaniques des fibres de chitosane.

Biologie et textile

Enfin, la chitine et le chitosane sont des polysaccharides qui intéressent la biologie et la médecine, car ils sont biologiquement actifs : le groupe acétylamide est également présent sur des protéines ou sur des polysaccharides variés de l'organisme.

De surcroît, de nombreuses enzymes dégradent naturellement la chitine et le chitosane, à une vitesse qui dépend du degré d'acétylation. C'est un atout dans les applications biomédicales, notamment où des biomatériaux utilisés en pansement ou comme implant doivent être éliminés progressivement.

Le chitosane déclenche, en outre, des activités biologiques variées. Quand on donne une très faible quantité de

chitosane (quelques parties par million) à une plante, on renforce la capacité de protection de la plante à l'égard des micro-organismes, voire de certains insectes, et l'on stimule la croissance de toutes les parties de la plante. On envisage des cultures sur des lits de chitosane en poudre ou, mieux, sur des formes textiles homogènes ou mixtes (incluant d'autres polymères).

Dans le domaine animal, les nombreuses expérimentations ont toutes montré que les chitines et les chitosanes favorisent la reconstruction des tissus conjonctifs. Les propriétés responsables de cette activité sont : l'immuno-stimulation, avec la production d'interféron, d'interleukines et de facteurs de nécrose tumoraux ; la stimulation de la migration de certaines cellules (notamment les fibroblastes) ; la stimulation de la mucoadhésion et l'accroissement de la perméabilité des épithéliums ; l'immobilisation de facteurs de croissance. D'autres propriétés sont également très utiles, notamment dans le cas du chitosane : une activité bactériostatique et fongistatique, et un effet antalgique.

Toutes ces propriétés font de la chitine et du chitosane un matériel particulièrement apprécié dans le domaine de la reconstruction cellulaire ordonnée. Les formes textiles devraient y trouver une part importante, comme c'est déjà le cas d'un pansement cicatrisant très utilisé : la Beschitin.

La chitine dans l'industrie textile

Les propriétés bactériostatiques et fongistatiques ajoutées aux propriétés acaristatiques de cette série de copolymères laissent envisager de nombreuses applications dans divers secteurs du textile comme ceux des vêtements de la literie, des revêtements de sols, etc. Parmi les colonies bactériennes sensibles à la présence des chitines et chitosanes, on trouve *Escherischia*, *Pseudomonas*, *Lactobacillus*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Enterococcus*, *Clostridium*, etc. Pour les champignons et levures, on trouve : *Candida*, *Fusarium*, *Scombomorus*, *Pseudoscaena*, *Botrytis*, *Saccharomyces*, *Pyricularia*, etc. Les chitines et chitosanes inhibent le développement de ces micro-organismes sans engendrer de toxicité.

Si l'intérêt de la chitine et du chitosane dans le domaine textile est clair, les limites de leur utilisation sont de deux ordres : le coût élevé des fibres, en raison du prix de la matière première (surtout dans le cas du chitosane), et les propriétés mécaniques, qui sont aujourd'hui inférieures à ce qu'elles pourraient être. Néanmoins, pour certaines applications médicales directes (tissus absorbants, non tissés, gazes chirurgicales, pansements, fils de suture résorbables, etc.) ou pour des applications spéciales (sous la forme de fibres mélangées, dans des vêtements de sport, des sous-vêtements, la literie, les moquettes, etc., ou encore en revêtement d'autres fibres) ce polymère sont indiscutablement intéressants.

Aujourd'hui, les fils de chitine ou de chitosane ont couramment des ténacités de 2,5 grammes par denier (le dernier est le nombre de grammes par 900 mètres de fil), ce qui est largement suffisant pour les applications évoquées précédemment. Toutefois les études récentes sur l'amélioration de la qualité des fibres de chitosane montrent que des fibres de haute voire de très haute ténacité pourraient être obtenues.

Molécules anciennes par leur présence dans la biomasse comme par la date de leur découverte, la chitine et le chitosane n'intéressent l'industrie que depuis peu. On peut donc penser que l'accroissement de la recherche dans ce domaine, toujours dans une phase exponentielle, avec plus de 1 600 articles par an dont plus de 40 pour cent sont des brevets, associé à l'ensemble des propriétés considérées précédemment permet de prévoir un bel avenir à ce type de molécules, notamment dans les divers aspects de l'industrie textile.

Alain DOMARD est professeur à l'Université Claude Bernard-Lyon I et directeur du Laboratoire des matériaux polymères et des biomatériaux (UMS CNRS 5627).

Chitin Chemistry, sous la direction de G.A.F. Roberts, Macmilan Press (Londres), 1992.

Advances in Chitin Science, volume II, sous la direction de A. Domard, G.A. F. Roberts et K. Varum, Jacques André Press (Lyon), 1998.

BIOLOGIE ET TEXTILES

Biologie et textiles

Les textiles antimicrobiens

FRANÇOIS N. R. RENAUD • JEAN FRENEY

Ces textiles contiennent des substances qui régulent la multiplication des bactéries responsables de mauvaises odeurs. Ils pourraient améliorer l'hygiène et participer, peut-être, à la lutte contre les infections acquises à l'hôpital.

Plusieurs joueurs des équipes de France de football et de basket ont déjà adopté des chaussettes qui «massent» les mollets, facilitant le retour du sang dans les veines vers le cœur, ce qui améliore la circulation. Des vêtements anti-odeurs qui ne fixeraient pas – notamment – l'odeur de tabac, devraient être bientôt disponibles. Différents types de textiles aux propriétés étonnantes ont été mis au point par les industriels : des tissus lumineux par incorporation de fibres optiques ; des tissus infrarouges à applications militaires (utiles pour le camouflage) ; des tissus électromagnétiques qui évitent les interférences et assurent, par exemple, un camouflage antiradar ; enfin des textiles à activité biologique, encore nommés textiles bioactifs ou biotextiles. Parmi ces derniers figurent des matelas et des moquettes anti-acariens (les parasites qui favorisent certaines allergies respiratoires et l'asthme), des moustiquaires insecticides, des tissus thermorégulateurs, ou encore des tissus qui limitent la multiplication des bactéries responsables de certaines odeurs corporelles désagréables.

Les tissus qui ont une activité antibactérienne agissent soit en protégeant le tissu lui-même contre les dégradations occasionnées par les bactéries, soit en empêchant les bactéries de proliférer. En effet, lorsque les conditions de température et d'humidité sont favorables, divers micro-organismes, des bactéries, des champignons, présents dans le sol, dans l'eau ou dans l'air colonisent les textiles, y prolifèrent et sont responsables de leur dégradation. Certains micro-organismes libèrent des enzymes qui dégradent les fibres naturelles, comme la cellulose,

la laine ou le lin en altérant ainsi les propriétés mécaniques des textiles. D'autres micro-organismes libèrent des pigments qui colorent les textiles.

Au total, cette prolifération microbienne peut favoriser l'apparition d'odeurs non souhaitées, une modification de la texture des fibres, une diminution des propriétés mécaniques ou encore une pigmentation et, par conséquent, une dévaluation commerciale du produit. L'odeur caractéristique de «renfermé» ou de «moisi» indique une croissance fongique ou bactérienne.

Comme les mauvaises odeurs proviennent, en partie, de la multiplication de certaines espèces bactériennes ou fongiques, on doit, pour les éviter, inhiber la prolifération microbienne. Quand les tissus ne sont pas en contact avec la peau, on peut tuer tous les micro-organismes sans risques. Au contraire, quand les tissus sont en contact avec la surface cutanée, on doit limiter la prolifération, sans détruire la flore microbienne qui vit naturellement sur la peau et qui la protège.

Nous examinerons comment on réussit à maîtriser la prolifération des bactéries grâce à des biotextiles qui ont essentiellement deux objectifs : d'une part, éviter les odeurs corporelles désagréables et, d'autre part, empêcher la multiplication des bactéries. Nous verrons que les textiles à activité biologique nécessitent de concilier deux mondes apparemment incompatibles : le monde inerte des textiles et le monde du vivant, celui de l'homme, mais aussi celui des bactéries.

La peau est constituée du derme profond, recouvert de l'épiderme superficiel. Normalement, le derme ne contient pas de micro-organismes. Au contraire, l'épiderme est colonisé

par une flore dont la nature et la composition dépendent de la température, de l'humidité ou encore de l'acidité de la peau. La température de la peau n'est pas uniforme : en moyenne de 32 à 33 °C, avec des zones froides (30 °C sous la plante des pieds), et des zones chaudes (34 à 35 °C sous les aisselles et sur l'abdomen). La flore naturelle de la peau est constituée, d'une part, de la flore résidente et, d'autre part, de la flore transitaire qui, contrairement à la précédente, colonise la peau de façon temporaire.

La peau et sa flore

La flore résidente, bien adaptée au système écologique de la peau, constitue une barrière efficace contre la colonisation par les micro-organismes potentiellement nocifs de la flore transitaire. Les micro-organismes de la flore résidente sont adaptés à l'écosystème cutané, car ils trouvent dans la sueur et dans le sébum les nutriments nécessaires à leur développement. Le sébum est le produit de sécrétion des glandes sébacées, généralement associées aux poils ; il est composé de corps gras et de débris protéiques. La flore résidente se développe sur la couche cornée, c'est-à-dire sur la couche la plus externe de l'épiderme. À mesure que les cellules cornées desquament (les cellules mortes se détachent, sous forme de pellicules, par exemple) l'épiderme libère des bactéries. Ces squames contaminent l'environnement et notamment les vêtements.

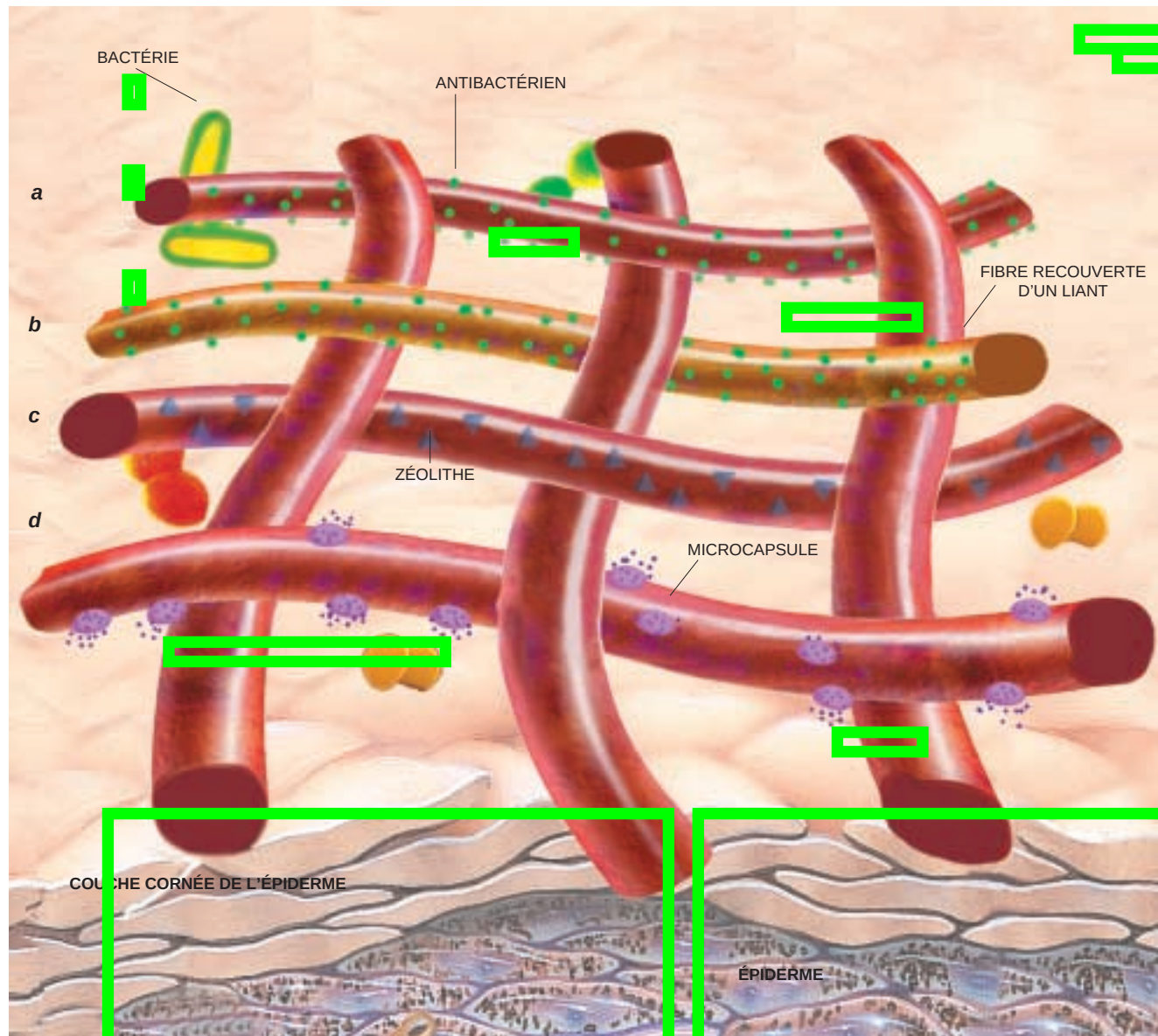
Les zones sèches de la peau (la face externe des membres, le front) sont peu colonisées, contrairement aux zones humides (les aisselles ou le périnée).

La flore microbienne est surtout constituée de corynebactéries et de staphylocoques, plus résistants à l'absence d'humidité que des bactéries telles que les entérobactéries. Ainsi, la flore résidente vit en symbiose avec l'organisme et le protège contre les bactéries potentiellement pathogènes de la flore transitaire. Toutefois, lorsque la flore résidente agit sur les sécrétions nor-

males de la peau, elle engendre des odeurs désagréables. Ces odeurs deviennent perceptibles quand la concentration en produits de dégradation, donc la concentration en bactéries elles-mêmes, devient excessive. Pour lutter contre les odeurs corporelles, on tente de limiter la multiplication des bactéries, mais on doit éviter de les détruire, car on supprimerait

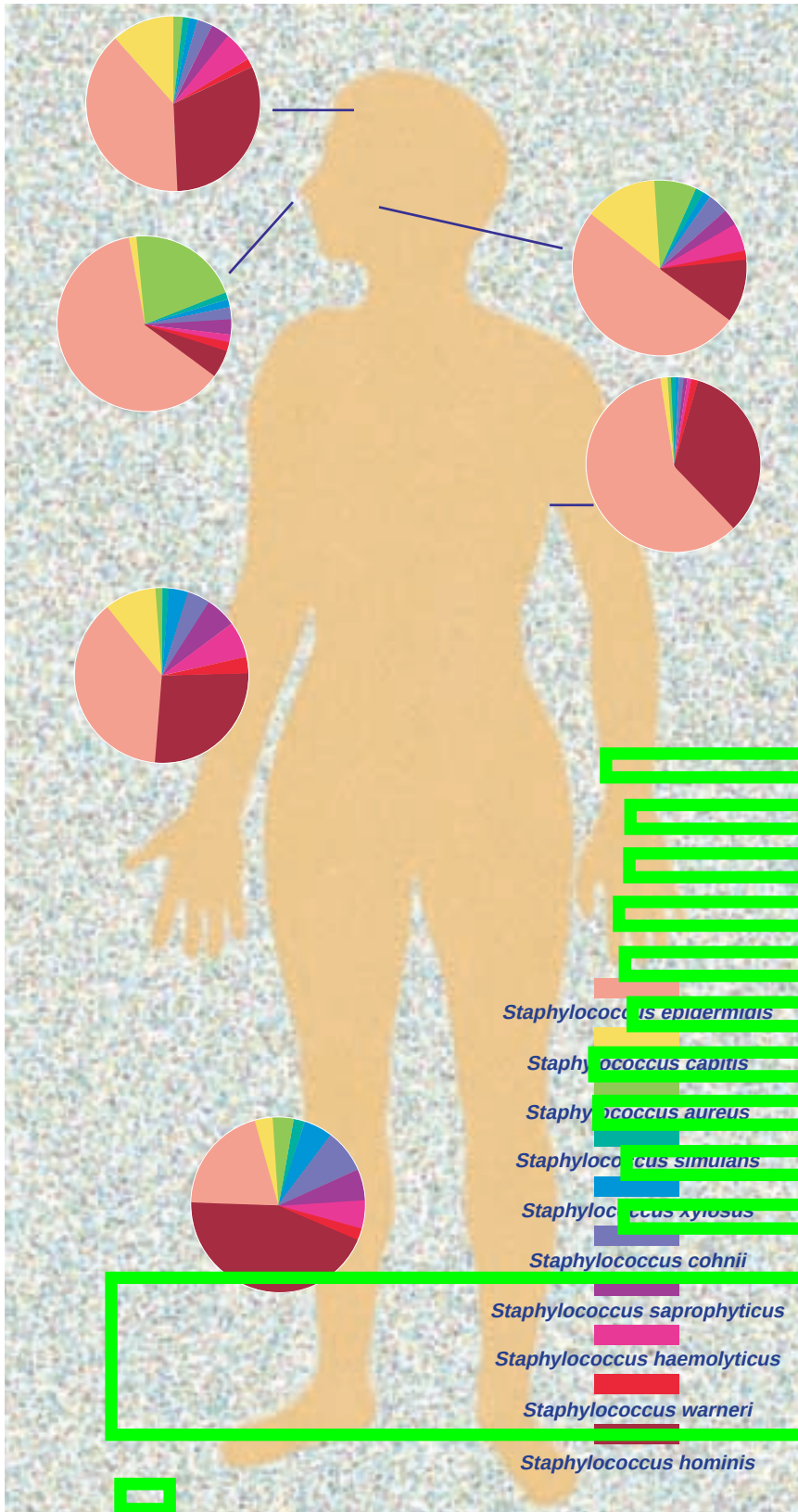
alors un des remparts contre d'autres micro-organismes qui, eux, peuvent être pathogènes. Ainsi, les tissus à activité antibactérienne ne doivent en aucun cas modifier l'équilibre fragile de la flore résidente.

Parmi les principales bactéries de la flore résidente, celles du genre *Staphylococcus* qui comptent plus de 30 espèces et dont la répartition



1. LES FIBRES À ACTIVITÉ BIOLOGIQUE luttent contre la prolifération des bactéries. Plusieurs méthodes de préparation de ces fibres ont été mises au point. On peut tremper le textile dans une solution contenant l'antibactérien, lequel adhère aux fibres (a). Toutefois, l'adhérence est médiocre, et la substance antimicrobienne ne résiste pas au lavage : cette méthode convient pour les textiles à usage unique. On améliore l'adhérence en recouvrant les fibres d'un liant, puis en ajoutant l'antibactérien (b). Le liant sert de « colle », de sorte que l'adhérence est meilleure et que le textile ainsi traité supporte plusieurs lavages. L'efficacité antimicrobienne est bonne, car la substance bactériostatique est directement en contact avec

la peau. Une autre méthode consiste à incorporer l'antibactérien dans le polymère porté à haute température ; le polymère est ensuite filé sous pression et la substance active est piégée au sein des fibres (c). Il s'agit de zéolithes, des minéraux qui libèrent progressivement de l'oxygène actif, lequel migre vers la surface et y détruit les bactéries. Les zéolithes ne sont pas éliminés par les lavages successifs. Enfin, une autre méthode est à l'étude : la substance antimicrobienne serait introduite dans des microcapsules qui adhèreraient aux fibres (d). La substance diffuserait par la membrane poreuse des microcapsules ou serait libérée lorsque cette membrane se briserait sous l'effet du frottement des vêtements sur la peau.



2. DE NOMBREUSES ESPÈCES de bactéries vivent en symbiose avec la peau de l'homme : elles trouvent dans la sueur, notamment, les éléments nutritifs nécessaires à leur multiplication et évitent que l'homme ne soit contaminé par d'autres bactéries qui, elles, risqueraient d'être pathogènes. Leur répartition varie selon les zones du corps. Celle de plusieurs souches de staphylocoques a été représentée : les secteurs angulaires de couleurs différentes représentent la proportion des espèces étudiées selon la région de l'organisme (le front, le nez, la joue, l'aisselle, le bras et la jambe).

change selon les régions de l'organisme (voir la figure 2) et les bactéries corynéformes. Parmi elles, les propionibactéries sont présentes dans les follicules pileux et dans les glandes sébacées. De nombreuses espèces bactériennes se développent et persistent sur la peau, mais leur composition et leur prolifération dépendent de facteurs propres à la physiologie de chacun ou de facteurs environnementaux. À la naissance, la flore est surtout constituée de *Staphylococcus epidermidis*. Elle se modifie rapidement dans les heures qui suivent, et les bactéries corynéformes prennent le dessus. Le sexe influe également sur la nature et sur la répartition des espèces bactériennes : la peau des hommes contient plus de micro-organismes que celle des femmes, sans doute en raison d'une production supérieure de sueur et de sébum, et de la présence des hormones mâles.

La production des odeurs corporelles

La sueur, sécrétée par les glandes sudoripares, diffuse à travers l'épiderme et l'hydratation. Elle est inodore et incolore, mais qu'elle n'est pas dégradée par les bactéries. Elle contient essentiellement de l'eau (99 pour cent), mais aussi des hormones, des sels minéraux, des anticorps, de l'acide lactique, de la vitamine C et des déchets métaboliques, tels l'acide urique ou l'urée. Sa composition dépend de l'individu et de son régime alimentaire.

Les bactéries agissent, par leurs enzymes, sur certains de ces constituants. Ainsi, les enzymes nommées réductase des bactéries corynéformes transformeraient les hormones stéroïdes (notamment la testostérone) de la sueur en cétones et en stérols nauséabonds (ils ont une odeur de musc ou d'urine). Certaines espèces de bactéries du genre *Brevibacterium* synthétisent du méthannéthiol, un composé contenant un groupe thiol, -SH, qui est à l'origine des odeurs produites par les pieds (beaucoup de composés soufrés sont nauséabonds). Le méthannéthiol résulte de la transformation de la méthionine, un acide aminé. La levure *Pityrosporum* produirait des lactones et des alcools en agissant sur le sébum du cuir chevelu.

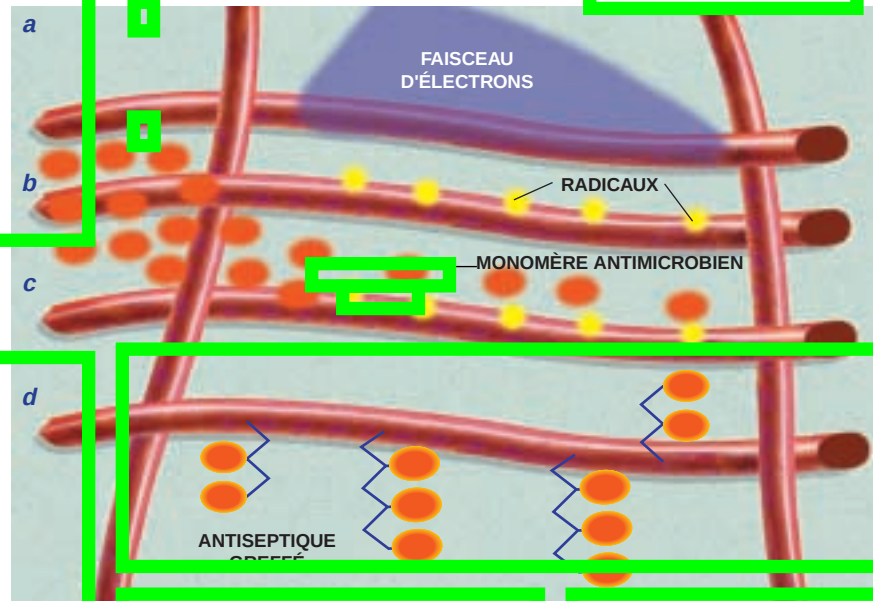
Parmi les bactéries corynéformes, *Propionibacterium acnes* existe dès l'enfance, mais se multiplie considérablement lorsque l'équilibre hormonal évolue, à la puberté ; cette souche «lipolytique» semble être le principal responsable des odeurs corporelles d'origine bactérienne : elle dissocie les acides gras (les triglycérides), libérant des acides gras nauséabonds. Les substances malodorantes les plus fréquentes sont les cétones, les aldéhydes et les lactones ; elles contiennent souvent un cycle aromatique et un groupe amine $-NH_2$, qui augmente souvent l'intensité de l'odeur des molécules odorantes.

Bactéricide ou bactériostatique ?

Quelle qu'elle soit la façon dont elles agissent, les bactéries sont partiellement responsables des mauvaises odeurs corporelles. On admet généralement que l'odeur produite par les bactéries est perceptible dès que leur concentration atteint 10 000 par centimètre carré, ce qui est obtenu en quelques heures. On peut lutter contre ces odeurs soit avec un produit bactéricide qui réduit partiellement ou complètement une population bactérienne, soit avec une substance bactériostatique, qui limite la multiplication de ces bactéries.

Nous avons indiqué, on ne peut envisager de conférer une action bactéricide ou à des textiles qui n'ont aucun contact avec la peau. C'est le cas, par exemple, des toiles de tentes, des rideaux ou, encore, de la face externe des vêtements. Au contraire, les produits en contact avec la peau et les muqueuses ne devront, en aucun cas, exercer une action bactéricide, qui perturberait la flore résidente. On cherche seulement à empêcher les bactéries de proliférer sur le tissu (effet barrière), supprimant ainsi les inconvénients liés à cette multiplication.

Les effets bactéricides et bactériostatiques exercés par un biotextile dépendent de la nature et de la concentration des molécules actives au sein du tissu. Une même molécule est parfois bactéricide, parfois bactériostatique, selon sa concentration : cette versatilité multiplie les potentialités des fibres à activité biologique. Avant d'utiliser un antibactérien, on



3. LE GREFFAGE de molécules antiseptiques sur des fibres synthétiques crée des liaisons chimiques covalentes entre l'antiseptique et les fibres, de sorte que le biotextile ainsi obtenu résiste à de nombreux lavages successifs. Pour obtenir ce greffage, on expose les fibres à un faisceau d'électrons (a) qui engendre, sur les molécules constitutives des fibres (b), des radicaux libres (c'est-à-dire des groupes chimiques très réactifs qui portent des électrons non appariés) ; deux radicaux s'associent facilement, formant des liaisons chimiques. Quand on expose ces fibres activées à des monomères antimicrobiens, ces derniers se lient aux radicaux (c), et polymérisent : les polymères antibactériens greffés s'allongent progressivement (d) et sont solidement ancrés sur les fibres textiles.

s'assurer de son innocuité : des tests *in vitro* évaluent la toxicité cellulaire et génétique, et des tests *in vivo* l'irritation et la sensibilisation de la peau à la substance.

Lorsqu'une substance est déposée sur un tissu, elle doit exercer son action sans trop diffuser, sinon elle risque d'une part, de pénétrer dans l'organisme après avoir atteint la peau et, d'autre part, d'être trop rapidement éliminée du textile lors des lavages successifs. Examinons comment on «accroche» une substance bactéricide ou bactériostatique sur des fibres textiles.

Certaines substances antimicrobiennes sont simplement déposées par impregnation ou par pulvérisation à la surface des fibres textiles auxquelles elles s'adsorbent. Les molécules antibactériennes ne sont alors pas très bien ancrées sur les fibres et ne résistent pas au lavage : un tel traitement de surface est réservé aux textiles à usage unique. On peut renforcer la tenue des substances antimicrobiennes sur les fibres en les trempant dans un apprêt, lequel fait le lien entre les fibres textiles et les molécules antimicrobiennes. De telles substances résistent un peu mieux au

lavage mais elles finissent par être éliminées. Afin d'assurer un pouvoir antibactérien de plus longue durée, on incorpore les substances actives au sein même des fibres.

On utilise des fibres artificielles, notamment de polyester, de polyamide, de polychlorure de vinyle ou encore le polypropylène. On mélange l'antibactérien au polymère textile liquide fondu ou en solution, avant de le filer sous pression. Les molécules sont noyées dans le polymère et sont piégées et, par conséquent, résistent aux lavages.

Une autre méthode, celle du greffage radical chimique (voir la figure 3), assure une liaison solide entre les molécules antibactériennes et les fibres, qui sont soit des fibres naturelles, soit des fibres synthétiques. Enfin, on peut introduire les molécules antibactériennes dans des microcapsules, et plonger les fibres dans une solution contenant ces microcapsules. Ces dernières adhèrent aux fibres et libèrent progressivement les molécules actives, parce que leur paroi est poreuse ou bien parce qu'elles éclatent sous l'effet du frottement du textile sur la peau. Cette méthode de «microencapsulation» est en cours d'évaluation.

Afin de s'assurer que la substance ne diffuse pas trop rapidement, on effectue, *in vitro*, des extractions de l'agent actif par diverses solutions de «sueurs artificielles» alcalines, acides ou grasses qui reproduisent les conditions normales d'utilisation. Après ces extractions, on dose l'agent antimicrobien restant. Reste ensuite à choisir l'agent antimicrobien le mieux adapté.

On sait que la présence continue d'agents antimicrobiens, qui détruisent la flore résidente sensible, favorise la multiplication des souches résistantes : quand elles sont débarrassées de bactéries sensibles, les bactéries résistantes n'ont plus de frein à leur multiplication et envahissent le territoire laissé vacant par l'élimination des bactéries avec lesquelles elles étaient en compétition.

Étant donné ces contraintes, le tissu antibactérien idéal devrait être actif sur de nombreux micro-organismes, notamment sur les bactéries et sur les champignons microscopiques ; être actif pendant toute la durée de vie du textile, même après de nombreux lavages ; être actif à

faible concentration ; être dépourvu de toxicité chez l'homme aux concentrations utilisées ; ne pas sélectionner de souches résistantes. De surcroît, les contraintes économiques imposent que son coût soit peu élevé, que la substance soit dépourvue d'odeur et de couleur, qu'elle soit d'application aisée, qu'elle soit compatible avec les agents imperméabilisants, ignifugeants et avec les teintures, ou encore qu'elle soit résistante aux rayonnements ultraviolets. Aujourd'hui, aucun produit ne répond à toutes ces exigences. Parmi les substances qui ont été testées, seul le triclosan et les zéolithes antibactériennes sont fréquemment utilisés.

Le triclosan

Le triclosan (2, 4, 4'-trichloro-2'-hydroxydiphényl éther) est un composé phénolique qui a des propriétés antibactériennes et anti-inflammatoires. Il est utilisé dans des produits tels que des savons antiseptiques, des dentifrices, des crèmes de beauté. Dans le cas de son utilisation sur des tissus, il

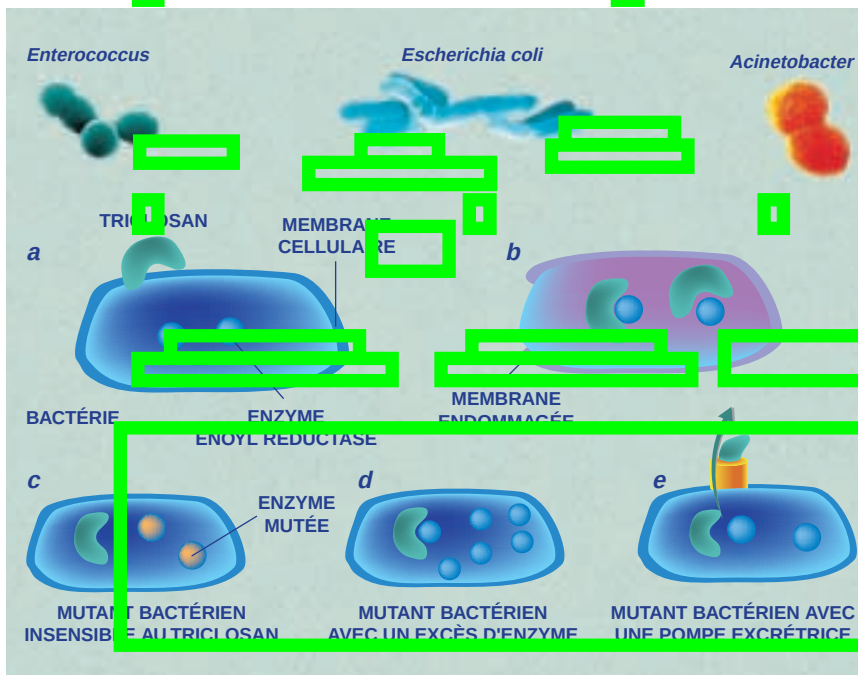
diffuse quel que soit le mode de fixation textile. Le triclosan a un large spectre d'action sur de nombreuses bactéries, qu'elles soient résistantes ou non aux antibiotiques. Son efficacité a été démontrée, en 1984, au Royal Hospital de Liverpool, par l'éradication d'une épidémie due à des souches de *Staphylococcus aureus* résistantes, présentes dans une unité de chirurgie.

Comment agit-il ? Jusqu'à présent, on pensait que le triclosan était un agent bactéricide non spécifique. L'équipe de Laura McMurry, à la Faculté de médecine de Boston, a montré récemment que la cible du triclosan chez *Escherichia coli* est une enzyme de la biosynthèse des lipides, l'énoyl réductase (en anglais, le nom complet est *enoyl-acyl carrier protein reductase*). Lorsque l'enzyme est bloquée, la bactérie ne synthétise plus de lipides et cesse de se développer.

Des études réalisées par les Laboratoires Ciba-Geigy ont montré que, dans les conditions normales d'utilisation, le triclosan ne présente pas de toxicité aiguë ni de toxicité chronique, ou d'irritation de la peau ou des yeux. Il ne déclenche pas, non plus, de phénomène de sensibilisation et n'a aucune activité cancérogène ou mutagène. Il ne s'accumule pas dans l'organisme et il est bien toléré par l'homme.

Toutefois, certains mutants bactériens résistent au triclosan : quelques-uns produisent une enzyme insensible au triclosan. D'autres présentent une anomalie génétique qui entraîne une surexpression du gène codant l'énoyl réductase : l'antiseptique inactive une partie de cette enzyme vitale pour les bactéries, mais, si la production est supérieure à la normale, il «s'épuise», tandis que les bactéries continuent à se multiplier, de sorte qu'elles échappent à l'action du triclosan.

Les bactéries disposent de divers mécanismes leur permettant d'échapper aux substances antiseptiques ou antibiotiques avec lesquelles on tente de les détruire. Elles sont notamment pourvues de pompes, des protéines qui rejettent vers l'extérieur les molécules étrangères nocives pour le métabolisme bactérien. Certaines bactéries surexpriment ces protéines, de sorte que le triclosan est éliminé avant d'avoir agi : ces bactéries, notamment



4. LE TRICLOSAN est un antiseptique antibactérien. Il agit sur diverses espèces bactériennes (*en haut*) en inhibant une enzyme bactérienne, l'énoyl réductase, indispensable à la synthèse des lipides de la membrane bactérienne (*a*). Privées de membrane, les bactéries meurent (*b*). Certaines souches sont résistantes. Quelques mutants bactériens produisent une enzyme énoyl réductase insensible au triclosan (*c*). D'autres synthétisent une quantité anormalement élevée de l'enzyme : le triclosan inhibe une petite proportion de ces molécules, mais il en reste assez pour que les bactéries survivent (*d*). Enfin, quelques bactéries sont pourvues d'une «pompe moléculaire» qui excrète hors de la cellule les molécules étrangères (*e*), dont le triclosan, lequel perd son efficacité.

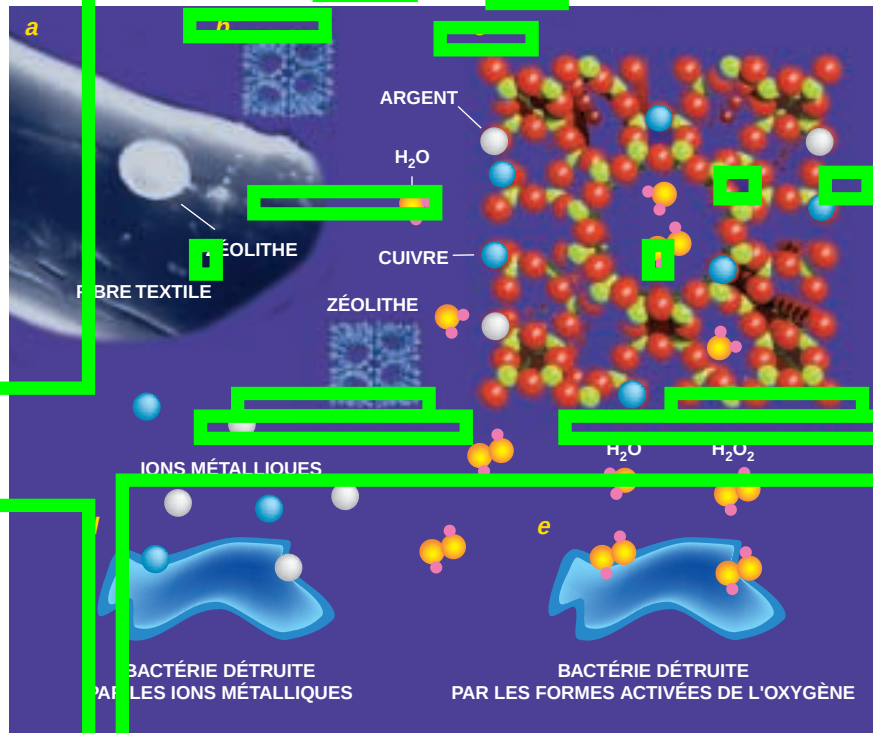
certaines souches cliniques d'*Escherichia coli*, résistent à l'antiseptique. En 1998, Herbert Schweizer et ses collègues de l'Université de Fort Collins, dans le Colorado, ont montré que les bactéries de l'espèce *Pseudomonas aeruginosa* sont pourvues de telles pompes, qui les protègent du triclosan.

Le triclosan étant très utilisé dans les produits destinés au grand public et en milieu hospitalier, des risques de multiplication des souches résistantes existent. À force d'être confrontées à la molécule, les souches qui, par exemple, acquièrent une mutation génétique associée à une surexpression de la pompe de purification risquent d'être sélectionnées : elles seront résistantes au triclosan, et peut-être aussi à d'autres molécules antiseptiques et antibiotiques transportées par cette même pompe.

Les zéolithes antibactériennes

L'autre grande famille des substances antibactériennes que l'on introduit dans les textiles à activité biologique est celle des zéolithes. Ce sont des aluminosilicates alcalins naturels ou synthétiques, qui ont une structure très poreuse (deux représentations en b et c). Les molécules d'eau s'infiltrent facilement dans les microcanaux. Des ions cuivre et argent sont introduits dans les zéolithes antibactériennes. Elles détruisent les bactéries par deux mécanismes. D'une part, des ions métalliques (cuivre et argent) se détachent des cristaux et migrent au contact de la peau, comme de nombreux métaux, ils ont une action destructrice directe. D'autre part, les zéolithes créent, au sein du réseau cristallin, des micropiles, des différences de potentiel qui, localement, sont suffisantes pour qu'une électrolyse de l'eau ait lieu. Des formes actives de l'oxygène (H_2O_2 , par exemple) sont produites : elles oxydent et détruisent les membranes bactériennes.

Les ions argent et cuivre ou argent et zinc ont une action antiseptique sur la membrane des bactéries en bloquant les groupes thiol des protéines. Toutefois, le principal mécanisme d'action de ces substances semble être la formation de radicaux oxygène en présence d'eau. Les ions métalliques créent des différences de potentiel qui, localement, sont suffisantes pour réaliser des micro-électrolyses de l'eau et libérer de l'oxygène, lequel se combine à l'eau et produit du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Dominique Champiat, à Montpellier, a montré, par une méthode de biochimiluminescence, que des fibres contenant des zéolithes libèrent de l'oxygène actif en milieu aqueux pendant près de 14 heures. L'oxygène libéré oxyde et peut détériorer les différents éléments constitutifs des bactéries.



5. LES ZÉOLITHES incorporées dans les fibres biotextiles sont présentes au cœur des fibres, mais aussi en surface (a). Ce sont des minéraux des aluminosilicates alcalins naturels ou synthétiques, qui ont une structure très poreuse (deux représentations en b et c). Les molécules d'eau s'infiltrent facilement dans les microcanaux. Des ions cuivre et argent sont introduits dans les zéolithes antibactériennes. Elles détruisent les bactéries par deux mécanismes. D'une part, des ions métalliques (cuivre et argent) se détachent des cristaux et migrent au contact de la peau, comme de nombreux métaux, ils ont une action destructrice directe. D'autre part, les zéolithes créent, au sein du réseau cristallin, des micropiles, des différences de potentiel qui, localement, sont suffisantes pour qu'une électrolyse de l'eau ait lieu. Des formes actives de l'oxygène (H_2O_2 , par exemple) sont produites : elles oxydent et détruisent les membranes bactériennes.

Les ions argent et cuivre ou argent et zinc ont une action antiseptique sur la membrane des bactéries en bloquant les groupes thiol des protéines. Toutefois, le principal mécanisme d'action de ces substances semble être la formation de radicaux oxygène en présence d'eau. Les ions métalliques créent des différences de potentiel qui, localement, sont suffisantes pour réaliser des micro-électrolyses de l'eau et libérer de l'oxygène, lequel se combine à l'eau et produit du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Dominique Champiat, à Montpellier, a montré, par une méthode de biochimiluminescence, que des fibres contenant des zéolithes libèrent de l'oxygène actif en milieu aqueux pendant près de 14 heures. L'oxygène libéré oxyde et peut détériorer les différents éléments constitutifs des bactéries.

Ce mécanisme d'action ne nécessite pas de contact direct entre les molécules actives et leurs cibles bactériennes, puisque l'oxygène libéré

au sein des fibres diffuse partout, notamment, vers la surface. Les bactéries ne sont pas exposées en permanence à l'oxygène et elles ne semblent pas disposer de mécanismes leur permettant d'échapper à l'action de l'oxygène : dans ces conditions, l'usage des zéolithes ne semble pas risquer de faciliter la sélection de souches bactériennes résistantes. Aux concentrations habituelles d'utilisation, les zéolithes ne sont pas toxiques. Par ailleurs, elles résistent aux lavages à haute température, de sorte que les propriétés antibactériennes persistent longtemps.

Evaluation du pouvoir antibactérien

Diverses méthodes d'évaluation de l'activité biologique de ces textiles ont été validées. Pour étudier la capacité d'inhibition microbienne des produits diffusants, par exemple, on place un fragment de tissu à la surface d'un

milieu de culture préalablementensemencé 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 BÉNAUD, maître de conférences au département de génie biologique de l'UT A, mène ses recherches à la Faculté de Pharmacie Rockefeller (DM3), à Lyon. Jean FRENEY est professeur de microbiologie à l'hôpital Édouard-Berriot, à Lyon.

J. FRENEY, *Composés phénoliques*, in *Antiseptie 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 *Hygiène*, 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 drug resistance*, in *Antimicrob.*

Agents Chemother, vol. 42, pp. 394-398, 1998.

L.M. McMEIKEN et al., *Triclosan targets lipid synthesis*, in *Nature*, vol. 354, 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 1400 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

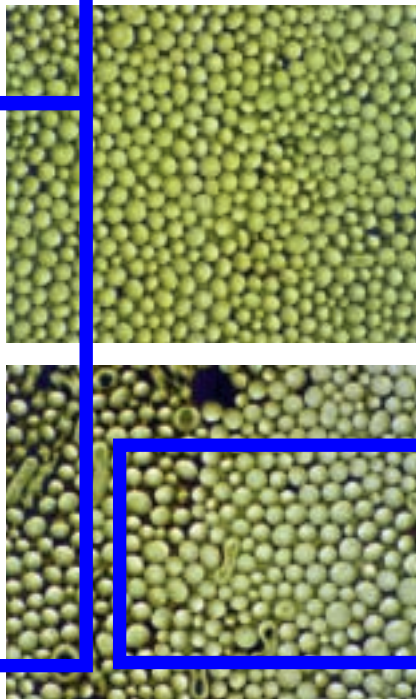
protéine pure, la kératine (comme nos cheveux et nos ongles).

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 discontinues 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 chèvres ont au 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 chèvres 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).

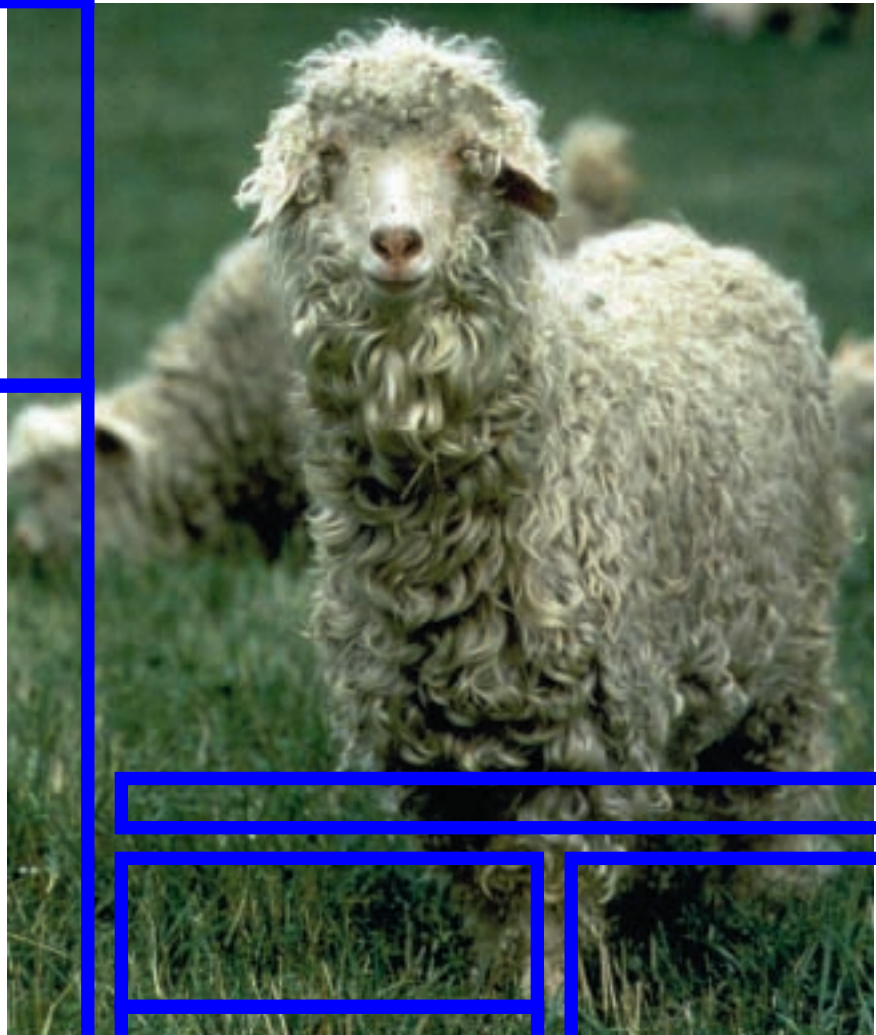
fibres colorées, les fibres médullées et les poussières ont été éliminées.

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 les 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 ANGORA 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 récolté 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 mohair utilisés par l'industrie textile rend ce programme d'amélioration unique. Il concerne une petite mère 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 • MARCO KENNER

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'annoblissement, 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 étudions, 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 ?

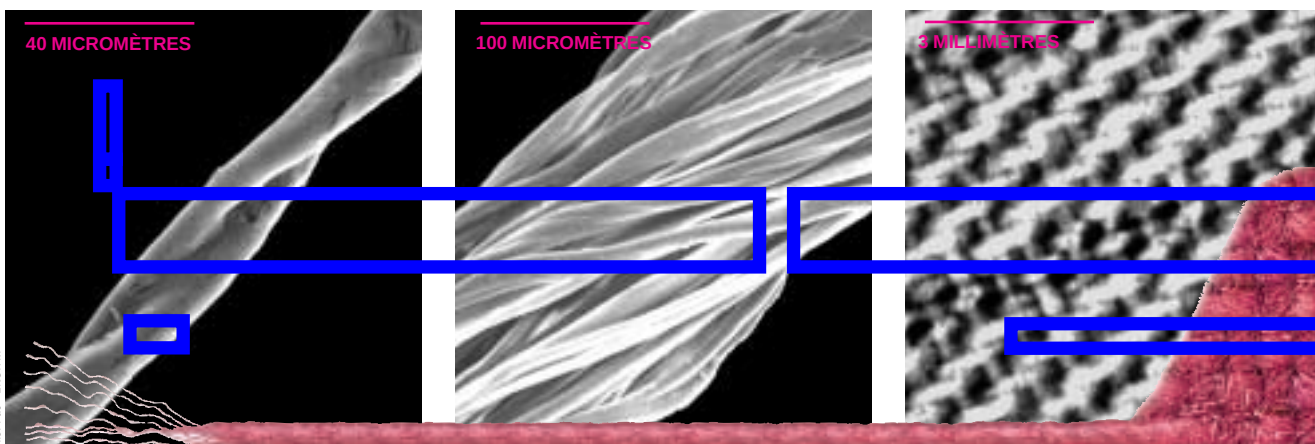
La peau contient des récepteurs du toucher que l'on trouve également sur tout le corps, mais nous n'avons étudié que la pulpe des doigts, où ils sont plus nombreux et plus souvent sollicités. La plupart des récepteurs sensoriels sont formés par l'extrémité d'une ramification d'un neurone, enveloppée 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.

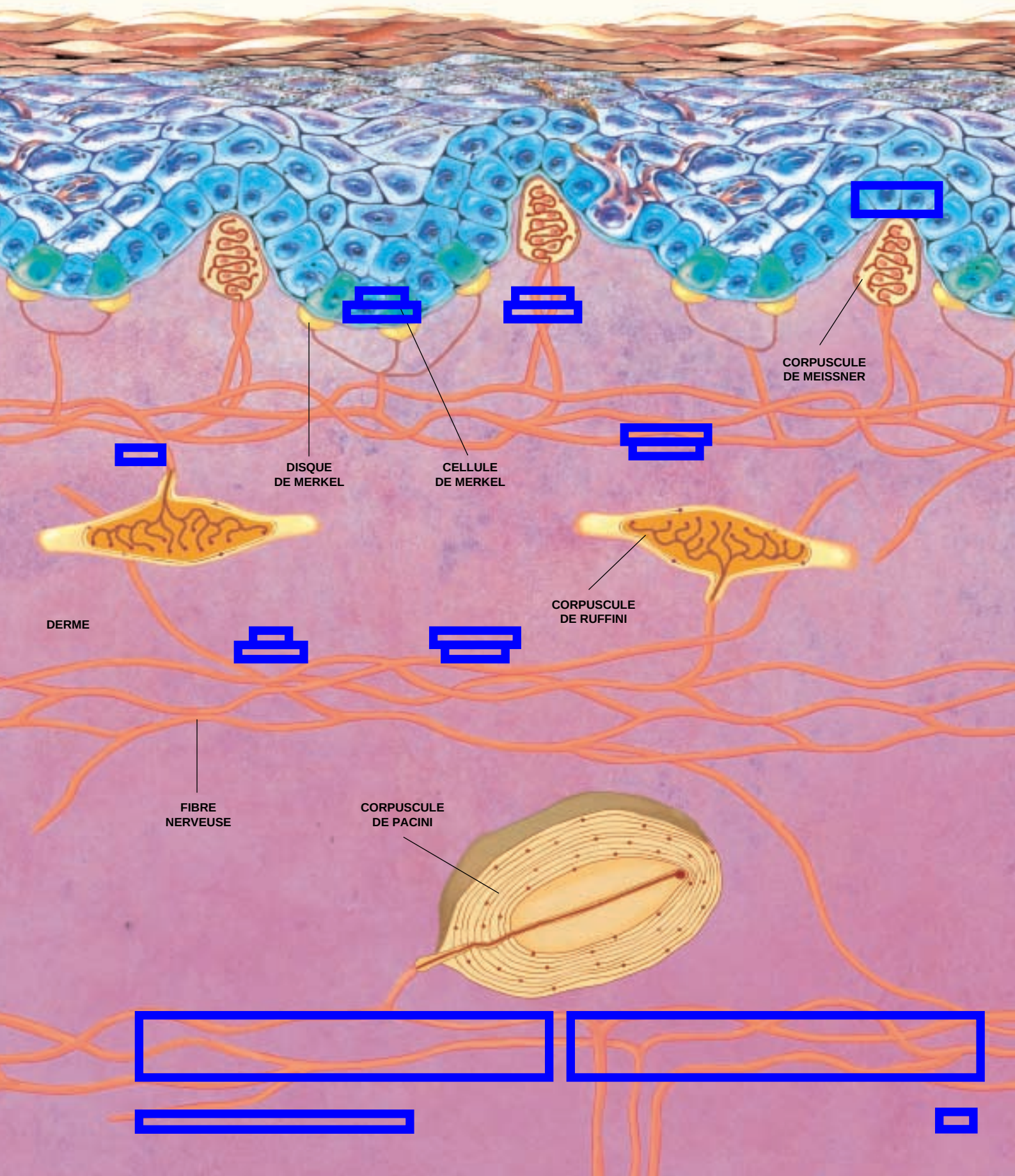
Outre leur profondeur dans la peau, leur taille, la superficie de leur zone de réception, etc., ces quatre types de récepteurs se distinguent par leur temps d'adaptation, c'est-à-dire leur temps de réaction aux stimulus.

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 du 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 pascales, soit deux milligrammes par millimètre carré, c'est-à-dire l'équivalent de 20 centimètres carrés de papier posés 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'inscription 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	Lente	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 de la zone des 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. Il est donc possible que, lorsque celle-ci est supérieure à 0,25 millimètre ; lorsqu'elle est inférieure, la sensation est identique que nous soyons énervés ou calmes !

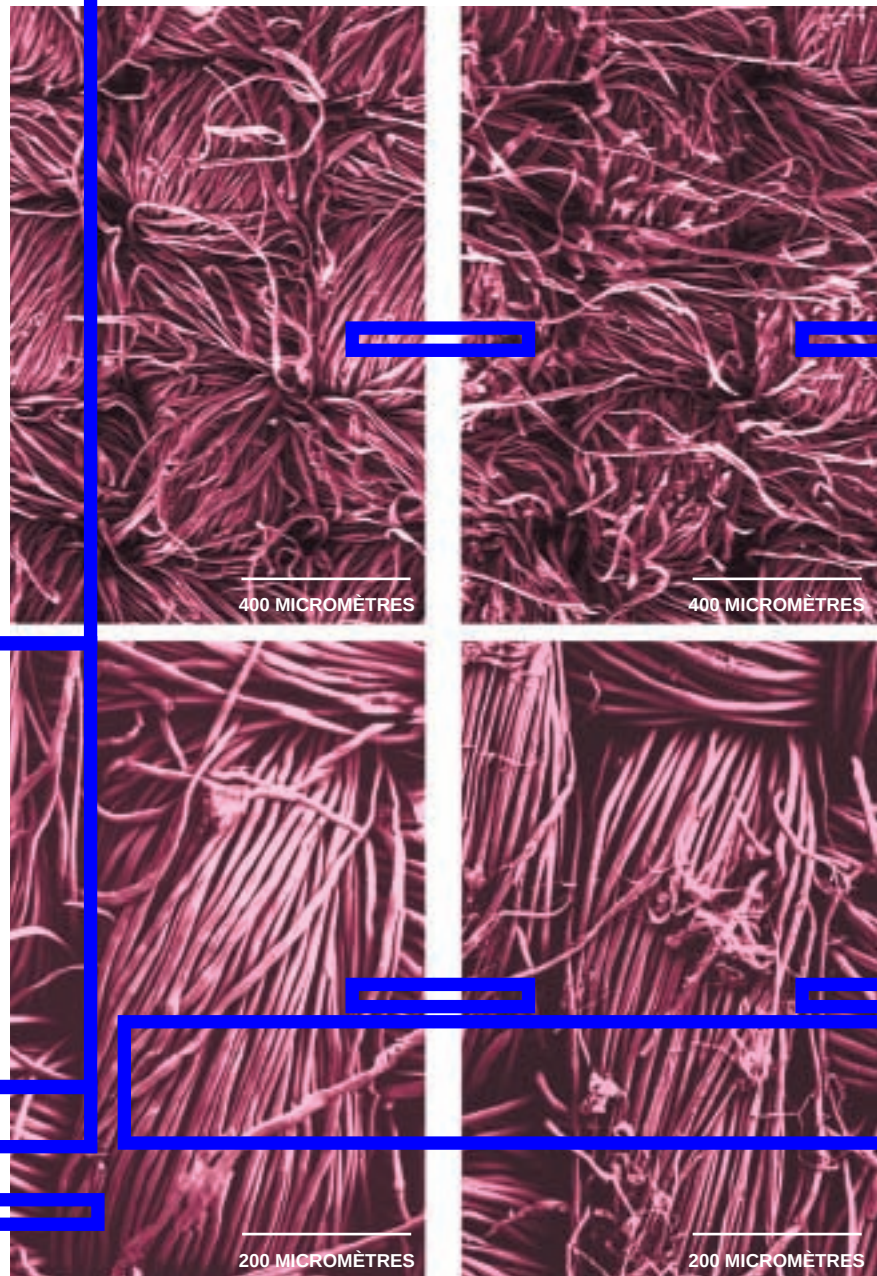
En influençant l'élasticité de la peau, la température modifie la rugosité

perçue. Quand la température est inférieure à 32 degrés, une surface lisse semble en fait 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.

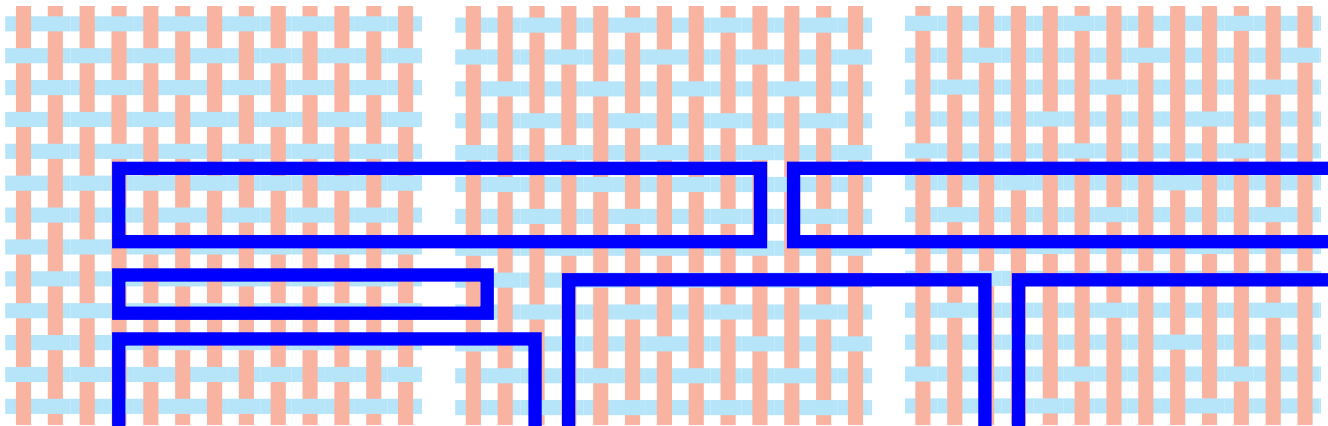
Comment les forces de frottement, que nous avons jusqu'à présent négligées, interviennent-elles ? Le frottement entre deux surfaces, par exemple entre une main et une étoffe, dépend de la

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 plane, 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 poai sa douceur et son pouvoir isolant. L'abrasion, nommée émerisage, avec un papier d'emerl est fréquemment utilisée pour les tissus de jeans de couleur (voir la figure 4).

Ces deux techniques peuvent être combinées. 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

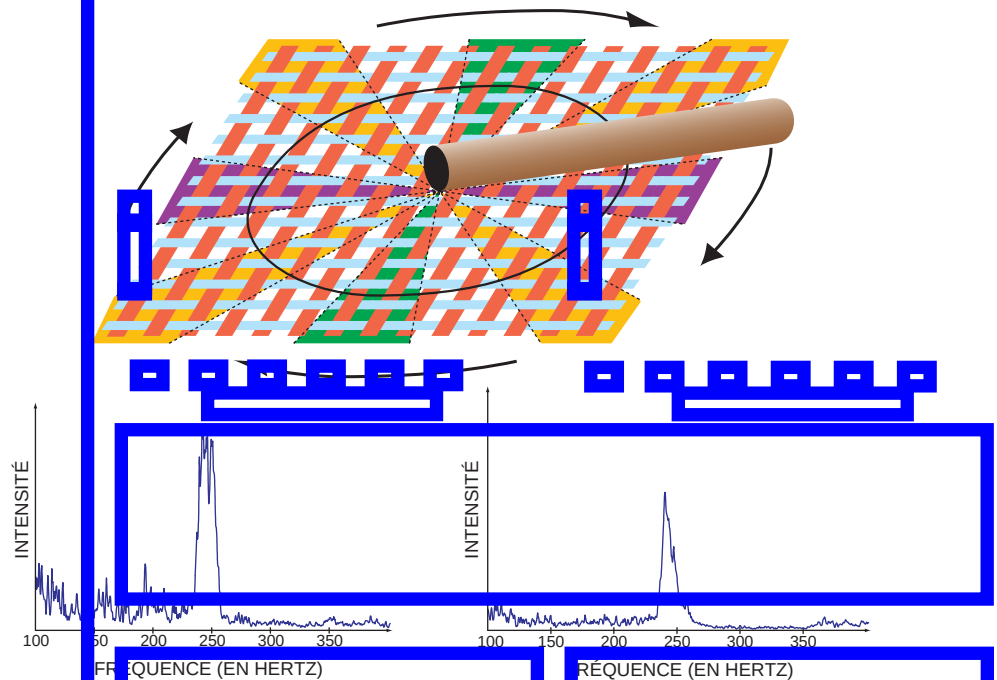
diamètre devient la hauteur des aspérités et détermine l'amplitude des vibrations. Il est inutile d'en obtenir plus ! Cette pilosité existe dans les étoffes de microfibres dont on a « usé » la surface avec un papier d'émeri.

Par ailleurs, à une fréquence de 300 hertz, la main perçoit des aspérités de moins de 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 centimes de normes 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 et 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 : nature 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 RENNERT est directeur de l'École nationale supérieure des industries textiles de Mulhouse.

La confection de tissus vivants

ROBERT LANGER • JOSEPH VACCARO

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.

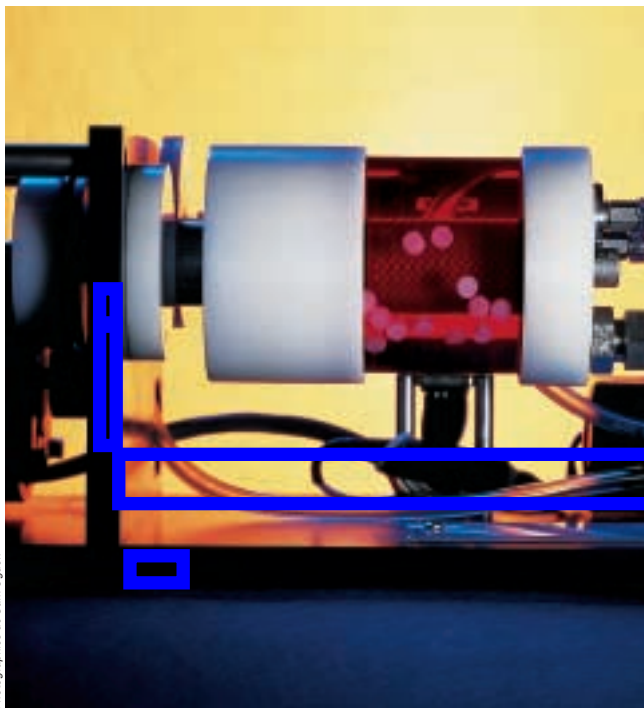
Aujourd'hui, des expériences variées ont démontré que l'on peut fabriquer des tissus artificiels, mais la recherche devra résoudre bien des problèmes avant que des chirurgiens ne greffent des organes artificiels fonctionnels à des patients.

Des cellules en stock

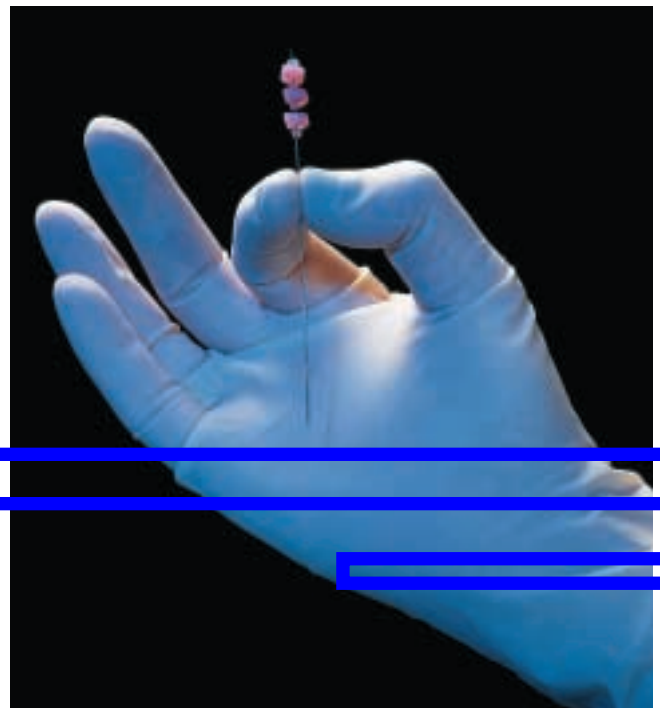
Le premier obstacle est celui de l'approvisionnement en cellules vivantes. On pourrait utiliser des cellules animales, mais on doute encore de leur parfaite innocuité et de leur acceptabilité par le système immunitaire du receveur. De ce fait, les biologistes préfèrent utiliser des cellules humaines.

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 sera 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 tissu 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).

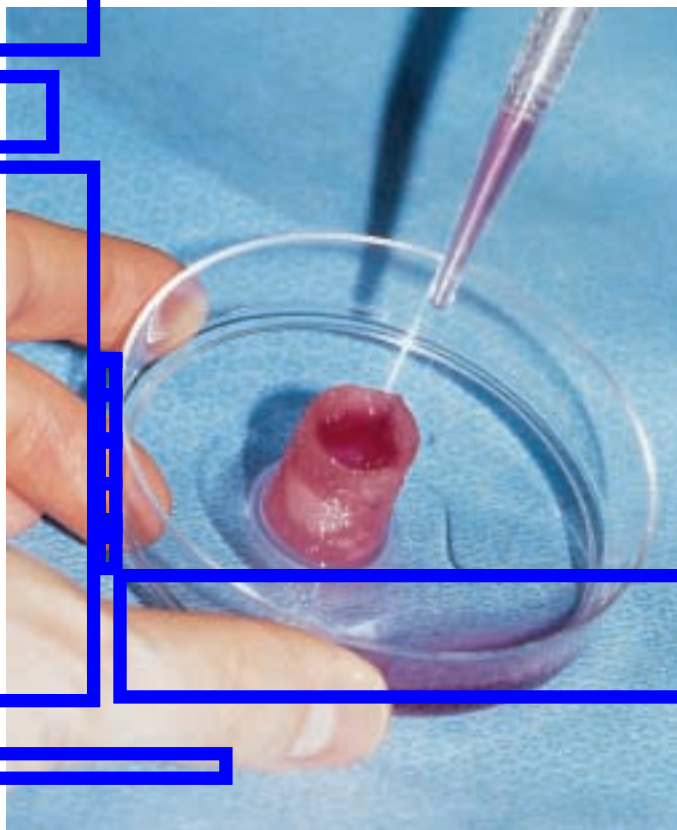
Les bioréacteurs semblent optimiser les propriétés mécaniques des tissus. Ainsi, de nombreux tissus se remodelent ou se réorganisent lorsqu'ils sont étirés ou comprimés : le cartilage s'allonge et s'enrichit en collagène et autres protéines qui forment une matrice extracellulaire, quand il est cultivé 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

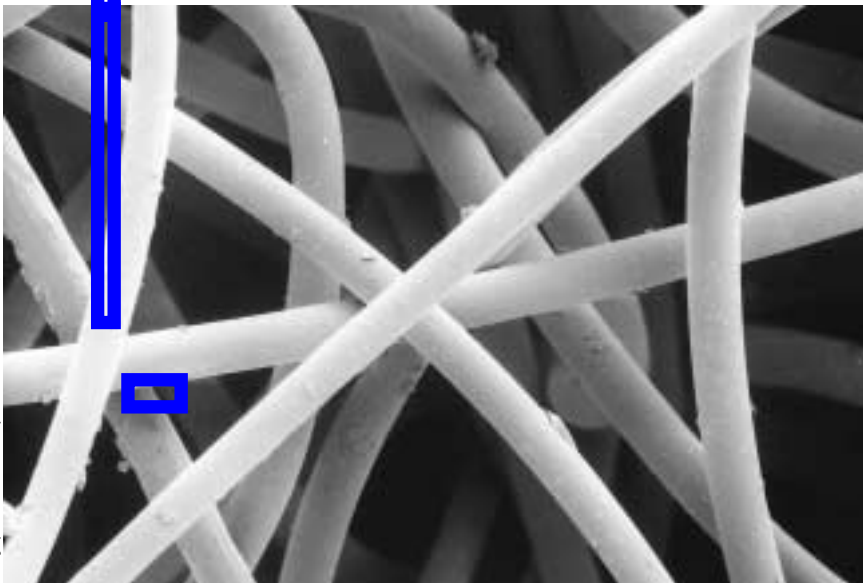
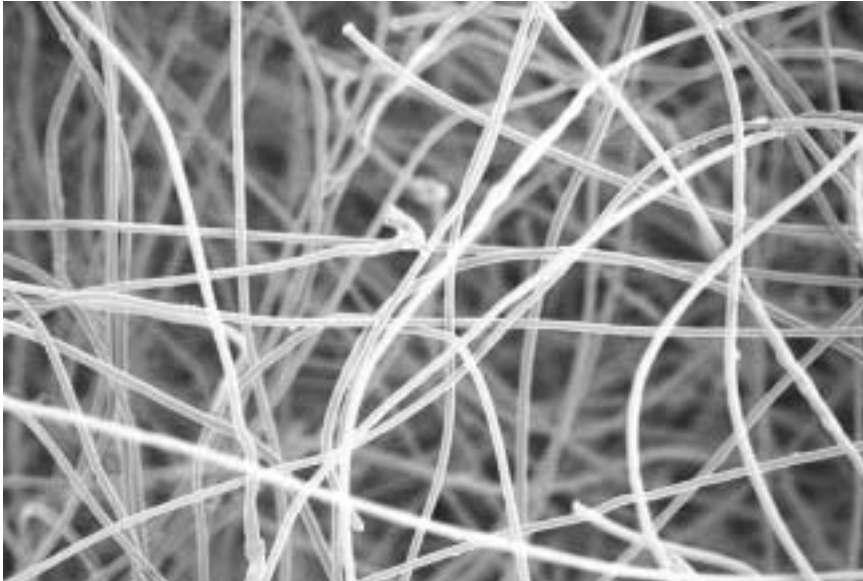
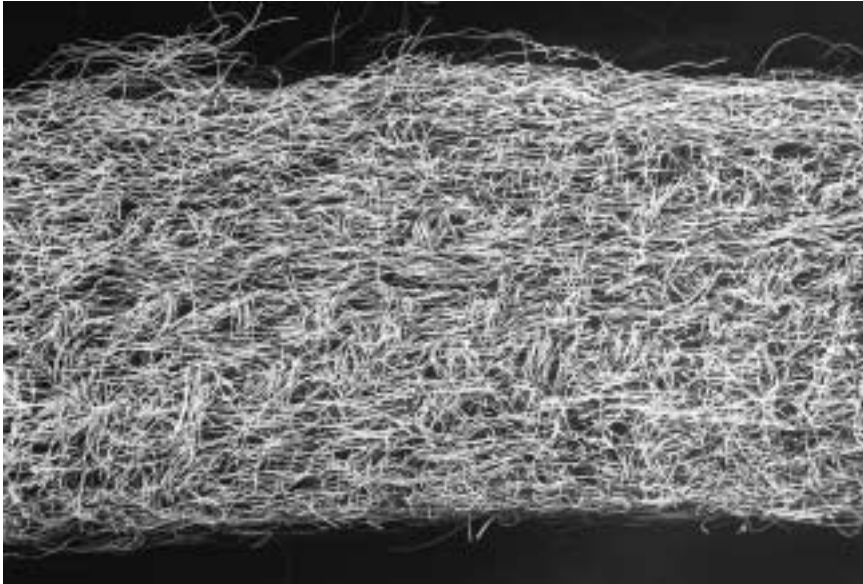
engendrées par les battements cardiaques. Enfin, plusieurs équipes mettent au point des méthodes pour fabriquer des muscles striés et des muscles cardiaques, c'est-à-dire des tissus qui résistent aux stress physiques.

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.



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 RESEAUX DE POLYMERES biodégradable (photographies, 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 angiogénèse, dans ces organes. Des biologistes ont déjà réussi à stimuler l'angiogénèse de tissus artificiels en recouvrant 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 utilisés 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 and Technology*, 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. SULLIVAN, *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 suit 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 gras sous-cutané qui contient des adipocytes (les cellules qui stockent les graisses). L'épiderme est constitué de 90 pour cent de kératinocytes, des 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

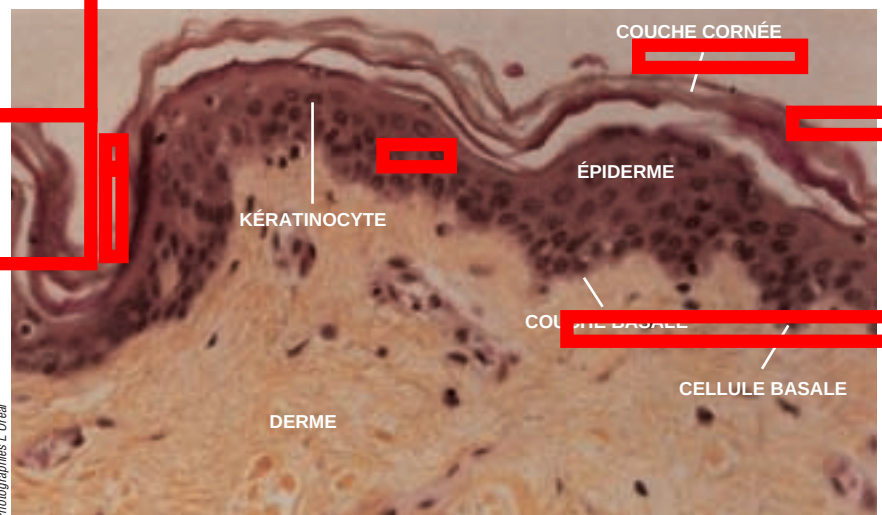
l'environnement. L'épiderme contient trois autres types de cellules : les mélanocytes produisent un pigment, la mélanine, qui détermine la couleur de la peau et protège contre les rayonnements du soleil ; les cellules de Langerhans, des sentinelles immunitaires, capturent les substances étrangères et les transportent jusqu'aux lymphocytes 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

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 reconstruite

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



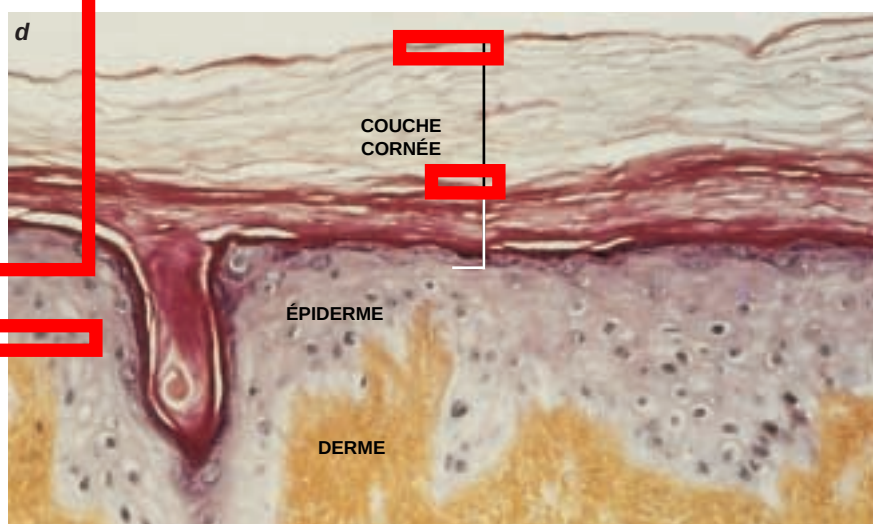
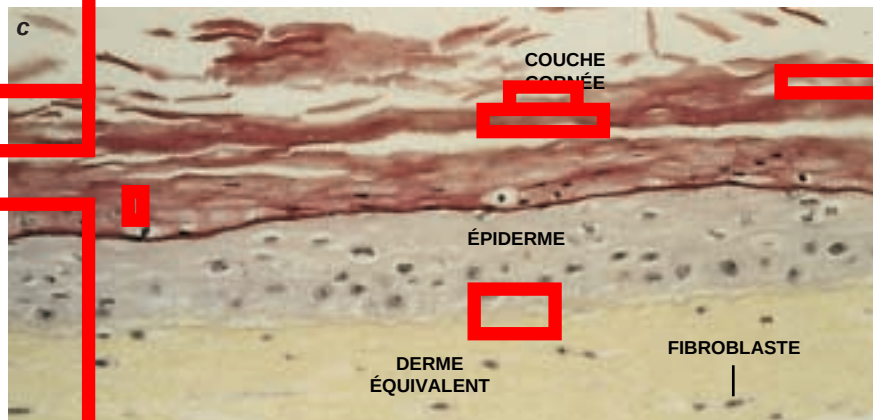
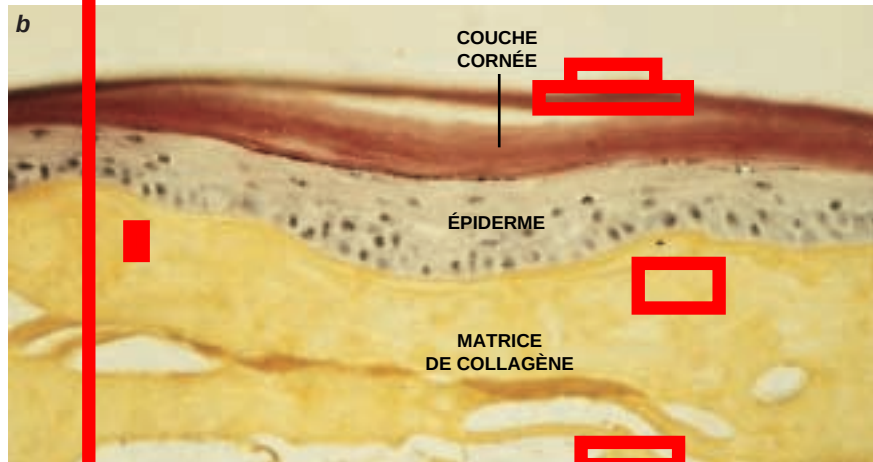
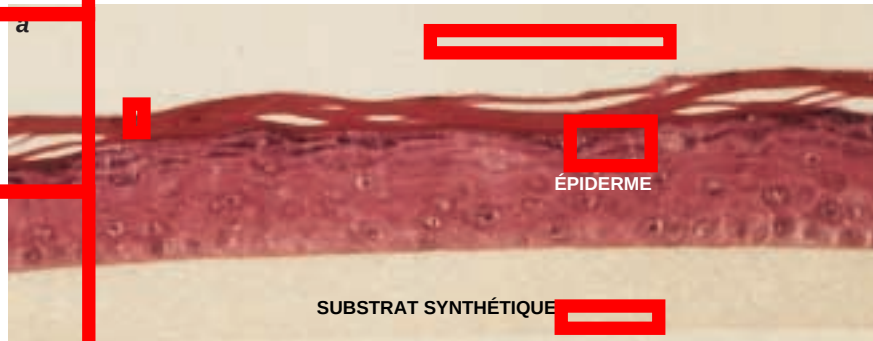
Photographies L'Oréal

carrés prélevée sur une zone indemne, on obtient un mètre carré d'épiderme de culture (par fragments carrés de 20 centimètres de côté environ). Ces lambeaux d'épiderme, produits à l'échelle industrielle dans des conditions maximales de sécurité et de stérilité, sont utilisés par les centres de grands brûlés.

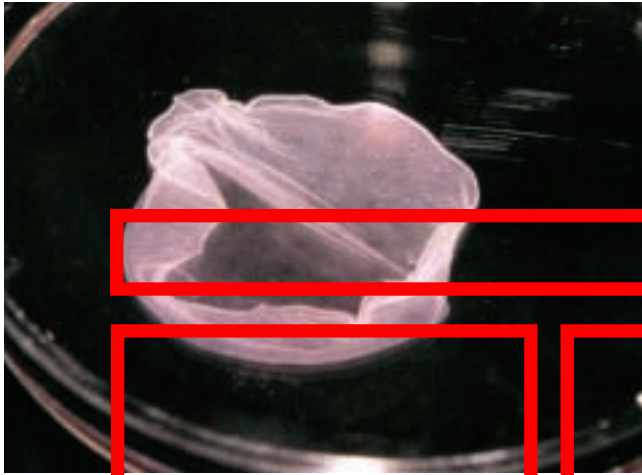
Outre son intérêt dans ces applications médicales, ce modèle de culture reste utilisé dans les laboratoires pour l'étude de la toxicité de diverses substances appliquées sur la peau et de leurs métabolites.

Toutefois, cet épiderme est incomplet, puisqu'il est, notamment, dépourvu de couche cornée. En 1979, Michel Premieras et ses collègues des laboratoires L'Oréal ont préparé des épidermes reconstruits sur la membrane basale d'un derme humain : on utilise un derme privé de fibroblastes, de sorte que les cellules épidermiques, retrouvant leur substrat naturel, y adhèrent et se multiplient. En fait, les kératinocytes prolifèrent sur de nombreux substrats, à condition qu'ils y adhèrent. En outre, la culture est placée sur une grille, à la surface du milieu nutritif enrichi en substances nécessaires à la croissance cellulaire et au contact de l'air. L'épiderme obtenu est constitué d'une couche basale correctement orientée, de plusieurs couches qui ont les caractéristiques de l'épiderme normal et, en surface, d'une couche cornée compacte. La couche cornée ne se développe que si la face supérieure de la culture d'épiderme est exposée à l'air.

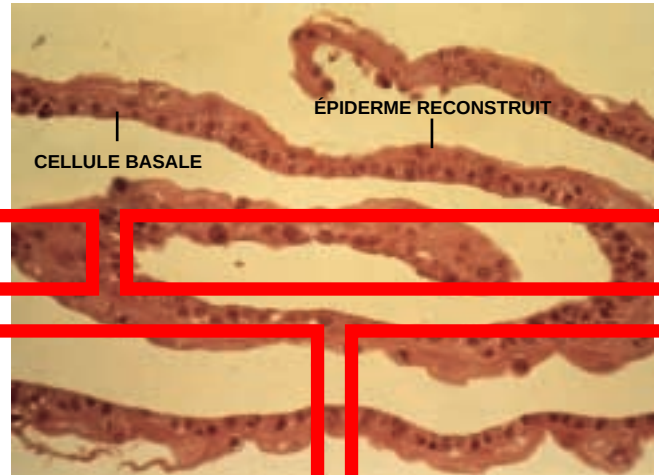
Ainsi on dispose de modèles constitués des principales cellules de



1. LES MODÈLES DE PEAU ont été progressivement améliorés. Un des modèles contient un épiderme sur un film de collagène qui repose sur un substrat synthétique (a). Dans un autre (b), l'épiderme repose sur une matrice épaisse de collagène, dépourvue de fibroblastes (les cellules du derme). Dans un troisième modèle (c), l'épiderme se développe sur un derme équivalent contenant des fibroblastes vivants. Enfin, dans un autre modèle mis au point par les laboratoires L'Oréal (d), les kératinocytes se développent sur un derme humain dont on a détruit les fibroblastes : les cellules se développent correctement, même en l'absence de fibroblastes. L'aspect de ce dernier épiderme est proche de celui d'une peau normale (ci-contre, à gauche). On distingue le derme, la couche basale, l'épiderme et la couche cornée. Tous les éléments essentiels de la peau sont présents.



2. UN LAMBEAU D'ÉPIDERME (à gauche) reconstruit ressemble à un voile mince. Ici, il s'est détaché du milieu de culture (en noir). Quand on fait une coupe de ce lambeau selon l'épaisseur et que l'on colore



les cellules, on observe (à droite) une couche basale et des kératinocytes partiellement différenciés. En revanche, ce substitut de peau, l'un des premiers réalisés, est dépourvu de couche cornée et de derme.

l'épiderme. Ces cellules sont vivantes, puisqu'elles se multiplient, se différencient et migrent correctement de la couche basale à la couche cornée. Elles ont le même comportement que les kératinocytes de la peau.

Sur des coupes de tels épidermes, on peut observer la différenciation des cellules de l'épiderme et, notamment, comment les kératinocytes prolifératifs deviennent des cornéocytes dépourvus de noyau ; on étudie l'action des modulateurs de la différenciation des kératinocytes, telles la vitamine C, la vitamine D et les substances contenant de l'acide rétinolique, en faisant varier leur concentration dans le milieu de culture.

Cette peau reconstruite, bien qu'imparfaite, imite la peau *in vivo*. On dépose sur l'épiderme reconstruit les substances à analyser et on suit leur pénétration dans le tissu de culture. Ainsi, on a montré, sur de tels modèles, que l'acide rétinolique agit sur la prolifération et sur la différenciation des kératinocytes. Quand on l'applique sur un substitut de peau, il accélère la prolifération des kératinocytes et perturbe leur différenciation.

Pour évaluer l'efficacité des écrans solaires, on compare le comportement des kératinocytes, des fibroblastes et du collagène de plusieurs échantillons de substitut de peau sur lesquels on applique ces écrans et que l'on expose au même rayonnement : les mieux protégés présentent le moins de lésions cellulaires, et l'on en déduit lequel des écrans solaires est le plus efficace.

Aujourd'hui, des modèles d'épiderme reconstruits sont disponibles sous forme de kits, largement utilisés par certaines sociétés cosmétiques ou pharmaceutiques, pour étudier la toxicité, la tolérance et l'efficacité de nouveaux produits ; on évalue leur action sur cette peau biosynthétique, au lieu de l'étudier sur des animaux.

Ces modèles d'épidermes reconstruits sont en cours de validation par plusieurs équipes internationales : ils remplacent les modèles animaux, devenant une nouvelle méthode d'évaluation des réactions de la peau aux molécules étudiées.

Les épidermes pigmentés

Progressivement les épidermes reconstruits ont été améliorés, notamment avec l'introduction d'un deuxième type de cellule : les mélanocytes. Extraits de l'épiderme humain normal, les mélanocytes sont cultivés et multipliés *in vitro*. Mélangés aux kératinocytes dans un rapport identique à celui de l'épiderme normal (dix kératinocytes pour un mélanocyte), les cellules sont ensemencées sur un substrat dermique, afin de former un épiderme reconstruit pigmenté. Dans ces épidermes, les mélanocytes sont localisés dans la couche basale, comme ils le sont *in vivo*. Ils transfèrent leur pigment aux kératinocytes par l'intermédiaire de leurs dendrites, de longs prolongements qui leur permettent d'atteindre des couches cellulaires éloignées et d'être en contact avec de très nombreuses cellules de l'épiderme.

Ces épidermes reconstruits pigmentés couvrent un vaste champ de recherches : celui de l'activité des modulateurs de la mélanogenèse : on observe et on quantifie les effets éclaircissants ou pigmentants de molécules appliquées sur la peau ; on évalue l'effet des rayonnements ultraviolets sur ces épidermes reconstruits pigmentés. On a réussi à reproduire les différents phototypes cutanés, c'est-à-dire les différents types de peau et étudié l'effet protecteur du bronzage contre le rayonnement solaire. On teste l'efficacité des produits éclaircissants de la peau selon les différents phototypes.

Dans l'Unité INSERM 346, nous avons récemment proposé un modèle de « mélanome » reconstruit à l'aide de mélanocytes d'origine maligne. Il permet d'étudier comment se forment les mélanomes, comment les cellules tumorales traversent la membrane basale et comment elles envahissent le derme. D'autres modèles reconstruits à partir de kératinocytes d'origine pathologique et cultivés sur un substrat dermique ressemblent beaucoup aux lésions d'origine. Ces épidermes « pathologiques » reconstruits seront des outils précieux pour l'étude de ces maladies et pour les tests de l'efficacité potentielle des médicaments.

La peau de reconstruction a d'abord été constituée de kératinocytes, puis ces cellules ont été associées à un derme. On y a ensuite introduit des mélanocytes. Il manquait encore les cellules de défense : les cellules de Langerhans. Si elles ont été décrites par le pathologiste

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de la recherche
- ☐ Le texte intégral de la revue
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des conférences de la découverte

Je souscris à la revue du Palais de la Découverte

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

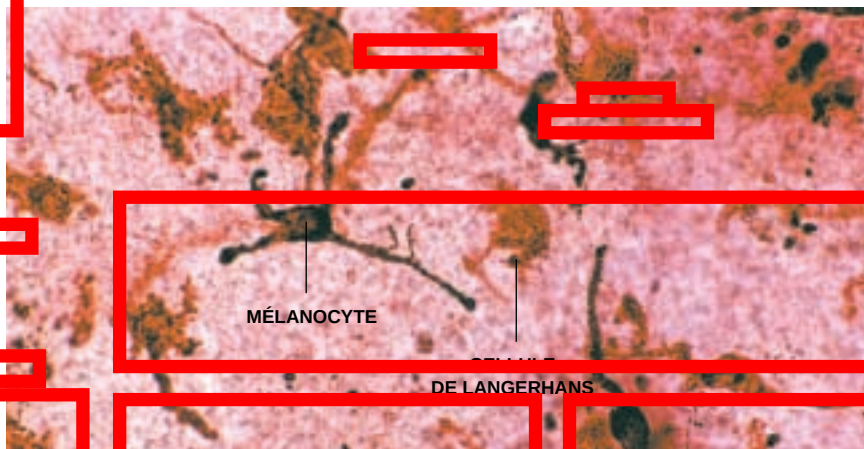
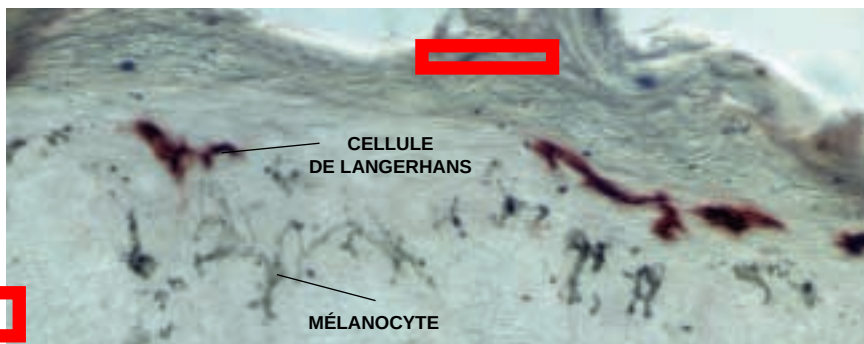
Je joins mon règlement par chèque

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(COP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)
Tarif étranger : 200 F
par mandat international uniquement
(par avion, supplément de 80 FF)
Abonnement de soutien : 200 F

Nom (M., Mlle, Mlle)
Prénom :
Adresse :
Ville :
Code postal :
Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 0



4. DES MODÈLES de peau contenant les trois types de cellules de l'épiderme, c'est-à-dire les kératinocytes, les mélanocytes et les cellules de Langerhans, sont désormais disponibles. En haut, coupe verticale d'une peau reconstruite ; en bas, coupe horizontale à proximité de la face supérieure de la couche basale. Les mélanocytes se répartissent dans la couche basale, les cellules de Langerhans dans les couches supérieures et les kératinocytes sur toute l'épaisseur de l'épiderme. Les mélanocytes sont pourvus de longs prolongements, par lesquels ils transfèrent leur pigment aux kératinocytes avec lesquels ils sont en contact.

cas d'agression chimique, microbienne, virale ou d'exposition au soleil.

On pourrait utiliser ce modèle, en cours de validation, pour prévoir le risque allergisant de certains composés, et pour réduire considérablement les tests cutanés classiques, sur l'animal.

Ainsi, la peau reconstruite est un tissu vivant, très proche du tissu d'origine. Ces modèles de peau sont utilisés dans l'évaluation de l'innocuité et de l'activité de nouveaux composés. Les épidermes reconstruits sont ajustables : on y incorpore, sur mesure, les constituants souhaités, tant dans le derme, que dans

l'épiderme. L'introduction de nouveaux éléments dans les équivalents dermiques, par exemple des cellules de la paroi des vaisseaux, apporteront de nouvelles données sur la vascularisation de la peau.

Des épidermes reconstruits sont commercialisés et remplacent les animaux dans de nombreux tests pharmacologiques ou cosmétiques. Ils ne remplaceront sans doute jamais complètement la peau humaine, mais leur validation internationale est très attendue : l'utilisation des animaux de laboratoire se voit alors abandonnée, en partie, voire complètement.

Marcelle RÉGNIER travaille au Centre de recherche Charles Zviak des Laboratoires L'Oréal. Marie-Jeanne STAQUET est chargée de recherche-CNRS, dans l'Unité INSERM 346, à l'hôpital Édouard Herriot, à Lyon.

M. RÉGNIER et al., *Integration of Langerhans Cells into a Pigmented Reconstructed Human Epidermis*, in *J. Invest.*

Dermatol., vol. 109, pp. 510-512, 1997.

A. BLACK et al., *In vitro Reconstitution of a Human Capillary-like Network in a Tissue Engineered Equivalent*, in *Faseb J.*, vol. 12, pp. 1331-1340, 1998.

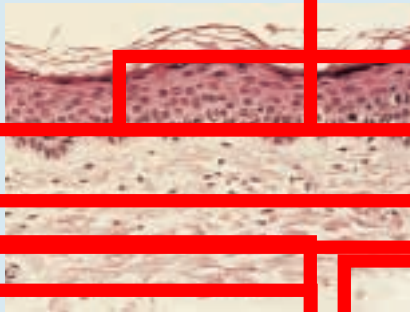
M. RÉGNIER et al., *Potential Cosmetic Applications of Reconstructed Epidermis*, in *Int. J. Cos. Sci.*, vol. 21, pp. 51-58, 1999.

Un équivalent de peau, prêt à l'emploi

Les différentes équipes qui tentent de mettre au point des modèles de peau de remplacement ont toutes pour objectif de préparer des substituts toujours plus proches de la peau naturelle, notamment avec les deux couches qui constituent la peau humaine, le derme (la couche interne) et l'épiderme (la couche externe). Ainsi est né le modèle de peau *Apligraf* des laboratoires *Organogenesis*.

Il y a une vingtaine d'années, à l'Institut de technologie du Massachusetts, Eugene Bell constata que des fibroblastes, les cellules qui forment le derme, peuvent s'infiltrer dans un gel de collagène et le transformer en une matrice fibreuse. Le collagène est un élément essentiel de la matrice extracellulaire, le « ciment » biologique qui maintient les cellules en place. En 1981, E. Bell montra que les kératinocytes, les principales cellules de l'épiderme, peuvent se développer sur ce substrat dermique, formant une peau équivalente grossière que l'on peut greffer à des rats.

Pour préparer cette peau, nous avons isolé du collagène de tendons de bovins, puis nous l'avons stérilisé chimiquement à froid pour détruire tous les micro-organismes pathogènes potentiels, sans endommager le collagène. Après avoir établi les conditions optimales de culture des kératinocytes humains, il nous fallait trouver une source de fibroblastes et de kératinocytes, et nous avons eu l'idée de collecter des prépuces de nouveau-nés, obtenus à la suite de césariennes. Nous avons obtenu une couche dermique et à l'avons ensemencée avec des cellules épidermiques. Il nous restait à trouver comment faire croître et différencier les kératinocytes, pour éviter que des kystes ne se forment.



Le modèle de peau *Apligraf* est constitué de deux couches, un épiderme supérieur et un derme sous-jacent.

Nous avons observé, par hasard, que, dans certaines boîtes de culture, l'épiderme se développait en adoptant une forme convexe au lieu de la forme concave habituelle. On constata rapidement que cette forme favorisait la croissance contrôlée d'une couche d'épiderme sur une couche dermique enrichie en collagène.

Entre 1991 et 1992, nous avons commercialisé une version de ce substitut de peau, qui fut utilisé pour remplacer l'expérimentation animale dans des études toxicologiques et pharmacologiques. Après avoir obtenu les autorisations requises, nous avons testé notre substitut de peau sur des ulcères variqueux, c'est-à-dire des lésions cutanées dues à une insuffisance de la circulation veineuse des membres inférieurs. Nous avons constaté que la peau de remplacement se comporte comme une greffe et qu'elle stimule directement la cicatrisation, grâce à ses propres facteurs de croissance. Les ulcères les plus graves, qui persistaient depuis plus d'un an, cicatrisèrent rapidement. Après 24 semaines, 47 pour cent des plaies les plus rebelles à la cicatrisation étaient refermées, contre 19 pour cent avec les traitements classiques, qui consistent à appuyer sur la plaie tout en la maintenant humide.

Aujourd'hui, *Apligraf* est commercialisé aux États-Unis et au Canada par les Laboratoires *Novartis Pharmaceuticals*. La peau est livrée « prête à l'emploi », et se conserve pendant cinq jours à température ambiante.

Elle est en cours d'évaluation chez des personnes ayant subi des brûlures, souffrant d'ulcères diabétiques ou ayant subi une ablation chirurgicale de peau.

Nancy PARENTEAU, *Organogenesis*

L'efficacité des substituts de derme

Quand on prépare des peaux de remplacement, elles doivent conserver leurs propriétés jusqu'à leur utilisation. Pour préparer des équivalents de derme, les Laboratoires *Advanced Tissue Science* utilisent des fibroblastes isolés du derme de prépuces de nouveau-nés qui, en culture, ont une considérable capacité de multiplication (à partir d'un prépuce, on pourrait obtenir une surface de peau équivalant à plusieurs terrains de football). Des polymères servent de trame où ces cellules se répliquent. Pendant une période de croissance de deux semaines, les cellules se divisent et produisent des facteurs de croissance, du collagène et diverses protéines qui forment un derme humain fonctionnel. Même après avoir été congelé pour être transporté sur le lieu de son utilisation, le tissu, nommé *Dermagraft*, reste vivant. C'est à dire qu'il a la capacité de déclencher la croissance de la peau, par exemple chez les diabétiques qui ont un ulcère du pied ou chez des personnes qui ont des escarres. Pour cicatriser, ces plaies nécessitent des facteurs de croissance et diverses protéines que produit la peau naturelle.

Pour être transporté ou stocké, *Dermagraft* est conservé à -70 °C, mais le froid détruit souvent les cellules. Nous avons étudié diverses méthodes de cryopréservation



Dermagraft, constitué d'une seule couche de derme, semble efficace dans le traitement des ulcères du pied des diabétiques.

et cherché celles qui assurent la meilleure conservation de nos équivalents de derme. Nous avons constaté que, pour le traitement des ulcères du pied des diabétiques, où la cicatrisation est difficile, la moitié des cellules du derme greffé doivent être vivantes pour que la lésion cicatrise. Ces ulcères sont fréquents chez les diabétiques (15 pour cent d'entre eux en souffrent), car leurs cellules vieillissent prématurément et ne produisent plus de collagène ni les protéines de la matrice. Le derme greffé compense ces insuffisances.

L'état de santé des personnes qui ont reçu une greffe dont plus de la moitié des cellules étaient vivantes s'est notablement amélioré : 51 pour cent ont cicatrisé en 12 semaines (contre 32 pour cent des personnes traitées par les méthodes classiques). Quand

la greffe ne contient pas assez de cellules vivantes, les ulcères cicatrisent mal. Des essais se poursuivent pour l'évaluation de *Dermagraft* dans le traitement des ulcères du pied des diabétiques, des ulcères variqueux, des ulcères de compression (les escarres) et de diverses plaies chroniques : le substitut de derme semble accélérer la recolonisation de la plaie par les kératinocytes.

Gail NAUGHTON, *Advanced Tissue Sciences*

Les cellules encapsulées

MICHAEL LYSAGHT • PATRICK A. EBERSCHER

Des implants contenant des cellules vivantes, protégées d'un système immunitaire par une membrane en plastique, pourraient libérer dans l'organisme des molécules thérapeutiques.

En 1995, un chirurgien place une petite capsule en matière plastique dans la colonne vertébrale d'un homme qui souffre de douleurs continues. Cette capsule de cinq centimètres de long, fine comme le fil de fer d'un trombone, contient des cellules de veau qui sécrètent des antalgiques.

Les bio-ingénieurs qui ont conçu la capsule ont prévu que les antalgiques traverseront des pores minuscules et diffuseront dans la moelle épinière ; inversement, les nutriments et l'oxygène du liquide céphalo-rachidien pénétreront dans la capsule, pour alimenter les cellules. La membrane de la capsule, en matière plastique, doit bloquer les structures plus grosses, tels les anticorps et les cellules immunitaires : ainsi le système immunitaire ne détectera pas la présence des cellules de veau et il ne les détruira pas.

Ce dispositif doit bloquer les signaux de la douleur, qui se propagent à travers la moelle épinière, jusqu'aux centres de détection du cerveau. Cependant, l'expérience de 1994 a seulement vérifié que les cellules implantées survivent et libèrent leurs antalgiques pendant plusieurs mois. Son succès et celui des expériences qui ont suivi ont ouvert la voie à une vaste étude, aujourd'hui en cours, de l'antalgie. Mieux encore, les expériences ont montré que des cellules encapsulées pourraient traiter des maladies variées.

Après cinq ans de travail, l'intérêt des thérapies par cellules encapsulées (encore nommées thérapies par immuno-isolément ou bio-hybrides) semble justifié. Après l'implant antalgique, un système bio-hybride hépatique a été testé dans plusieurs centres

médicaux. D'autres thérapies par cellules encapsulées sont testées sur l'homme et sur de grands animaux, contre divers troubles : les maladies neurodégénératives de Parkinson et de Huntington, l'hémophilie, l'anémie ou le retard de croissance.

Dans la plupart des cas, on implante des cellules encapsulées dans des sites appropriés de l'organisme, mais parfois, comme dans le cas de la thérapie hépatique, les cellules encapsulées peuvent remplir leur fonction dans un dispositif externe, analogue à un système de dialyse rénale.

La thérapie par cellules encapsulées est prometteuse, parce qu'elle évite les inconvénients de l'implantation de cellules libres. Les cellules encapsulées peuvent assurer les fonctions de cellules lésées ou perdues, ou apporter les molécules que les cellules de l'organisme ne produisent pas.

Ces cellules encapsulées ne sont pas attaquées par le système immunitaire de sorte qu'elles évitent les traitements immunosuppresseurs : les personnes traitées ne sont alors plus prédisposées aux infections, à certains cancers (lymphomes) ou aux lésions rénales.

La protection immunitaire assurée par les membranes en plastique permet aussi l'emploi de cellules animales en médecine. Celles-ci ne peuvent pas être greffées sans capsule, car les immunosuppresseurs n'évitent pas totalement le rejet des implants provenant d'autres espèces (xéno-greffes). L'utilisation de cellules animales compenserait la pénurie de tissus humains. Enfin, contrairement aux cellules libres, des cellules encapsulées pourraient être récupérées et éliminées rapidement, si nécessaire.

Les recherches sur les cellules encapsulées sont fondées sur les travaux de William Chick, des Laboratoires de recherche Joslin. Dans les années 1970, Chick s'intéressait au traitement du diabète insulino-dépendant. Souvent, cette maladie frappe des personnes jeunes : le pancréas ne fabrique plus d'insuline, alors que, chez les individus sains, il en produit proportionnellement à la concentration en glucose dans le sang. Les injections quotidiennes d'insuline sauvent des vies, mais elles ne reproduisent pas le rythme naturel de sécrétion d'insuline : les tissus sont exposés à de trop fortes concentrations en glucose, de sorte que, progressivement, la cécité et des lésions rénales apparaissent.

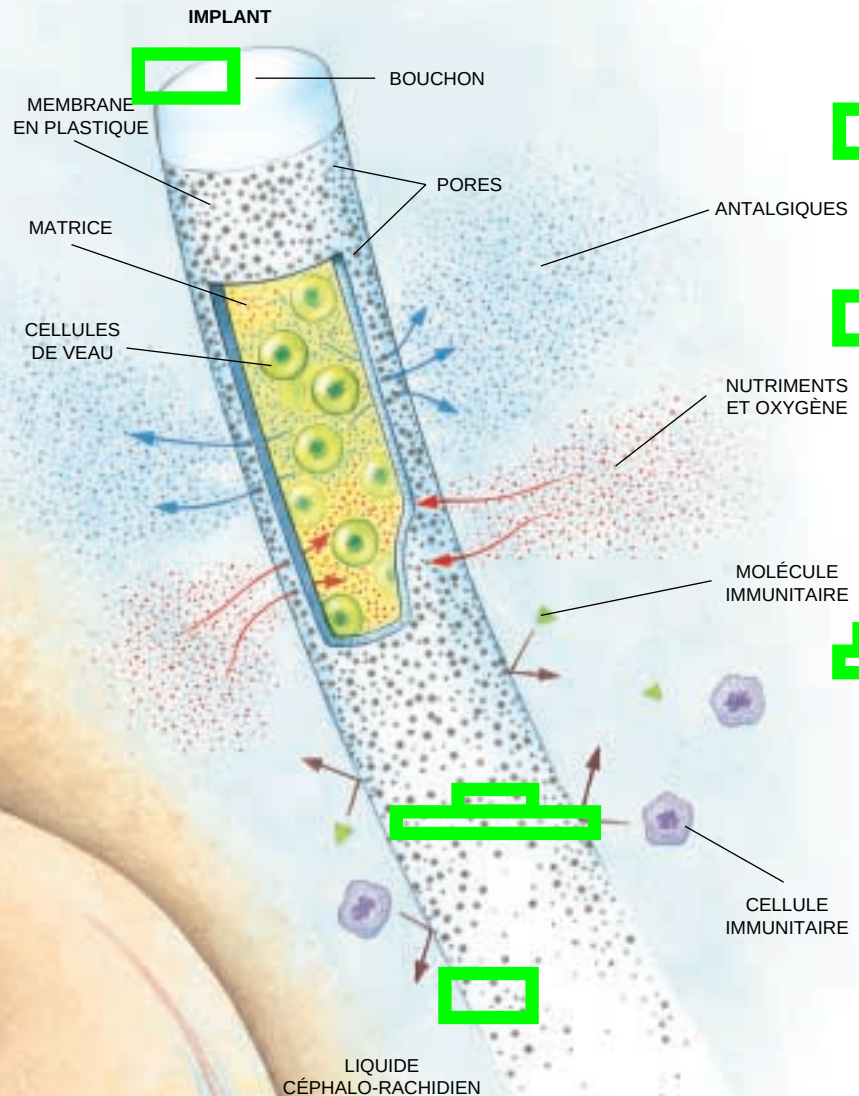
Des capsules de toutes sortes

Chick pensait que des implants d'îlots (groupes de cellules) pancréatiques encapsulés auraient un triple avantage : ils produiraient de l'insuline en quantité adaptée aux besoins de l'organisme à chaque instant ; les capsules éviteraient l'administration d'immunosuppresseurs ; on pourrait implanter des cellules animales, notamment des cellules de porcs (à partir desquelles l'industrie pharmaceutique a produit de l'insuline).

Depuis le milieu des années 1970, les études sur des rongeurs ont confirmé l'intuition de Chick, mais divers obstacles techniques s'opposent encore à l'isolement du diabète par immuno-isolément. Décédé en 1998, Chick ne verra pas le fruit de ses efforts, mais de nombreux patients lui devront sans doute bientôt la santé.

Les divers types d'implants encapsulés ont tous les mêmes éléments de

base : des cellules capables de sécréter des substances utiles sont placées dans une matrice limitée par une membrane poreuse. On sait aujourd'hui que les implants doivent être placés à moins de 0,5 millimètre des vaisseaux sanguins ou d'autres sources de nutrition pour fonctionner correctement.

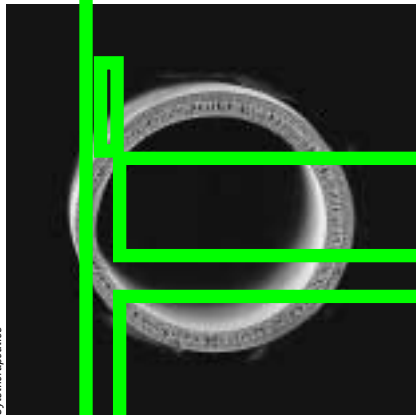


1. DES CELLULES qui sécrètent des antalgiques naturels ont été placées dans une capsule remplie de liquide. Introduite dans la colonne vertébrale du patient, cette capsule tubulaire de plusieurs centimètres de longueur a libéré les antalgiques dans la moelle épinière des patients traités. Les antalgiques traversent la capsule par les pores minuscules du plastique. Les nutriments (de petites molécules) et l'oxygène empruntent aussi ces pores pour entrer dans la capsule, mais les cellules immunitaires et les anticorps ont été bloqués.

Les premiers dispositifs à cellules encapsulées étaient extracorporels : on les a testés pour traiter le diabète chez des rats. La circulation sanguine est déviée vers un tube en plastique. L'enceinte contenant les cellules thérapeutiques entoure un segment poreux du tube. Lorsque le sang traverse le tube, il absorbe les substances sécrétées par les cellules thérapeutiques, tandis qu'elles leur fournit des nutriments et de l'oxygène. Dans le cas des îlots pancréatiques, la concentration en glucose dans le sang détermine la quantité d'insuline libérée. Dans d'autres cas, les cellules sécrètent régulièrement un produit. Les dispositifs de dérivation sont surtout destinés à des applications externes, car leur greffe impose une opération chirurgicale, ainsi que l'administration à long terme d'anticoagulants pour empêcher la formation de caillots dans le tube ; en outre, une rupture du tube provoquerait une hémorragie interne.

À la fin des années 1970, un autre système, moins invasif, de «micro-encapsulation» a été mis au point. Pour fabriquer des microcapsules, on met un îlot pancréatique d'environ 1 000 cellules dans une goutte de solution aqueuse de polymères électriquement chargés ; puis on plonge la goutte dans une solution de polymères de charge opposée. En réagissant, les polymères forment une enveloppe autour de la goutte, de 0,5 millimètre de diamètre environ. Les microcapsules sont de fabrication rapide, mais leur utilisation chez l'homme présente des inconvénients : elles sont fragiles, difficiles à retrouver après implantation, et il en faut trop pour corriger une maladie.

Les macrocapsules préformées semblent préférables. Une fois fabriquées, elles sont remplies d'une matrice contenant toutes les cellules nécessaires au traitement. Par leur forme et leur taille, elles ressemblent à une pièce de un franc, à une balle de col de chemise ou à un tube. Chez l'homme, on utilise le plus souvent des tubes scellés de plusieurs centimètres de longueur et dont le diamètre est compris entre 0,5 et 1 millimètre. Grâce à leur armature interne, les macrocapsules sont beaucoup plus résistantes et plus durables que les microcapsules. Elles sont aussi plus fiables, car on peut tester leur étanchéité avant l'implantation et les retrouver



2. LES CAPSULES TUBULAIRES où on loge des cellules (ici, en coupe, une capsule vide) ont une enveloppe qui a la structure d'une mousse.

en cas de problème. Certaines macrocapsules sont même conçues pour être remplies de nouveau une fois qu'elles sont dans l'organisme. En revanche, leur capacité est limitée à cinq millions de cellules environ pour les tubes et à 50 ou 100 millions pour les disques, ce qui n'est pas toujours suffisant. On ne peut les faire plus grosses sans risque de rupture et leurs bords plus courbés sont parfois le siège d'une dégénérescence fibreuse, qui peut bloquer les pores de la capsule.

Les fabricants de systèmes bio-hybrides cherchent à créer des pores qui soient assez petits pour prévenir une invasion de cellules ou de molécules immunitaires, mais assez grands pour laisser passer les nutriments, l'oxygène et les protéines sécrétées par les cellules implantées. Aujourd'hui, les pores ont des tailles trop variées de sorte que certaines molécules immunitaires traversent la capsule, mais ce phénomène est en général trop limité pour être gênant.

Des cellules immortelles

Jusqu'à la fin des années 1980, la plupart des dispositifs bio-hybrides contenaient des cellules primaires, c'est-à-dire prélevées à un organisme donneur. Toutefois, la technique des cellules primaires ne permet pas des études sur de grands animaux et sur l'homme, car on s'en procure alors difficilement. De surcroît, on aurait dû vérifier, pour chaque donneur, que l'utilisation de ses cellules ne présentait aucun risque. Ainsi, au début des années 1990, certaines équipes ont

commencé à s'intéresser aux lignées cellulaires. Ces cellules sont immortelles, se divisent sans cesse et se multiplient rapidement en culture, sans perdre leur aptitude à produire des substances utiles, contrairement aux cellules primaires, qui se répliquent peu en culture. Pour fabriquer une lignée cellulaire, on doit modifier des cellules primaires, mais, ensuite, l'apport de cellules pour les transplantations est continu.

Depuis 1991, nos travaux montrent l'intérêt des lignées de cellules pour les thérapies par organes bio-hybrides. Nous nous sommes intéressés à la maladie de Parkinson, caractérisée par l'absence de dopamine dans une structure du cerveau appelée substance noire. Afin d'étudier la maladie chez des animaux, nous avons reproduit ce symptôme en détruisant leurs cellules productrices de dopamine. Puis nous avons greffé aux animaux malades des cellules qui sécrètent de la dopamine, issues de la lignée PC-12, créée à partir d'une tumeur surrénale de rongeur. Les symptômes ont disparu chez de nombreuses espèces, notamment chez les primates.

Les cellules n'ont pas proliféré de manière incontrôlée, puisque leur nombre total n'a pas dépassé la capacité de l'implant. En outre, les études ont montré que, si des cellules immortelles s'échappaient de leur capsule, elles n'en deviendraient probablement pas de tumeur cancéreuse, comme on l'avait craint tout d'abord : l'immortalisation d'une cellule n'est qu'une étape vers le cancer. Pour être cancéreuses, des cellules doivent devenir capables d'envahir un tissu voisin, de mettre en place leur propre système de vascularisation et de se disséminer vers des sites éloignés. De plus, le risque d'apparition de tumeurs n'existe que lorsque les cellules immortelles greffées proviennent de l'espèce du receveur. Dans le cas des xénogreffes, des expériences avec des cellules de rat non encapsulées, de type PC-12, implantées dans le cerveau de primates, ont montré qu'aucune tumeur n'apparaît ; les cellules greffées ont été rapidement détruites par le système immunitaire du receveur. Les lignées de cellules semblent donc utilisables dans les traitements par immuno-isolement.

Le succès des études sur les lignées cellulaires ouvre des perspectives intéressantes en thérapie génique : on pourra utiliser des cellules génétiquement modifiées, car des cellules qui se divisent incorporent davantage les gènes étrangers ; elles ont donc plus de chances de fabriquer des protéines thérapeutiques que des cellules ordinaires. Suivant le protocole classique, on prélève des cellules au patient, on y insère les gènes choisis,

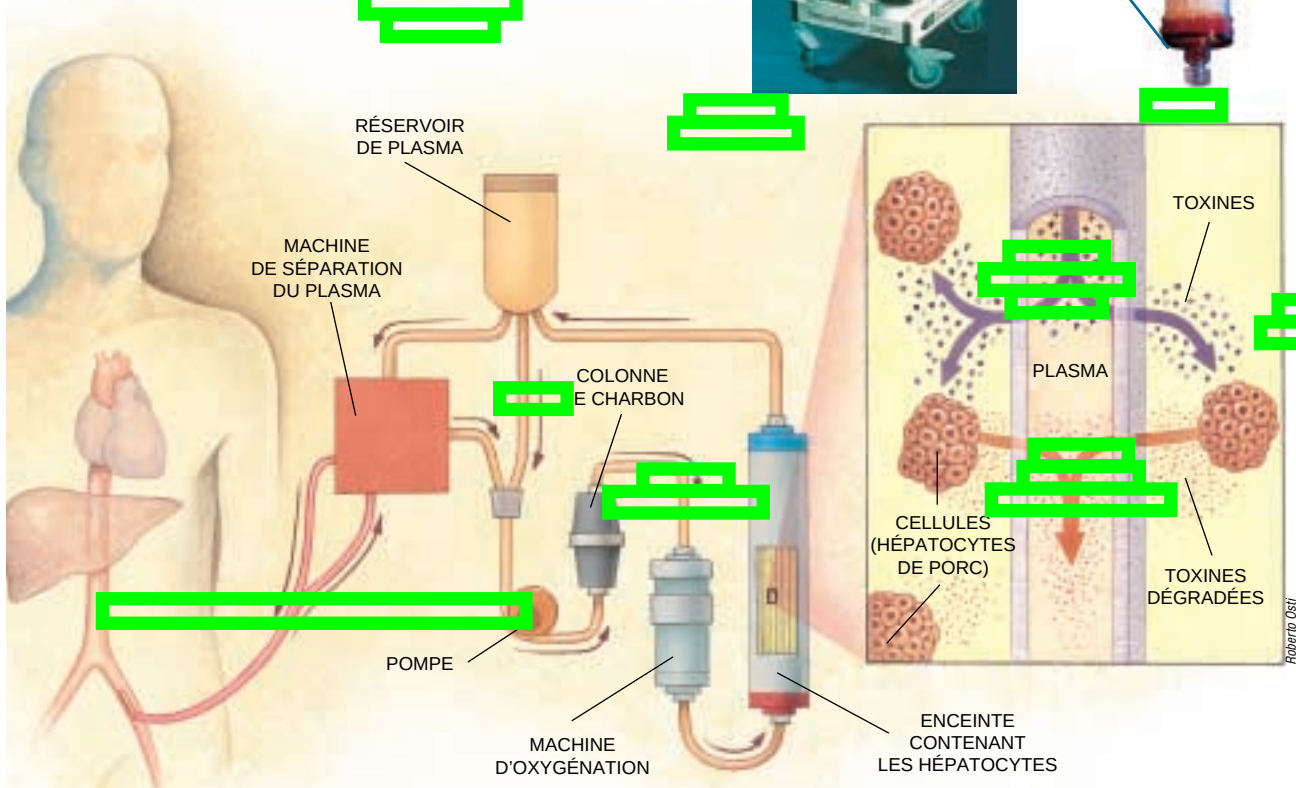
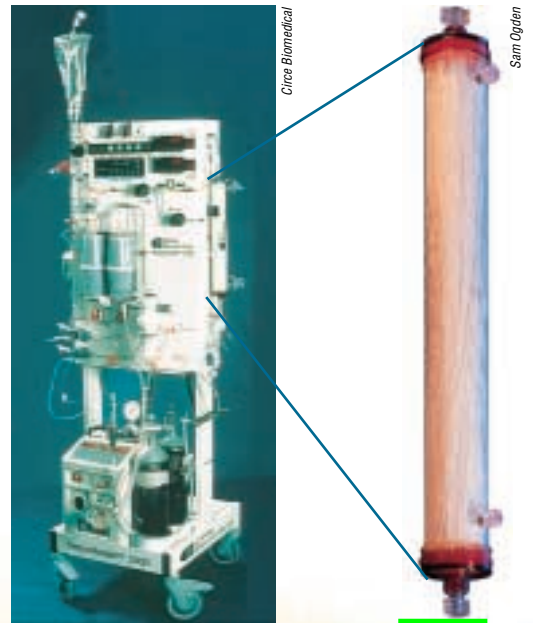
puis on favorise la multiplication des cellules ainsi modifiées, avant de les réintroduire dans l'organisme du patient. On espère alors que les protéines codées par les gènes introduits seront fabriquées en quantité suffisante, mais on n'a aucune certitude. Avec les capsules de cellules génétiquement modifiées, en revanche, on peut évaluer l'effet de la modification génétique avant de mettre les implants en place.

Les lignées de cellules destinées aux thérapies bio-hybrides doivent-elles provenir d'animaux ou d'hommes ? Pour les cellules primaires, prises à des donneurs, la question ne se pose pas : ce sont toujours des cellules animales, parce que les donneurs humains manquent. D'autre part, certains chercheurs préfèrent les lignées d'origine animale, parce que, si des cellules s'échappaient des capsules, elles seraient rapidement

L'assistance hépatique

Les systèmes à cellules encapsulées ne sont pas tous des implants : ceux qui sont testés pour l'assistance hépatique fonctionnent à l'extérieur de l'organisme. Ils permettent de maintenir les patients en vie jusqu'à ce qu'une greffe soit possible. Le dispositif présenté ici a été mis au point par l'équipe de Claudy Mullon, de la Société *Circe Biomedical* et celle d'Achille Demetriou, du Centre médical Cedars-Sinai.

Cette machine pompe le sang du malade et fait passer sa partie liquide (le plasma) dans une colonne de charbon, qui élimine certaines toxines. Après oxygénation, le plasma passe dans une enceinte contenant les hépatocytes (cellules hépatiques de porcs). Dans l'enceinte, le plasma traverse plusieurs tubes poreux entourés par le milieu contenant les hépatocytes. Les toxines du plasma diffusent vers ces derniers, qui les transforment en substances inoffensives. Après purification, le plasma est remélangé aux cellules sanguines et réinjecté dans l'organisme du patient.



détruites par le système immunitaire. En outre, on peut équiper des cellules animales de gènes humains codant des protéines thérapeutiques. Les lignées d'origine humaine ont d'autres avantages : leurs cellules s'adaptent mieux à l'intérieur des capsules que les cellules animales et l'on ne risque pas de transférer des virus pathogènes des animaux à l'homme. Quelle que soit l'origine des cellules, on pourrait les modifier, de sorte que l'apparition d'une reconnaissance immunitaire soit rapidement déclenchée si des cellules s'échappaient de leur implant.

Les cellules encapsulées, génétiquement modifiées ou non, servent souvent à sécréter des protéines thérapeutiques, mais si ces protéines sont injectables, pourquoi les implanter ? Parce que l'endroit où l'injection est nécessaire est parfois inaccessible, par exemple dans une tumeur ou dans le cerveau, protégé par une membrane qui bloque l'accès à certaines substances du sang. Certaines protéines sont trop instables pour être injectées en continu par des pompes. Enfin, les injections ne reproduisent pas le rythme naturel de sécrétion des protéines, ce qui est parfois gênant, comme pour le diabète.

Les essais cliniques

Alors que les premiers essais cliniques utilisent des cellules primaires, les dispositifs bio-hybrides du futur contiendront certainement des cellules génétiquement modifiées. Pour le traitement de la douleur chronique, par exemple, nous avons utilisé des cellules prélevées à des veaux qui avaient été élevés dans des conditions contrôlées. Après avoir extrait les cellules chromaffines des glandes surrénales (ces cellules sécrètent naturellement des antalgiques), nous avons purifié trois millions de cellules environ, nous les avons mises dans une capsule tubulaire scellée à chaque extrémité et reliée à une attache qui permettait la récupération en cas de besoin. Puis nous avons implanté les capsules dans la colonne vertébrale de patients, lors d'une intervention chirurgicale peu invasive. Au milieu des années 1990, nos collègues chirurgiens ont montré que ces implants fonctionnaient pendant plusieurs mois et ils ont noté



Patrick Aubischer

3. CE PETIT TUBE renferme des cellules de hamster. Il a été retiré de la colonne vertébrale d'un patient après 17 semaines : les cellules sécrétaient encore une protéine thérapeutique, et la surface du dispositif d'encapsulation était intacte. Ces résultats laissent espérer que les implants de cellules animales pourront fonctionner pendant plusieurs mois.

les indices d'un effet antalgique : plusieurs patients souffraient moins et avaient réduit leur consommation de morphine. Cependant, comme ces expériences ne comparaient pas le groupe traité à un groupe non traité, nous ne sommes pas sûrs que le traitement soit réellement efficace. Un essai clinique sur plus de 100 patients déterminera le degré d'atténuation de la douleur.

Les premiers résultats montrent que des cellules encapsulées d'origine animale survivent pendant plusieurs mois dans le système nerveux central de sujets qui ne prennent pas d'immunosuppresseur (alors qu'aucune cellule animale transplantée chez l'homme n'a survécu sans encapsulation, même lorsqu'on administrait massivement des immunosuppresseurs au patient).

Le dispositif d'assistance hépatique est une autre application bien testée des implants de cellules primaires animales encapsulées. Dans un foie sain, des cellules nommées hépatocytes dégradent les toxines. Lorsque le foie ne fonctionne pas correctement, ces toxines s'accumulent jusqu'à atteindre une concentration

létale. Les transplantations hépatiques sauvent des vies, mais beaucoup de patients meurent parce que l'on ne dispose pas d'organe compatible avec leur type tissulaire. Les systèmes hépatiques bio-hybrides pourraient assurer les fonctions de détoxification jusqu'à ce qu'une possibilité de greffe se présente. Cette thérapie « passe-relle » utilise un appareil vasculaire externe : on pompe le sang du patient vers une enceinte fermée, où une suspension d'hépatocytes de porc dégrade les toxines qu'il contient ; le sang régénéré retourne ensuite dans l'organisme (voir l'encadré de la page précédente). Contrairement à l'implant antalgique, qui ne délivre que quelques milligrammes d'antalgiques mais fonctionne pendant des mois ou des années, un dispositif hépatique extracorporel contient de 20 à 200 grammes d'hépatocytes et n'a pas besoin d'avoir une autonomie supérieure à 24 heures.

Lors d'une première étude de près de 40 patients, qui souffraient de problèmes hépatiques risquant d'entraîner leur mort, le dispositif a fonctionné comme on l'espérait. Ces résultats, publiés en 1998, sont à l'origine du développement de la technique aux États-Unis et en Europe. Les espoirs sont grands. Dans le cas de graves lésions hépatiques dues à une absorption excessive de paracétamol, le système pourrait assurer la détoxification jusqu'à la régénération du foie.

Les biologistes se préoccupent de l'état des cellules animales utilisées : ne contiennent-elles pas des gènes de virus inconnus, dangereux pour le receveur ? Des méthodes de dépistage rigoureuses garantissent l'absence de pathogènes déjà identifiés et, jusqu'ici, les membranes d'encapsulation semblent infranchissables pour les virus animaux. D'ailleurs, aucun patient n'a contracté l'infection, même bénigne, par l'intermédiaire des cellules d'un donneur. Cependant, la vigilance reste indispensable.

Les essais cliniques de thérapies géniques par cellules encapsulées ont également commencé, mais ils sont moins avancés. Deux petites études de traitements des maladies du système nerveux central ont été réalisées. Le premier essai clinique avec des cellules génétiquement modifiées portait sur le traitement de la sclérose amyotrophique

latérale : cette maladie dégénérative se caractérise par l'altération des cellules nerveuses qui contrôlent les muscles. En 1996, six patients ont reçu des implants qui comprenaient des cellules d'une lignée dérivée de reins de hamsters nouveau-nés. On avait ajouté à ces cellules un gène qui code le facteur neurotrophique ciliaire, afin de retarder la détérioration des neurones. Le protocole d'implantation de la capsule tubulaire dans la colonne vertébrale était voisin de celui que nous avons décrit pour le traitement des douleurs chroniques. Les cellules ont survécu et libéré pendant trois mois assez de facteur neurotrophique ciliaire pour que celui-ci soit détecté dans le liquide céphalo-rachidien. La progression de celle-ci n'a pas été retardée, mais le test était trop court et portait sur trop peu de sujets pour fournir un résultat fiable. Si l'on trouvait le ou les gènes permettant de traiter la sclérose amyotrophique latérale, l'encapsulation des cellules serait un bon moyen de les amener jusqu'au système nerveux.

L'équipe de Marc Peschanski teste aujourd'hui des implants où l'on a placé la même lignée cellulaire sur des patients atteints de la maladie de Huntington, qui tue certaines cellules cérébrales. Cette fois, les capsules ont été implantées dans les ventricles cérébraux (des espaces remplis de liquide céphalo-rachidien, à l'intérieur du cerveau). Ce protocole de thérapie génique vient juste de commencer. Avec d'autres expériences sur l'animal, il révélera les performances de l'immuno-isollement comme technique d'administration de la thérapie génique (voir l'encadré de la page suivante).

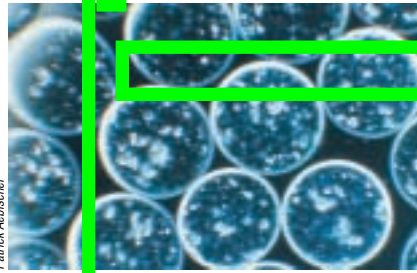
Le défi du diabète

Puisque les recherches sur l'immuno-isollement sont prometteuses dans de nombreux domaines, pourquoi le traitement du diabète ne progresse-t-il pas également ?

Après les succès de Chick et de ses collègues, qui ont réussi à traiter le diabète chez les rongeurs en 1977, une dizaine de laboratoires ont reproduit leurs résultats avec différents types d'implants. Néanmoins, la thérapie bio-hybride, fondée sur les îlots pancréatiques, a donné des résultats médiocres chez les espèces plus

MICROCAPSULES

Capacité : 1 000 à 5 000 cellules



Patrick Aebischer

MACROCAPSULES

Capacité : 1 000 000 à 100 000 000 cellules



Theracofte



Cytotherapeutics

DISPOSITIFS EXTRACORPORELS

Capacité : plus de 1 000 000 000 cellules



Circa Biomaterial

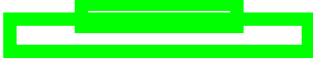
4. LES SYSTÈMES D'ENCAPSULATION ont des tailles et des formes variées.

Les microcapsules (en haut) sont de minuscules sphères en plastique qui enferment du liquide et des cellules. Les macrocapsules, de quelques centimètres de long, sont préformées avant d'être remplies par un petit tube, visible sur l'implant du haut, qu'on enlève avant l'implantation. Le fil bleu, sur la photographie inférieure, est une partie de l'attache. Des dispositifs de dérivation plus grands font passer le sang par un tube en plastique entouré par une enceinte en forme d'anneau, emplies de cellules thérapeutiques. Celui qui est photographié ici peut être implanté. Sur la droite, les silhouettes indiquent les tailles réelles.



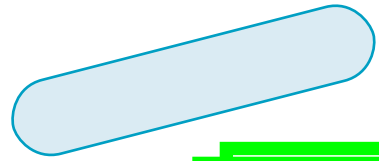
TAILLE RÉELLE :

500 micromètres de diamètre



TAILLE RÉELLE :

5 cm x 1 cm x 500 micromètres



TAILLE RÉELLE :

5 à 7 cm x 800 micromètres



TAILLE RÉELLE :

Capsule : environ 7 cm de large
Tube : environ 6 mm de diamètre

Les thérapies géniques en cours

Les maladies génétiques peuvent être soignées par des implants de cellules encapsulées génétiquement modifiées. Ces cellules seraient dotées d'un gène qui leur permettrait de libérer la protéine thérapeutique correspondante sur le site biologique où elle est utile.

MALADIES	GÈNES	IMPLANTS
Sclérose latérale amyotrophique (SLA)	Facteur neurotrophique (CNTF) protège les neurones de la mort	Dans la moelle épinière, la libération de CNTF par les cellules encapsulées est terminée.
Maladie de Huntington	CNTF	Dans un veau, la libération de CNTF par les cellules encapsulées est terminée.
Maladie de Parkinson	Facteur neurotrophique (CNTF) protège les neurones sécrétant de la dopamine	Dans un veau, la libération de CNTF par les cellules encapsulées est terminée.
Anémie	Érythropoïétine (EPO) : glycoprotéine qui stimule la production de globules rouges.	Sous-cutané : étudié chez des patients atteints de l'anémie.
Hémophilie	Facteur VIII ou facteur IX de la coagulation	Sous-cutané : étudiés chez des chiens et des rongeurs.
Nanisme	Hormone de croissance humaine (hGH) stimule la croissance de l'organisme.	Sous-cutané : étudié chez des chiens et des rongeurs.
Diabète non insulino-dépendants	Peptide 1 de type glucagon (GLP-1) : stimule la libération d'insuline	Sous-cutané : étudié chez des rongeurs.
Dégénérescence maculaire	CNTF	Oculaire : étudié chez les rongeurs.

grandes, tels les chiens, les singes et les hommes.

Pour traiter des individus diabétiques, on devrait leur implanter environ 700 000 îlots, soit deux milliards de cellules bêta productrices d'insuline. C'est 1 000 fois plus que ce que l'on a déjà encapsulé. Pour traiter des souris, 500 îlots suffisent ; on les extrait manuellement du pancréas de souris saines. Cependant, le prélèvement de 700 000 îlots à la main, ou même par des techniques semi-automatiques, est difficile. Le grand nombre d'îlots nécessaires pose un autre obstacle : dans les pancréas naturels, chaque îlot a son propre système vasculaire, alors que dans les capsules, les îlots supportent mal leur environnement. L'implantation de pancréas artificiels fondés sur des îlots encapsulés serait probablement un échec.

Les lignées de cellules résoudre-elles le problème ? Plusieurs équipes modifient des cellules pour leur faire sécréter de l'insuline en réaction aux signaux complexes qui activent les pancréas sains. On vise la création de cellules qui produiraient plus d'insuline

que les cellules normales et qui pourraient être implantées en nombre inférieur. Elles seraient adaptées à la survie dans l'environnement pauvre en nutriments et en oxygène des capsules. Il y a cinq ans, on croyait impossible la fabrication de telles cellules, mais les progrès réalisés en biologie cellulaire et moléculaire ont redonné de l'espoir.

Il faudra environ cinq ans pour que des lignées de cellules sensibles au glucose soient créées et qu'elles soient utiles. Ensuite, les progrès jusqu'aux

essais cliniques devraient être rapides. Certains collègues sont plus optimistes qu nous, d'autres restent prudents, mais tous considèrent que la mise au point d'un pancréas artificiel ou bio-hybride est une priorité. D'autres applications de la thérapie bio-hybride apparaîtront également. Pendant les 20 prochaines années, elle dépassera le stade de la recherche pour jouer un rôle clé dans le traitement de certaines maladies humaines graves, des plus réfractaires et les plus invalidantes.

Michael LYSAGHT est professeur à l'Université Brown et président du Centre de médecine cellulaire de Rhode Island. Patrick AEBISCHER est directeur du Centre de thérapie génique de l'Université de Lausanne.

P. AEBISCHER et M.J. LYSAGHT, *Immunoisolation and Cellular Xenotransplantation*, in *Xeno*, vol. 3, n° 3, pp. 43-48, juin 1995.

Robert P. LANZA, David K.C. COOPER et William L. CHICK, *Les xénotrans-*

plantations in *Pour la Science*, septembre 1997.

Robert P. LANZA, Robert LANGER et William L. CHICK, *Principles of Tissue Engineering*, R.G. Landes Company, 1997.

D.F. EMERY *et al.*, *Treatment of Central Nervous System Diseases with Polymer-Encapsulated Xenogeneic Cells*, in *Cell Transplantation for Neurological Disorders*, sous la direction de Thomas B. Freeman et Hakan Widner, Humana Press, 1998.

Les organes artificiels

DAVID MOONEY • ANTONIOS MIKOS

Faute d'organes que l'on peut greffer, on construit des organes vivants en partie synthétiques.

Chaque jour, des milliers d'individus sont hospitalisés en raison d'une défaillance d'un de leurs organes vitaux. La majorité d'entre eux meurent, faute d'organes à transplanter. En France, seuls 50 pour cent des patients qui avaient besoin d'une greffe cardiaque en ont bénéficié en 1998. Les foies, les reins et la peau sont également en quantités insuffisantes. Aujourd'hui on répare plus facilement les véhicules accidentés que leur conducteur, parce qu'on ne dispose pas, pour les êtres vivants, de pièces de rechange. La création de tissus ou d'organes d'origine humaine, nommés néo-organes, devrait bouleverser la chirurgie des prochaines décennies.

On envisage ainsi d'injecter des molécules, par exemple des facteurs de croissance, à l'intérieur d'une blessure afin de provoquer la migration des cellules du patient vers la zone lésée, leur spécialisation, et ainsi la régénération du tissu. On envisage aussi de greffer des structures en polymère biodégradable comprenant des cellules,

celles du patient ou celles d'un donneur. Après la transplantation, les cellules se diviseraient, envahiraient la structure, tandis que les polymères artificiels se dégraderaient ; on obtiendrait ainsi un néo-organe.

La fabrication de ces néo-organes se fonde sur les progrès fondamentaux de la biologie et de la physique des matériaux.

On est encore loin des prouesses techniques dépeintes dans les œuvres de science-fiction, mais l'ingénierie des tissus est déjà en œuvre dans certains hôpitaux : on fabrique de la peau, du cartilage, de l'os, des ligaments et des tendons ; on progresse vers la confection d'organes complexes composés de plusieurs types de cellules, tels que les foies, les reins, les seins, les vessies et les intestins. Les études d'embryologie démontrent la faisabilité de l'entreprise et révéleront comment commander l'organogenèse et la différenciation cellulaire.

L'utilisation de composés qui déclenchent la réparation des tissus est la première voie explorée. On sait que le

comportement des cellules est guidé par des composés biochimiques lors des cicatrifications et des régénérations.

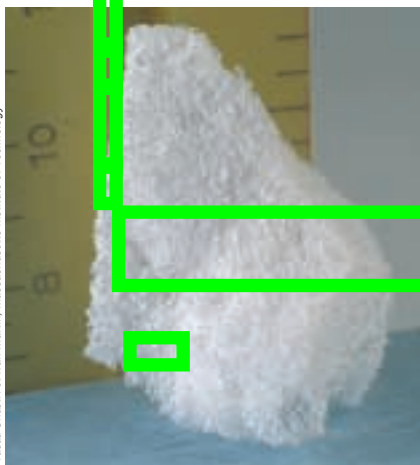
Une pincée de protéine

En 1965, à l'Université de Californie, Marshall Frost a observé la formation d'un nouveau tissu osseux chez des animaux à qui il avait injecté de l'os pulvérisé. Cette observation conduisit à l'identification des protéines morphogénétiques osseuses (BMP) responsables de cette activité ; puis les biochimistes ont identifié les séquences d'ADN qui codent ces protéines. Aujourd'hui, plusieurs sociétés produisent les protéines morphogénétiques osseuses humaines en cultivant des cellules de mammifères qui ont reçu les séquences isolées.

Les produits commercialisés sont testés dans plusieurs hôpitaux : on étudie leur faculté de régénération du tissu osseux pour la cicatrization des fractures aiguës traumatiques et pour l'accélération de la régénération des tissus périostaux qui entourent l'os et qui sont responsables de sa croissance. La Société Creative BioMolecules a montré que la protéine morphogénétique osseuse BMP-7 est aussi efficace qu'une greffe osseuse à partir d'un os prélevé sur une autre partie du corps pour consolider des fractures de la jambes toujours couvertes après neuf mois.

La régénération des tissus ne donne de bons résultats que si les nouveaux tissus sont bien irrigués par le sang qui les nourrit et qui les oxygène. Judah Folkman, de l'École de médecine de Harvard, a identifié des composés qui assurent la vascularisation des tissus alors qu'il cherchait à bloquer la croissance cellulaire des tumeurs cancéreuses.

En 1972, il a ainsi proposé d'asphyxier les tumeurs grâce à des inhibiteurs de la croissance des vaisseaux



Prasad Shastri et Ivan Martin, Massachusetts Institute of Technology

1. UNE MATRICE EN FORME DE NEZ, en polymère synthétique (à gauche), est «ensemencée» avec des cellules nommées chondrocytes. Progressivement, ces cellules remplacent le polymère par du cartilage (à droite) et forment un implant que l'on peut greffer.

sanguins qu'elles fabriquent normalement pour se développer. Avec d'autres chercheurs, il a ensuite identifié des facteurs qui favorisent l'angiogenèse.

L'industrie pharmaceutique fabrique aujourd'hui ces molécules angiogénétiques. Des tests sur des animaux ont montré que ces composés provoquent la croissance de nouveaux vaisseaux sanguins qui contournent les zones de blocage, par exemple dans les artères coronaires. Chez l'être humain, les essais cliniques à petite échelle sont en cours.

Cependant, des difficultés subsistent. Seuls les facteurs responsables de la croissance des os et des vaisseaux sanguins ont été caractérisés. Pour régénérer d'autres organes, tel le foie, on devra identifier les molécules nécessaires à leur développement et apprendre à les produire.

On devra également apprendre à utiliser ces molécules. Quelles concentrations conduisent à l'effet souhaité? Combien de temps faut-il exposer les cellules? Combien de temps les facteurs restent-ils actifs dans l'organisme? Pour des organes complexes, comment orchestrer l'administration des divers facteurs nécessaires? Les techniques de libération contrôlée de substances, par exemple avec des timbres transdermiques, contribueront certainement à résoudre ces questions.

Les polymères injectables sont des systèmes qui délivreront ainsi des molécules biologiquement actives. L'un d'entre nous (A. Mikos), avec Michael Yaszemski de la clinique Mayo, et Alan Yasko, du centre Anderson de Houston, met au point de nouveaux polymères injectables et biodégradables pour des applications orthopédiques. Ces polymères, à l'état liquide quand ils sont injectés, combient des anfractuosités irrégulières et durcissent en 10 à 15 minutes, conférant à la zone du squelette reconstruite des propriétés mécaniques semblables à celles de l'os qu'ils remplacent. Ils se dégradent ensuite en quelques semaines, de sorte que le tissu osseux vient se reconstituer à leur place.

Nous avons également étudié le traitement des déchaussements des dents

2. LE CORPS HUMAIN est davantage que la somme de ses parties, mais le remplacement des parties défaillantes allongera et améliorera l'existence.

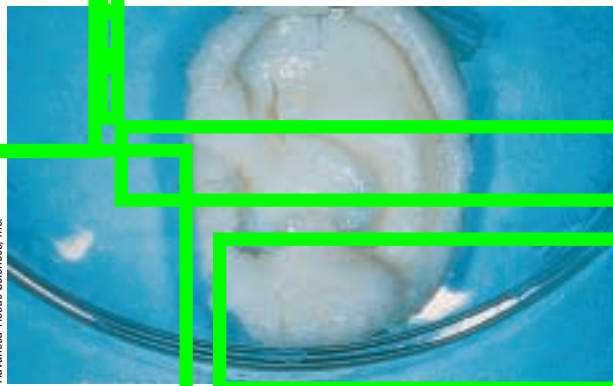
Grant Jendling



de l'os maxillaire par des hydrogels biodégradables et injectables. Les hydrogels sont des gels que l'on obtient à partir de polymères proches de la gélatine, mais qui présentent une quantité d'eau considérable. On leur incorpore des molécules qui contrôlent la fonction cellulaire et induisent la formation osseuse : ils forment une trame sur laquelle croît le nouvel os et évitent les cicatrices.

À l'Université du Michigan, Jeffrey Bonadio, Steven Goldstein et leurs collègues associent les concepts de thérapie génique et d'ingénierie des tissus : ils n'administrent pas directement les facteurs de croissance, mais insèrent les gènes qui les codent dans les cellules environnantes à l'aide de plasmides (des boucles d'ADN). Les cellules de l'organisme traitent les plasmides comme leurs chromosomes et fabriquent les facteurs de croissance (voir la figure 6). Cependant, l'ADN plasmidique n'est pas inclus dans l'ADN des cellules, de sorte qu'il finit par être dégradé, et la synthèse du produit s'arrête. Chez l'animal, des plasmides ont induit avec succès la reconstitution osseuse, mais la durée de ces effets reste à l'étude.

Lonnie Shea et l'un d'entre nous (D. Mooney) ont récemment montré chez des animaux que des polymères tridimensionnels biodégradables garnis de plasmides libèrent ceux-ci lentement et servent de cadres à la formation du nouveau tissu. L'ADN pénètre dans les cellules adjacentes lorsqu'elles migrent vers le réseau de polymères. Les cellules expriment alors les protéines sélectionnées : la formation d'un tissu est mieux contrôlée. Les médecins



3. CETTE OREILLE ARTIFICIELLE EN CARTILAGE attend d'être implantée. Les bioingénieurs ont créé cette structure semi-artificielle à partir d'un polymère mou.

devront maintenant apprendre à programmer l'intensité et la durée de production de molécules actives par les cellules qui captent les plasmides, afin de régler la formation de tissu.

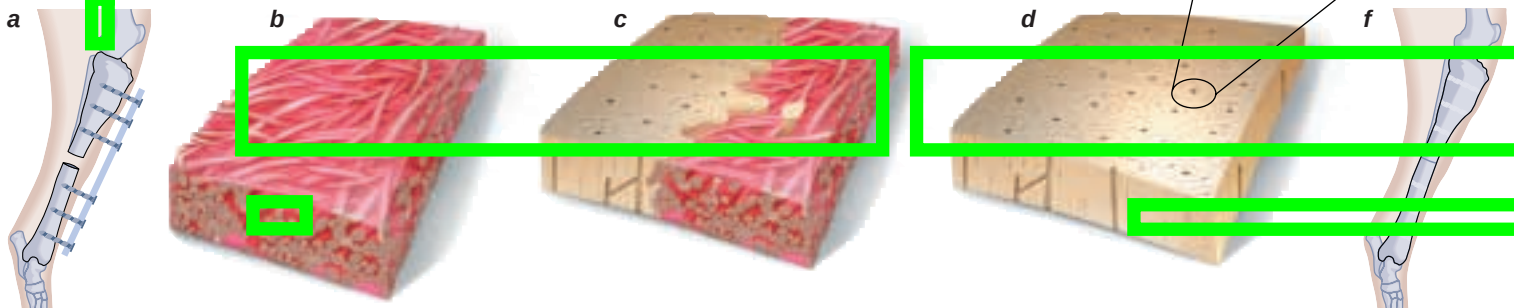
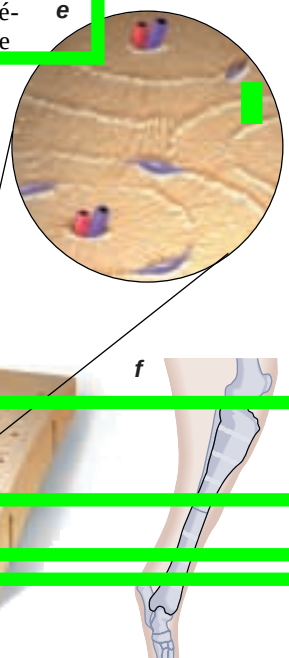
Une pincée de cellules

Le véritable objectif de l'ingénierie des tissus est encore plus ambitieux : on cherche à créer des néo-organes complets. La meilleure façon de faire croître des tissus et des organes est de faire confiance aux propriétés biochimiques de l'organisme. Dans les années 1970 et 1980, Ioannis Yannas, Eugene Bell et Robert Langer, de l'Institut de technologie de Massachusetts, ainsi que Joseph Vacanti, de l'École de médecine de Harvard, ont proposé de placer les cellules dans une matrice en trois dimensions et d'intégrer cette matrice dans l'organisme afin que la croissance se déroule dans cet environnement approprié plutôt que dans un environnement artificiel extérieur. Ce procédé est aujourd'hui testé sur quelques patients, notamment ceux atteints de plaies cutanées ou de lésions articulaires.

On commence par cultiver des cellules afin d'en obtenir un grand nombre, puis on les utilise pour ensemer une matrice constituée de polymères synthétiques ou de collagène, la protéine qui forme l'armature naturelle de la plupart des tissus. Cette matrice assure l'introduction des cellules dans l'organisme, et elle assure un environnement propice à la formation du tissu, dont elle guide le développement. On cherche aujourd'hui la méthodologie qui permettrait de fabriquer n'importe quel organe. On espère identifier les règles du développement des organes afin de cultiver des organes *in vitro*. En cas d'urgence, les chirurgiens utiliseront ainsi les organes préalablement réalisés au lieu d'attendre pendant des semaines, voire des mois, le développement d'un nouvel organe *in vitro* ou *in vivo*, à l'aide de facteurs de croissance.

Un peau vivante est déjà utilisée, et d'autres produits sont en cours d'agréement. Les besoins en peau sont urgents : chaque année, 7 000 Français souffrent d'ulcères diabétiques, dont la cicatrisation est particulièrement difficile ; 15 000 autres subissent des problèmes cutanés pour traiter des cancers de la peau ; et 3 000 bénéficient de greffes de peau pour brûlures graves.

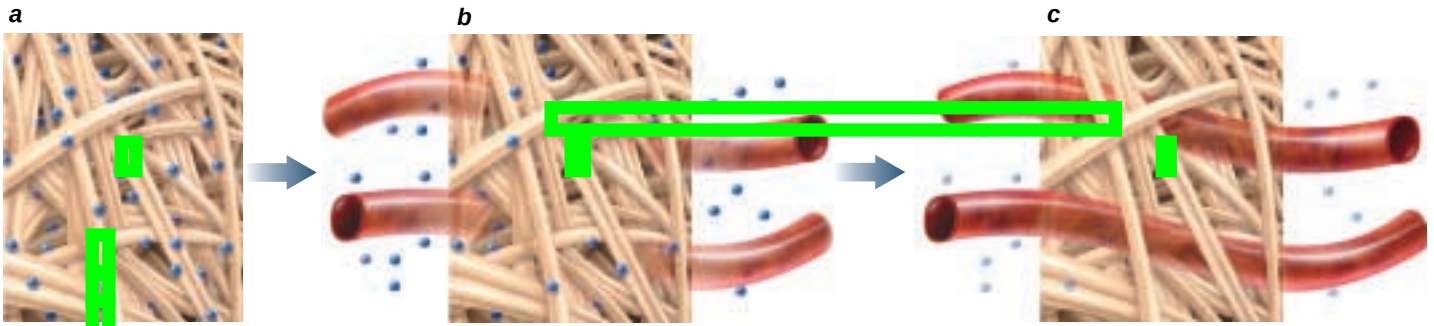
Le cartilage est le deuxième tissu le plus demandé ; on l'utilise pour des applications orthopédiques, craniofaciales



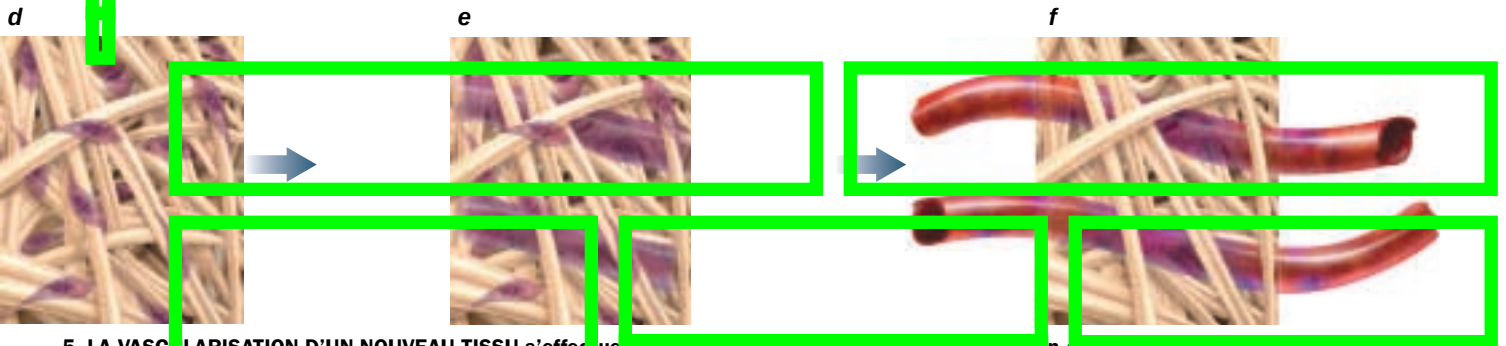
4. ON FAIT CROÎTRE DU TISSU OSSEUX pour combler l'espace entre deux segments osseux. L'os fracturé d'un chien est maintenu par des broches (a). On place, entre les segments osseux, une matrice en polymère où l'on a placé des protéines qui stimulent la crois-

sance osseuse (b). Progressivement, cette matrice est envahie par du tissu osseux (c), à mesure qu'elle se dégrade (d). Les cellules (e) possèdent leur propre système d'irrigation (vaisseaux en rouge et bleu). L'os de la patte est cicatrisé (f).

VAISSEAUX FORMÉS GRÂCE À DES FACTEURS DE CROISSANCE



VAISSEAUX FORMÉS GRÂCE À DES IMPLANTS CELLULAIRES



5. LA VASCULARISATION D'UN NOUVEAU TISSU s'effectue de deux manières. D'une part, des facteurs de croissance (*points de croissance*) inclus dans une matrice en polymère (a) diffusent dans l'environnement immédiat et favorisent la croissance des vaisseaux sanguins existants vers le polymère (b) ; les cellules qui se multiplient de chaque

côté se rejoignent et forment un seul vaisseau (c). D'autre part, des cellules endothéliales (*en mauve*) introduites dans le polymère (d) y prolifèrent, puis rejoignent le tissu naturel (e), où les nouveaux vaisseaux se combinent aux vaisseaux sanguins existants (*en rouge*) pour constituer un vaisseau continu (f).

et urologiques. Le cartilage disponible est insuffisant aux 130 000 opérations nécessaires annuellement en France pour réparer des articulations abîmées et pour effectuer 10 000 opérations de chirurgie réparatrice du visage et du crâne. Le cartilage a peu de besoins nutritifs et ne requiert pas la croissance de nouveaux vaisseaux sanguins.

Certaines lésions traumatiques du cartilage du genou sont aujourd'hui traitées par du cartilage cultivé à partir des propres cellules du patient : on cultive d'abord des cellules prélevées au genou blessé, puis on les implante. Une régénération complète dure 12 à 18 mois. À l'Université de Worcester, Charles et Joseph Vacanti ont découvert comment fabriquer du cartilage en forme d'oreille, de nez ou de diverses autres formes.

À l'École de médecine de Harvard, Anthony Atala teste un traitement des désordres urologiques dus à un manque de tonicité musculaire, tels l'incontinence ou le reflux vésical, en prélevant des cellules qui synthétisent le cartilage du patient. Après multiplication *in vitro*, il les réimplante et augmente le volume de l'urètre ou des

urètres (aujourd'hui, ces pathologies sont traitées par une chirurgie complexe ou par des injections de collagène qui se dégrade rapidement).

L'un de nous (D. Mooney), avec Walter Horder et Craig Halberstadt, du Centre médical de Charlotte, a utilisé ces techniques pour résoudre le problème de la biocompatibilité des prothèses mammaires. Après culture des cellules prélevées dans la jambe ou dans la fesse, on remplace un sein cancéreux par une matrice de polymère biodégradable qui intègre les cellules. La croissance cellulaire, parallèlement à la dégradation de la matrice, forme un nouveau tissu. Ce dernier ne contient pas les divers types de cellules qui constituent un sein véritable, mais on évite ainsi les prothèses mammaires synthétiques.

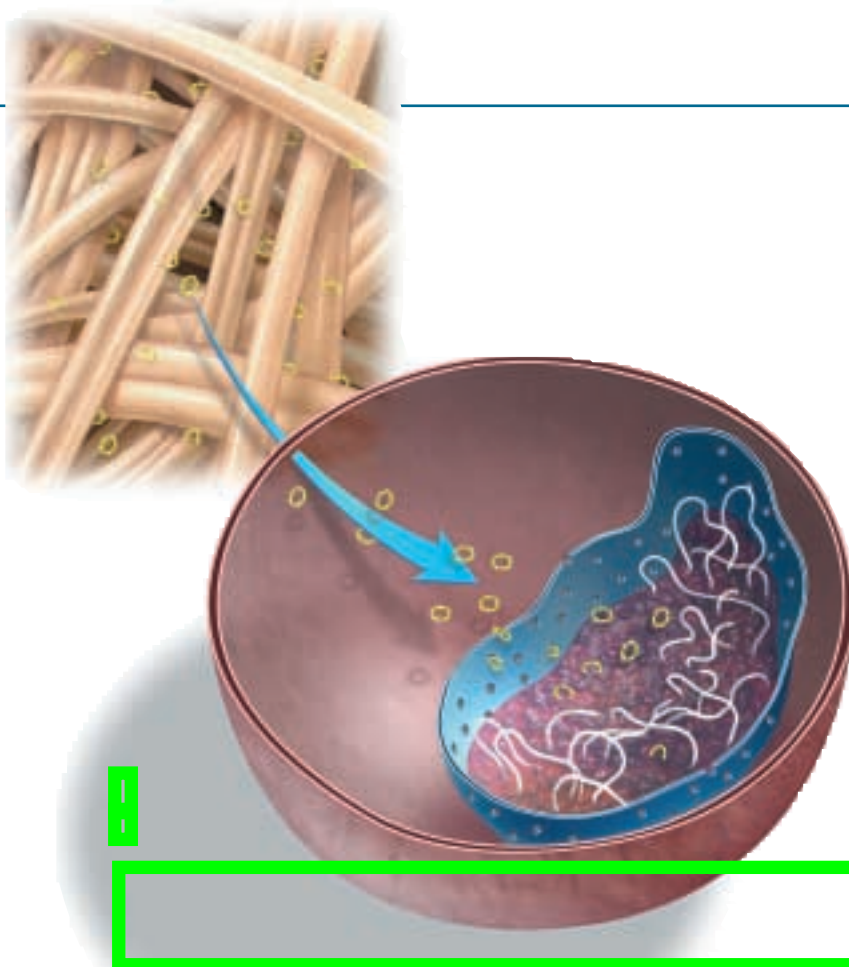
Les succès obtenus lors de tests avec des animaux font penser que l'on parviendra même à réaliser des néo-organes de grande taille, composés d'un ou de plusieurs types de cellules. L'un de nous (A. Mikos) a récemment fait croître du tissu osseux sur des polymères biodégradables en transplantant des cellules prélevées dans la moelle osseuse. De

plus, les cellules transplantées constituent un nouveau mode d'administration de facteurs de croissance, car elles en produisent localement.

Recettes à venir

Plus les néo-organes sont gros, plus leur réalisation est difficile. Nous l'avons vu, les tissus volumineux doivent être bien irrigués. On peut naturellement placer des cellules nécessaires et des composés qui stimulent l'angiogenèse dans les matrices de polymère, mais on peut aussi créer, avant la transplantation, un réseau de vaisseaux sanguins dans les néo-organes ; à cette fin, on incorpore dans la matrice des cellules initiateurs de vaisseaux sanguins qui se connecteront aux vaisseaux environnants.

Les essais ont confirmé que des vaisseaux sanguins «préfabriqués» se connectent effectivement. Ces nouveaux vaisseaux proviennent d'un mélange de cellules implantées et de cellules hôtes. Toutefois, cette technique est inefficace lorsque le nouveau tissu est transplanté sur un site où les vaisseaux sanguins ont été endommagés



Keith Kasrot

6. DES PLASMIDES, c'est-à-dire des boucles d'ADN (en jaune), sont libérés par une matrice de polymère ; ils s'intègrent à une cellule de l'organisme qui synthétisera les protéines codées par l'ADN. Ce procédé est plus durable, car les protéines sont dégradées plus rapidement que les plasmides.

par un traumatisme ou par une thérapie anticancéreuse. On doit alors cultiver le tissu en un autre endroit de l'organisme avant qu'il soit implanté où il est nécessaire. Par exemple, un os maxillaire peut croître en liaison avec un os de la jambe bien vascularisé chez un patient atteint d'un cancer buccal, qui, à la suite d'une radiothérapie, souffre d'un défaut de vascularisation de la mâchoire.

Par ailleurs, nous tentons d'améliorer les propriétés des polymères biodégradables qui détermineront exactement la taille et la forme du tissu construit, contrôleront avec précision la fonction des cellules à son contact et s'adapteront à une vitesse en synergie avec celle de la formation du tissu.

Le graal de notre discipline reste l'organe complet. Comment obtenir un foie fonctionnel, par exemple, assurant toutes ses réactions chimiques

essentiels pour la vie? Plus de 10 000 personnes mourant chaque année, en France, d'une insuffisance hépatique, l'étude des néo-foies est amplement justifiée. Les bio-ingénieurs ont d'abord étudié la capacité de régénération partielle du foie, bien connue de Prométhée.

Des médecins ont vérifié que l'on obtient du tissu hépatique quand on greffe des cellules hépatiques à des animaux. De notre côté, nous avons mis au point des biomatériaux adaptés à la croissance des tissus de type hépatique et nous avons identifié des composés qui favorisent la croissance des cellules hépatiques transplantées. Les tissus hépatiques régénérés assurent certaines fonctions chimiques du foie, mais jamais la fonction de l'organe entier.

De même, grâce à des cellules rénales, David Humes, de l'Université du Michigan et A. Atala ont fabriqué

des néo-organes capables de filtrer le sang, tandis que l'équipe de J. Vacanti a montré que l'on peut développer de l'intestin dans la cavité abdominale d'un animal, puis le raccorder au tissu intestinal préexistant. Ces néo-intestins soulagent les patients atteints d'un raccourcissement de l'intestin, conséquence d'un défaut congénital ou d'un traumatisme, et qui perturbe le développement des enfants. Aujourd'hui, le seul remède est la greffe d'intestin, mais la pénurie d'organes limite les possibilités thérapeutiques. A. Atala a également montré que l'on peut former de cette manière une vessie complète et l'utiliser pour remplacer la vessie d'origine.

Le cœur, enfin, est activement étudié. Michael Sefton et ses collègues de l'Université de Toronto espèrent faire croître des cœurs : 10 à 20 ans leur seront probablement nécessaires pour réussir, mais ils obtiendront certainement avant des tissus, tels les valves cardiaques et les vaisseaux sanguins.

Comment prévoir les progrès de ces études? L'exercice est difficile, mais la consultation des spécialistes donne des ordres de grandeur raisonnables. Il faudra probablement cinq ans pour obtenir des peaux reconstruites entièrement fonctionnelles. En revanche, nous ne croyons pas que cinq ans suffisent pour mettre au point des foies entiers prêts à être implantés : comptons plutôt 30 ans.

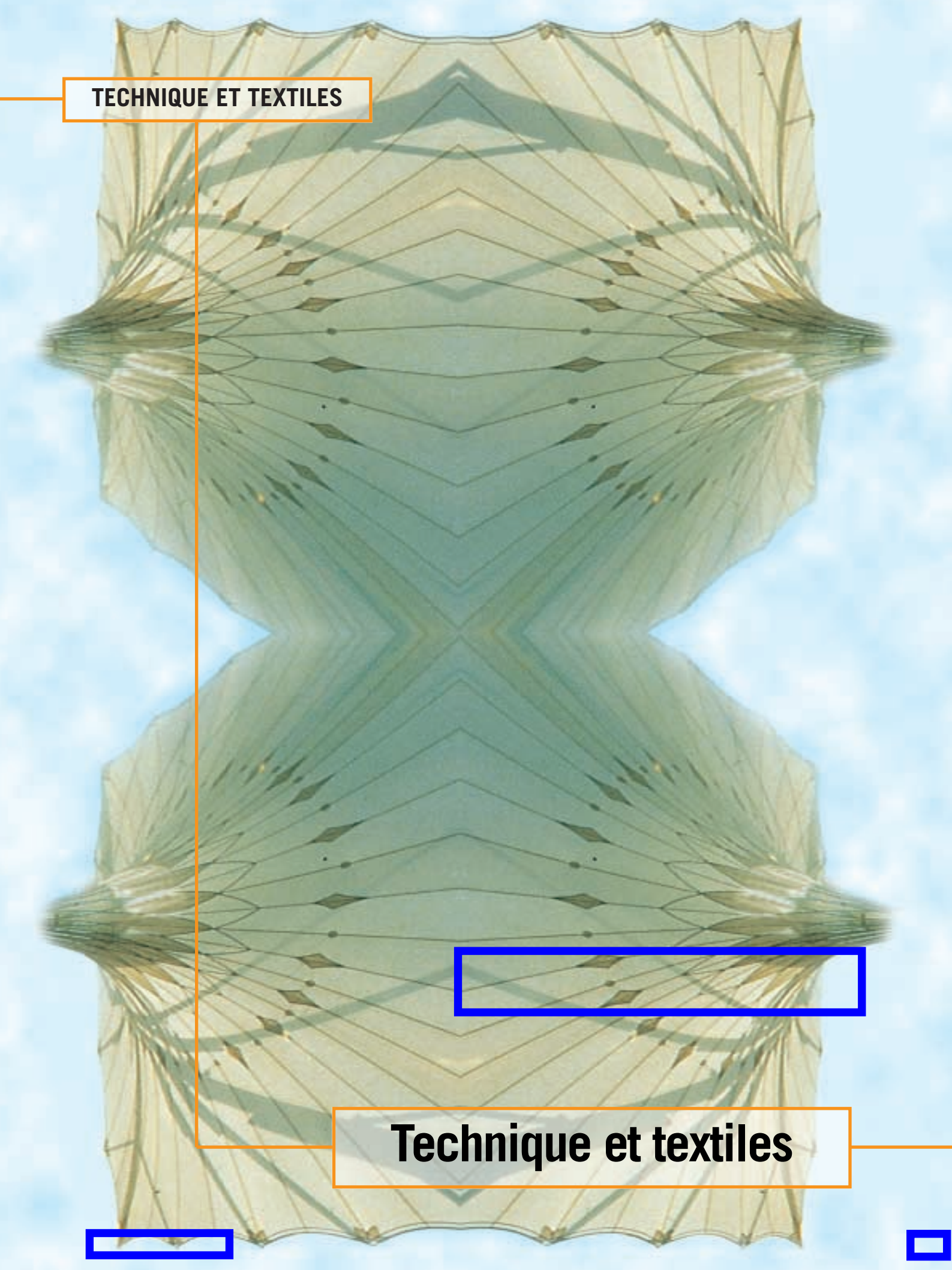
Il y a 10 000 ans, l'agriculture a donné à l'humanité les moyens de se nourrir même lors des années de pénurie. L'ingénierie des tissus nous affranchira peut-être des limites de notre propre corps.

David MOONEY est professeur de biologie à l'Université du Michigan. Antonios MIKOS est professeur de bio-ingénierie à l'Université Rice.

Carol EZZELL, *Tissue Engineering and the Human Body Shop: Designing «Bio-artificial Organs»*, in *Journal of NIH Research*, vol. 7, n° 7, pp. 49-53, juillet 1995.

Principles of Tissue Engineering, sous la direction de R.P. Lanza, R. Langer et W.L. Chick, R.G. Landes, 1997.

Frontiers in Tissue Engineering, sous la direction de Charles W. Patrick, Jr., Antonios G. Mikos et Larry V. McIntire, Pergamon Press, 1998.



TECHNIQUE ET TEXTILES

Technique et textiles

Les textiles techniques

KLAUS

Nous savons évidemment que des textiles sont utilisés pour l'habillement, la literie, la tapisserie, les tentes, les stores... En revanche, on ignore souvent que des textiles spéciaux, dits techniques, composent des systèmes variés, des films d'emballage aux coussins autogonflants pour les automobiles.

L'homme travaille les fibres animales et végétales depuis au moins 5 000 ans ; il réalise ainsi des vêtements, des ustensiles domestiques, mais aussi des cordes, des câbles, des filets et des voiles, des bâches en feutre et en tissu, des tentes, des nattes et des tapis.

Les premières productions industrielles furent des tissus. Mécanisés très tôt, la filature, le tissage et le tricotage sont aujourd'hui entièrement automatisés. La chimie a fait considérablement progresser l'industrie textile ; on lui doit notamment des fibres synthétiques, qui composent des textiles classiques ou des textiles techniques. Le secteur des textiles s'est diversifié, à la demande des utilisateurs qui ont réclamé des textiles adaptés à leurs besoins variés ou en raison de la concurrence entre les entreprises de textiles, qui ont voulu élargir leur offre. Quatre à cinq millions de tonnes de fibres sont destinées à des usages techniques, chaque année, dans le monde.

La diversité du textile technique

Depuis quelques années, l'industrie du textile technique progresse et se spécialise, tandis qu'elle réapprend à utiliser des fibres naturelles. On distingue deux sortes de textiles techniques : les souples et les durs, qui servent à armer d'autres matériaux pour fabriquer des composites. On les classe également par catégories selon leurs utilisations. On parle ainsi de textiles de protection, de « géotextiles », de textiles de construction, d'« agrotextiles », de textiles médicaux et de textiles industriels. Les quelques exemples présentés dans cette partie donnent un aperçu général des applications de ces diverses catégories de textile, dont les limites sont d'ailleurs assez floues.

Les vêtements qui protègent du froid sont composés de textiles techniques, contrairement à ceux qu'on porte à la maison ou pour aller faire des courses en ville. L'Institut de recherche et d'essais des matériaux

de Leibniz en étudie un, qui contient des microcapsules d'un matériau à changement de phase : il stocke, puis restitue une grande quantité de chaleur, en changeant de phases selon la température de la peau. Ces microcapsules récupèrent la capacité calorifique des fibres acryliques grâce à l'air qu'elles y emprisonnent. Avec elles, on fabrique des vêtements fins, non doublés, pour les grands froids.

Sur l'île de Ténérife, aux Canaries, des films étanches en textile enduit, extrêmement résistant aux intempéries, tapissent le cratère du volcan éteint Taco : un réservoir de 825 000 mètres cubes (voir la figure 1) améliore l'irrigation des cultures.

Dans les Alpes, une toile de jute empêche temporairement l'érosion par le vent, par les glissements de terrain, et permet la croissance des plantes, en améliorant leur enracinement. Elle se dégrade finalement en humus. À la surface de la mer, un tuyau tissé dont les fibres sont des céramiques réfractaires, déposé par des remorqueurs, confine les nappes de pétrole, de sorte qu'on peut les contrôler sans danger. Des nappes à base de polypropylène sont également utilisées dans des applications similaires (voir la figure 2) : ce polymère lipophile aspire le pétrole par les pores du textile. Quand on lui ajoute des tensioactifs (des molécules qui se lient à la fois à l'eau et aux molécules hydrophobes), on peut aussi capter des rejets industriels, sans qu'il y ait modification de la structure du matériau de la nappe.

En architecture, on utilise des textiles solides et résistants aux intempéries pour les constructions légères. Ils servent à réaliser des édifices temporaires, tels les halls d'exposition, ou



Hochst, Trewa, Frankfurt am Main

1. LE CRATÈRE du volcan Taco, sur l'île de Ténérife, est tapissé d'un tissu étanche. Il sert de réservoir d'eau pour l'agriculture.

des édifices permanents, tels les six parasols géants installés dans les deux cours intérieures de la mosquée de Médine. Chaque parasol, enduit de polytétrafluoroéthylène, mesure 18 mètres de longueur et 17 mètres de largeur. L'ensemble se déploie en 90 secondes pour former une protection contre le soleil, à 14 mètres de haut (voir la figure 3) ; en outre, le textile des parasols retient l'air frais que soufflent les piliers.

Dans l'industrie du bâtiment, les textiles sont aussi une source d'innovations. Des structures creuses à double paroi textile parallèles, reliées par des fils qui leur sont perpendiculaires, récemment utilisées en Europe et aux États-Unis, ménagent un espace où gaz, liquides et poussières peuvent circuler. On peut aussi le remplir de matériaux solides, des élastiques ou des matériaux thermodurcissables (mousses, béton). On sait varier les propriétés des deux parois textiles ; la distance qui les séparent peut atteindre un mètre.

Dans les champs et dans le corps

Avec les agrotextiles, dont la perméabilité à la lumière, à l'air et à l'eau est réglable, on construit des serres atteignant 80 mètres de longueur et 40 mètres de largeur, où les machines agricoles ont la place de circuler. D'autre part, des voiles «à respiration active» protègent les récoltes de plein champ : ils laissent passer l'air et la vapeur d'eau, mais limitent les échanges thermiques, évitant une chaleur excessive ou le gel. En réglant leur opacité, on blanchit certaines cultures au cours de leur croissance, par exemple les salades ou les poireaux. On envisage même des agrotextiles dont les fibres contiendraient des substances actives, telles des bactéricides, qu'on libérerait selon les besoins des cultures. Ce système réduirait la consommation de pesticides et d'engrais que la culture classique et il reviendrait moins cher.

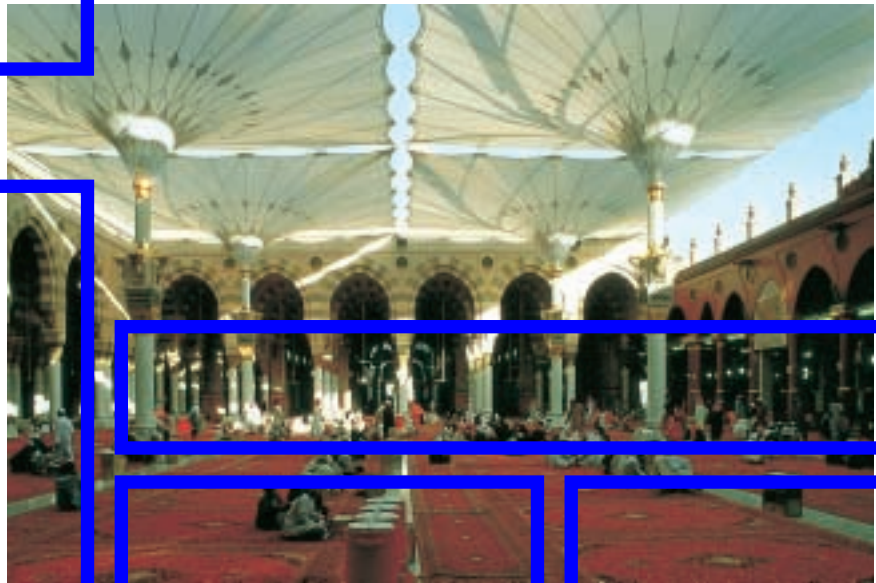
Les textiles médicaux aux propriétés cicatrisantes, après les interventions chirurgicales. On utilise déjà du matériau de suture et de fermeture des plaies qui se résorbe spontanément. Des implants textiles, en cours de mise au point, contiendront des cel-



2. EN ABSORBANT le pétrole répandu à la surface de l'eau, des tuyaux en fibres de polypropylène (à gauche) limitent l'extension d'une marée noire. Des fibres contenant des tensioactifs (à droite, grossissement 5 200) sont capable d'absorber les polluants aqueux et les rejets industriels.



3M, Deutschland, Neuss



Leichtbau, Leinfelden

3. DANS LES COURS INTÉRIEURES de la mosquée de Médine, des textiles enduits de polytétrafluoroéthylène protègent les fidèles du soleil, en été. En hiver, les parasols sont fermés le jour et ouverts la nuit, pour retenir la chaleur. Ils se déploient en 90 secondes, grâce à un système de commande hydraulique, et forment un toit à 14 mètres du sol. Les mâts de ces parasols, les plus grands jamais construits, soufflent de l'air frais.

lules qui stimulent la formation de matière osseuse ou de peau neuve. Ils libèrent des principes actifs dans l'organisme, de façon régulière et prolongée. Pour l'instant, les biologistes essaient d'augmenter la biotolérance aux textiles.

Enfin, les textiles industriels sont présents dans des matériaux composites. À résistance égale, ces derniers sont plus légers que les matériaux classiques. Cependant leur résistance n'est pas isotrope : les composites supportent les contraintes dans la direction perpendiculaire aux fibres. Aussi des constructeurs ont-ils remplacé des fibres par des textiles. Le Centre européen de composites Dupont, à Bad Homburg, a mis au point un textile imprégné de matière synthétique,

nommé organotôle. Après chauffage par un rayonnement infrarouge, il est thermosable en pièces tridimensionnelles. Les premières applications des organotôles étaient des casques pour cyclistes et des vélos ultra légers. D'autre part, des composites contenant des textiles, des fibres de carbone et du métal, souvent de l'aluminium ou du magnésium, sont à l'étude. Ils seraient légers, et auraient en même temps une résistance mécanique et chimique élevées. Ils seraient utilisés dans les véhicules aéronautique, spatiaux, ferroviaires et automobiles.

Klaus-Dieter LINSMEIER est rédacteur à la revue *Spektrum der Wissenschaft* (édition allemande de *Scientific American*).

Des textiles à trois dimensions

JÜRGE

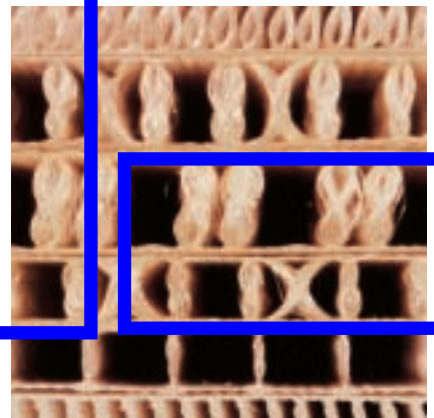
Grâce à la mise au point de nouvelles techniques de tissage, tressage, tricotage, etc., les textiles ne sont plus limités à deux dimensions. Ces innovations répondent aux exigences des applications techniques, tel le renfort de composites.

Aujourd'hui, les textiles ont une place importante dans l'industrie mais, depuis 20 ans, les importations de tissus d'Europe méridionale et d'Asie font chuter les prix dans le secteur de l'habillement et de l'aménagement. Pour être compétitifs, les industriels européens automatisent leur production, emploient des techniques innovantes et mettent au point des textiles techniques.

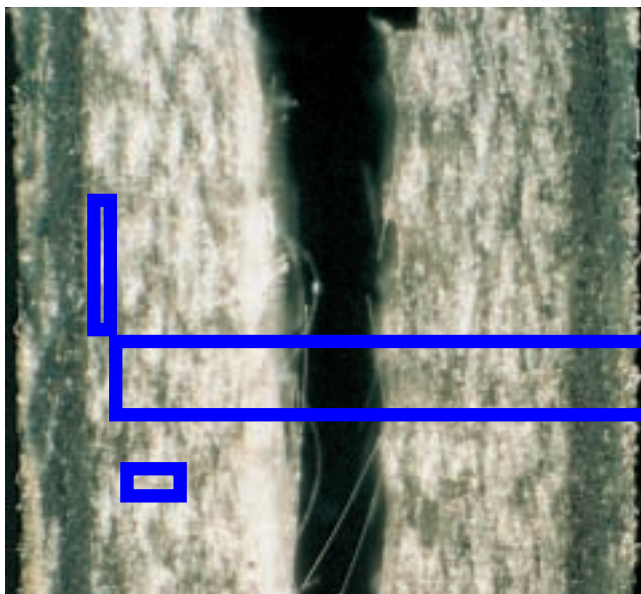
Dans les composites, par exemple, la matrice polymère est renforcée avec des textiles, souvent en fibres de verre ou de carbone. La rigidité, la résistance mécanique élevée et la légèreté des composites intéressent l'industrie aéronautique et spatiale : les ailettes qui assurent la stabilité de l'Airbus et les pales de rotor des hélicoptères sont

en composite. Dans la matrice, les textiles sont orientés en fonction des contraintes que subit le composite : ils sont placés parallèlement aux forces de traction et à 45 degrés des forces de cisaillement.

La fabrication manuelle de textiles de renfort est fastidieuse et ne se justifie que pour des pièces uniques ou pour des petites séries. Aussi les ingénieurs ont cherché des méthodes rationnelles où interviennent le tissage, le tressage, le tricotage et la couture, pour fabriquer des textiles de renfort adaptés à leurs applications. Ces méthodes ont fait entrer les composites dans l'industrie automobile, où l'allègement de certaines pièces réduit la consommation d'énergie et les émissions de polluants.

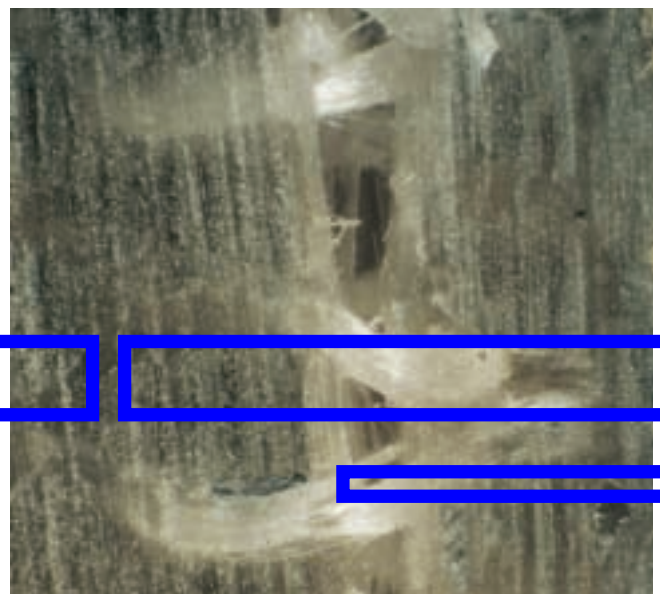


1. CE RÉSEAU TRIDIMENSIONNEL tissé est un renfort pour des composites de type «sandwich» : on l'imprègne d'une résine injectée à la fois par-dessus et par-dessous. Les deux couches de fibres externes sont fortement liées par un système de fils orientés dans l'épaisseur du tissu.

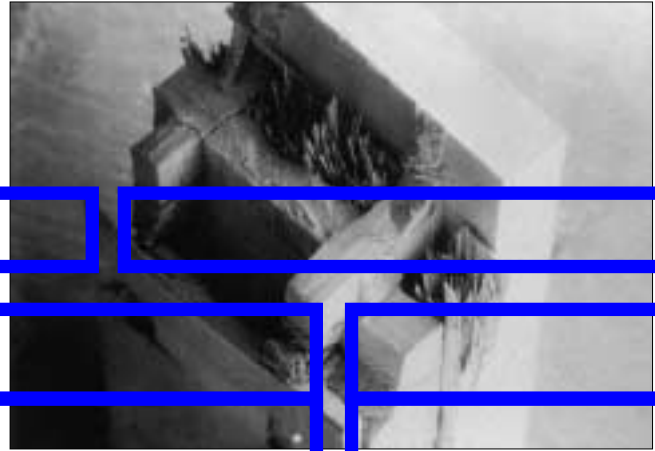
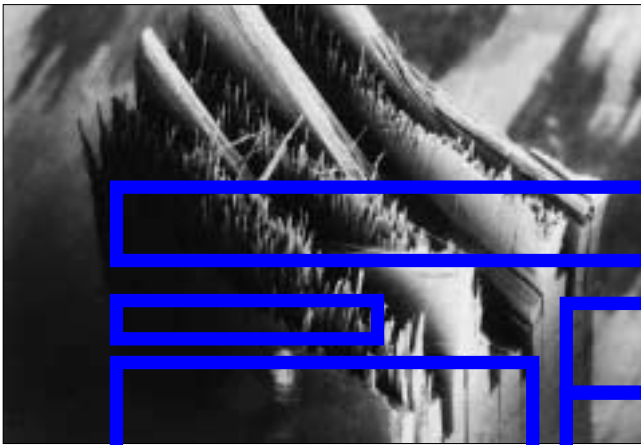


Daimler-Benz Forschung

2. LES FISSURES se propagent dans les composites à fibres classiques, parce que les couches de textiles, faiblement liées, peuvent se détacher (à gauche). Les composites à renforts textiles tridi-



mensionnels n'ont pas cet inconvénient : les différentes épaisseurs de fils de chaîne et de trame sont liées par un système de fils qui leur sont perpendiculaires (à droite).



3. CE COMPOSITE À FIBRES CLASSIQUE, (à gauche, grossi 12 fois) présente plusieurs couches qui se séparent lors de la rupture. Au contraire, un composite à renfort textile tridimensionnel présente une meilleure

cohésion grâce aux fibres orientées dans le sens de l'épaisseur (à droite, grossi 19 fois). Ces deux photographies ont été prises au microscope électronique à balayage.

Le tissage spatial

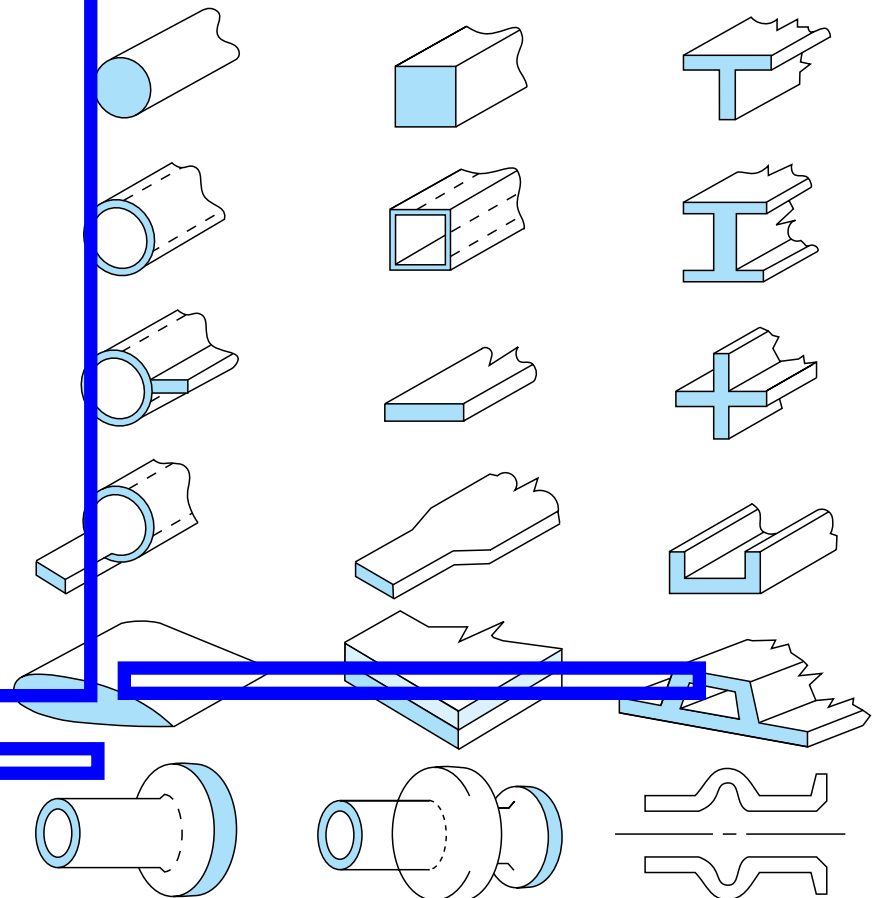
En Allemagne, un programme commencé en 1985 a favorisé l'innovation dans le domaine du tissage : des sociétés de l'industrie aéronautique et spatiale et de l'industrie textile ont d'abord reconnu que les tissus classiques, fabriqués en croisant des fils de chaîne et des fils de trame, sont limités à deux dimensions ; après quatre années de recherches, elles ont produit des textiles en trois dimensions, où des fils, orientés dans le sens de l'épaisseur, relient plusieurs couches (voir la figure 1). Ces textiles sont utilisés comme renforts d'éléments de construction. Auparavant on empilait plusieurs couches dans la matrice, les unes après les autres, pour obtenir la résistance désirée ; les tissus tridimensionnels sont incorporés en une seule étape. Ils améliorent la qualité du matériau, car ils absorbent les impuretés de la matrice, qui provoquent parfois la défaillance des composites classiques. Alors que ces derniers résistent mal aux essais de pelage, où le matériau fissuré est soumis à une traction, les tissus tridimensionnels empêchent presque totalement la propagation des fissures dans les composites (voir la figure 2). Ils évitent la delamination, c'est-à-dire le détachement successif des couches de fibres de renfort, qui engendre des ondes de choc et contribue à la rupture globale. C'est particulièrement utile dans le cas des composites à fibres de carbone, où les délaminations sont invisibles de l'extérieur. Les tissus tridimensionnels évitent ainsi les

inspections préventives, coûteuses, des structures qui contiennent des composites classiques.

Des groupes de chercheurs français et anglais, notamment du secteur aérospatial, ont également fabriqué des tissus tridimensionnels, mais selon une technique différente.

Les produits obtenus sont des profilés creux où l'orientation des fibres est optimisée.

La tenue à la rupture en traction et en compression des composites à renforts textiles tridimensionnels est meilleure que celle des composites à renforts textiles classiques (voir la



4. QUELQUES FORMES que l'on peut fabriquer par tissage.

Daimler-Benz Forschung

figure 3), même quand le système de tissage tridimensionnel réduit le nombre de fils de chaîne et de trame, et donc la résistance du tissu. La technique de tissage mise au point à l'Université de Caroline du Nord pallie cet inconvénient, car les fils de chaîne et de trame ne sont pas courbés au cours du tissage, de sorte que leurs propriétés physiques sont mieux exploitées et que la résistance des tissus tridimensionnels qui en procèdent est la

même que celle des tissus classiques (voir la figure 5).

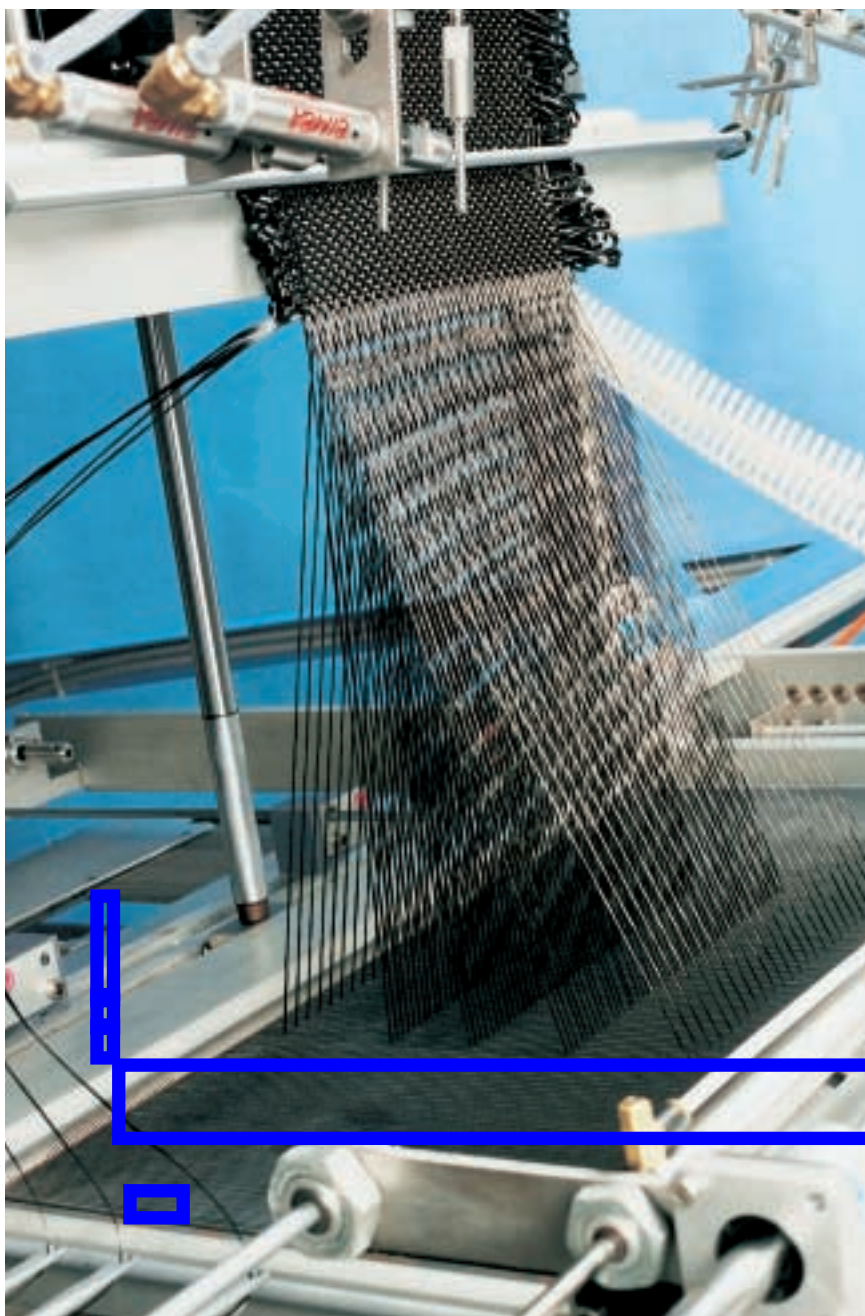
Les tricots multiaxiaux ont aussi une bonne tenue à la rupture (le terme de tricot est réservé aux textiles fabriqués par formation de mailles). Les fils de chaîne et les fils de trame ne se croisent pas à angle droit, contrairement au cas du tissage. Plusieurs épaisseurs de fils de chaîne et de trame, au maximum sept, sont liés par un troisième système de fils.

Tressage et tricotage

Alors que le tissage spatial et le tricotage multiaxial engendrent des objets plats, le tressage (où les fils de chaîne et de trame se croisent à 45 degrés) sert plutôt à réaliser des objets tridimensionnels, principalement des profilés (voir la figure 4), comme les raccords de treillis ou les tuyères de fusées. Les premiers ont été réalisés à l'Université de Pennsylvanie et à l'Université de Caroline du Nord : on fabrique d'abord une pièce support, en mousse ou en cire, que l'on enlève ensuite, après l'avoir entourée de textile tressé (voir la figure 6). Pour les pièces de protection contre les chocs, on utilise une mousse qui absorbe l'énergie et qui n'est pas enlevée après l'étape de tressage. L'Institut des techniques textiles d'Aix-la-Chapelle et ses partenaires industriels cherchent à piloter le tressage tridimensionnel, par ordinateur. C'est un tressage fil par fil, donc coûteux. Les profils formés peuvent avoir des sections variées. L'orientation des fibres est optimisée, dans chaque secteur de la structure, comme dans les plantes. L'industrie automobile combine le tressage à d'autres techniques afin d'orienter les fibres dans plusieurs directions différentes ; on fabrique ainsi les sangles qui assurent la rigidité des profilés en T.

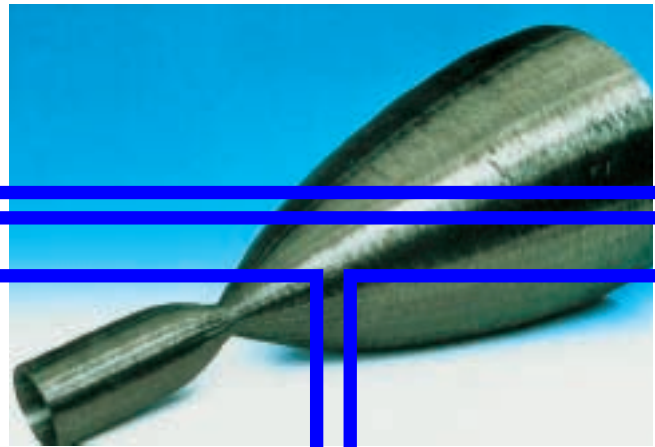
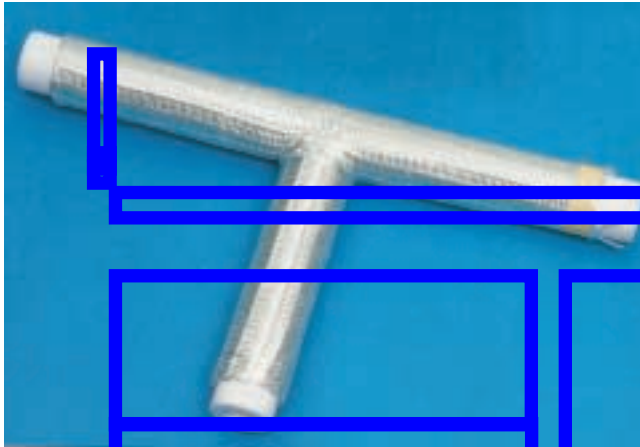
Le tricotage consiste à faire passer des fils à travers des mailles existantes pour en former de nouvelles. Les fibres ainsi courbées supportent moins bien les charges, mais leur organisation spatiale est plus souple. En Allemagne, on a mis au point une machine à tricoter, dotée d'un système de conception assistée par ordinateur. Elle produit des pièces variées, de toutes formes, par exemple pour rigidifier les raccords en T (voir la figure 7) ou pour les revêtements intérieurs des carrosseries de moto. Un projet de recherche européen vise à améliorer les propriétés mécaniques des composites renforcés avec des tricots, à l'aide de fils de trame rectilignes.

Malgré les progrès du tissage, du tressage et du tricotage, on ne produira vraisemblablement jamais de textiles aussi complexes qu'une carrosserie de voiture ou qu'un fuselage d'avion. Pour obtenir des pièces textiles complexes, on doit fabriquer



North Carolina State University

5. MACHINE DE TISSAGE tridimensionnel, où les fils de chaîne et de trame sont tissés sans courbure, ce qui compense leur faible proportion (par rapport à un tissu classique) et rend le textile plus résistant aux tractions longitudinales.



6. CE RACCORD tressé (à gauche) se fabrique en une seule étape. Le textile en carbone (à droite) renforce les tuyères de fusées.

chaque partie séparément, en choisissant la technique textile la mieux adaptée (en terme de propriétés mécaniques et de coût), puis assembler les parties par couture.

Les systèmes assistés par ordinateur déterminent la division des objets de forme complexe et de grande surface en plusieurs petites pièces. Par exemple, on coud des tricotés multiaxiaux et des profils tressés avec des fils de haute ténacité afin de fabriquer des plaques nervurées d'avions. L'assemblage par couture est plus solide que le collage : les couches externes de tricot ne se détachent pas aussi facilement, et les nervures qu'elles constituent supportent mieux les chocs.

Pour améliorer les propriétés mécaniques d'un composite à renfort textile, on peut aussi renforcer ce textile aux endroits où s'exercent les con-

traintes mécaniques maximales, en cousant des renforts supplémentaires. Les ordinateurs calculent leur orientation à l'aide d'une méthode d'optimisation qui simule une croissance quasi biologique, en optimisant la répartition des charges, même pour des géométries complexes. Les bases de cette technique ont été élaborées à l'Institut de recherche des polymères de Dresde (voir *Les renforts textiles brodés*, par Konrad Glesne, page 182).

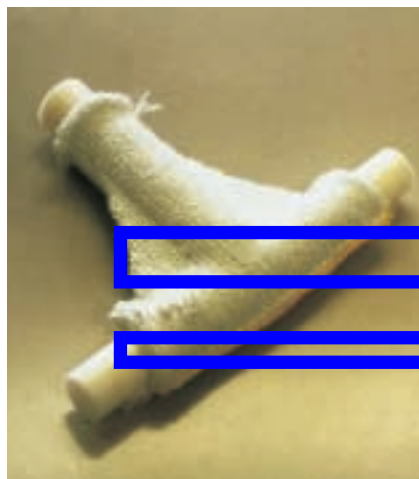
Des renforts textiles aux composites à fibres

L'imprégnation des renforts textiles par une résine est étudiée depuis plusieurs décennies. La technique de moulage par transfert de résine garantit une répartition homogène de la matrice tout en minimisant les inclusions d'air (retassures) : on dépose le renfort textile préformé dans un moule étanche, puis on injecte la résine. Après durcissement, on démoule la pièce et on la découpe à l'aide d'un jet d'eau rapide, par exemple. On produit ainsi des pièces en moins de cinq minutes. Si la résine époxy est la plus couramment employée (elle représente 50 pour cent des résines utilisées dans la fabrication de composites), les résines thermoplastiques peuvent imprégner les fibres dès l'étape de fabrication du renfort textile ; on chauffe ensuite la structure obtenue à une température supérieure à la température de fusion de la résine et on la presse, pour que celle-ci remplisse les espaces entre les fibres. D'autres méthodes d'imprégnation ont été mises au

point : dans le dépôt en phase vapeur, le tissu est enduit par bombardement de particules ; dans les techniques d'infiltration chimique sous vide, la matrice, en carbone ou en silicium par exemple, pénètre à l'état gazeux et à haute température entre les filaments du textile. On fabrique ainsi des composites à matrices céramiques, résistant à des températures de plus de 1500 degrés, dont les propriétés mécaniques devraient être améliorées, notamment par rapport à la céramique frittée, grâce à l'inclusion de renforts textiles tridimensionnels.

Avec les techniques dont on dispose aujourd'hui, on sait produire des composites en série. Des bords d'attaque d'empannages verticaux d'avions et des supports de moteur de voitures ont déjà été réalisés en laboratoire. Le coût des composites à renforts textiles tridimensionnel sera sans doute inférieur à celui des composites à fibres classiques. Bientôt, ces nouveaux matériaux seront utilisés pour la construction aéronautique. En revanche, avant qu'ils soient employés dans la construction automobile, on devra trouver des concepts structurels nouveaux, adaptés aux matériaux utilisés dans ce secteur et des méthodes de diagnostic des défaillances et de réparation.

Jürgen BRANDT dirige le Département matières plastiques du Centre de recherche de la Société Daimler-Benz à Ottobrunn. Klaus DRESCHLER est responsable des procédés plastiques, dans ce département.



7. CE RACCORD EN T est rigidifié par un tricot tridimensionnel.

Les renforts textiles brodés

KONRAD GLIESCHE

On peut améliorer la résistance de composites en ajoutant des fils sur leurs tissus de renfort en fonction des principales contraintes.

La broderie est une technique connue depuis l'Antiquité : on ajoute des fils à des textiles déjà tissés ou tressés, le plus souvent à des fins décoratives. La quantité de fils ajoutés, leur disposition et la manière de les ajouter varie à l'infini. Depuis le XIX^e siècle, la broderie se mécanise. Grâce à des pilotages par ordinateur, les machines modernes, automatiques et multi-têtes, réalisent toutes sortes de motifs, à grande vitesse (500 à 1 000 points à la minute) et avec une parfaite uniformité, pour l'industrie de l'habillement.

Leur principe est le même que celui des machines à coudre familiales qui appliquent des rubans, des fils ou des cordelettes sur des tissus. Le fil supérieur (celui de l'aiguille) traverse le tissu avant de passer dans un crochet qui le noue avec le fil du dessous (voir la figure 3). Lorsqu'on lève l'aiguille, le fil se tend et le pied presseur libère le textile, qui est alors déplacé pour le point suivant. Les machines à broder déplacent le tissu dans n'importe quelle direction grâce à des moteurs pas-à-

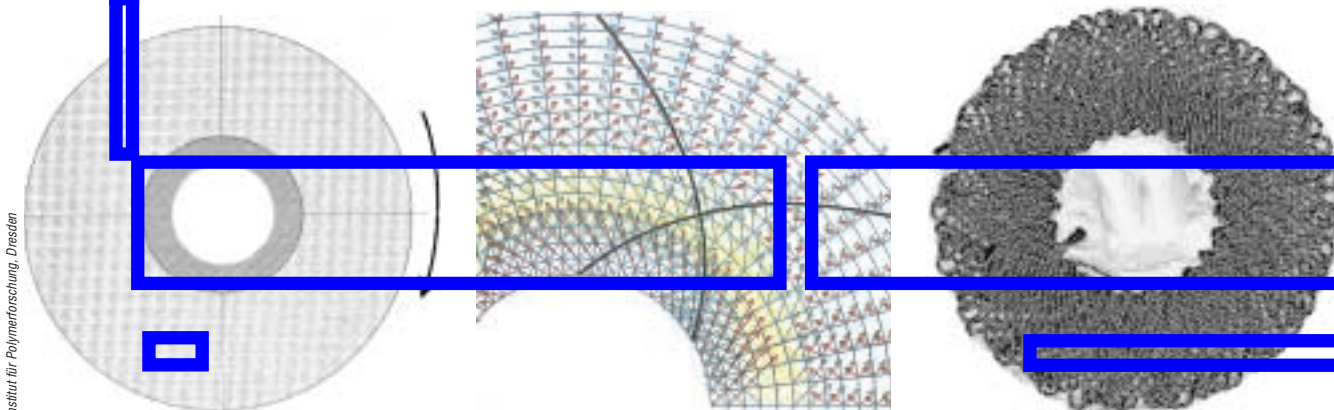
pas à commande électronique, tandis que la tête brodeuse reste fixe. Seule la taille de la machine limite celle du motif. Les systèmes multi-aiguilles actuels entièrement automatiques, ont jusqu'à 16 fils supérieurs par tête. Ils brodent des motifs très grands, de couleurs vives, introduisant des fils, des rubans et des cordelettes dans les tissus. Les machines à broder industrielles les plus perfectionnées sont équipées de 20 têtes (voir la figure 2).

Pour programmer les contours d'un motif de broderie, la commande de la machine fonctionne de la même manière qu'un système de conception assistée par ordinateur. On scanne par exemple le dessin d'un motif, puis on élabore le programme par interpolation des données ainsi obtenues.

Notre collègue Horst Rothe a étudié l'utilisation de la broderie pour renforcer des textiles de composites. La rigidité et la résistance mécanique de ces matériaux est maximale dans la direction des renforts. Jusqu'à présent, seules des pièces soumises à des forces orientées dans des directions

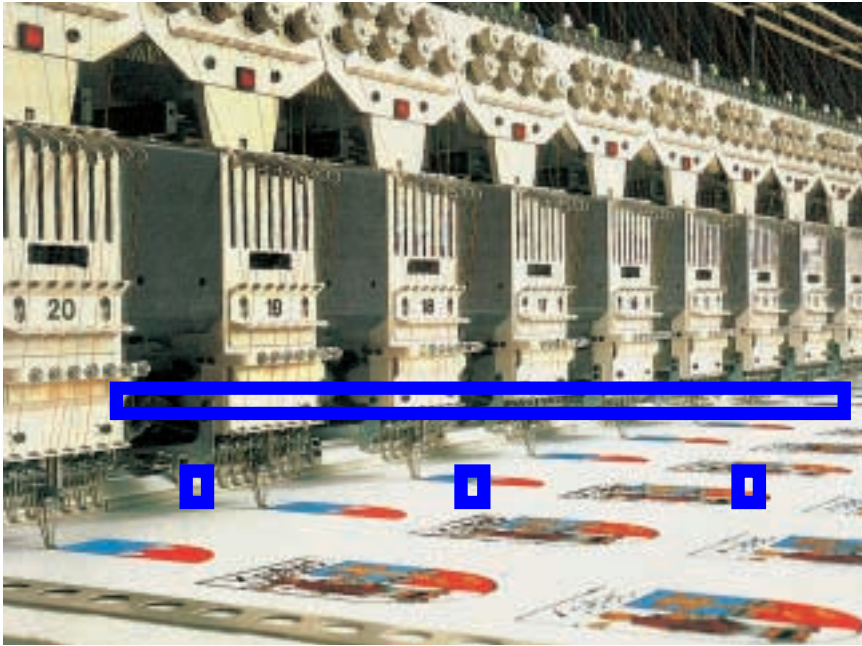
bien déterminées, par exemple des réservoirs sous pression étaient renforcées avec des textiles, tels des tissus et des tricots multi-axiaux (voir *Des textiles à trois dimensions*, par Jürgen Blandt et Klaus Dreschler, page 138). Dans les autres cas, l'orientation et la quantité des fibres sont plus difficiles à définir et à réaliser, mais la broderie et la couture sont prometteuses.

On détermine le sens et l'intensité des contraintes par la méthode des éléments finis (voir *La mécanique des tissus*, par Jean-François Ganghoffer et Massimo Magno, page 88). Pour un disque isotrope, soumis à un effort de torsion, tel un disque d'embrayage (voir la figure 1, à gauche et au milieu), les contraintes sont maximales au centre (sur le moyeu), car la surface d'absorption des charges est inférieure, à épaisseur constante. Les lignes de champ, reliant les forces qui s'exercent aux différents points, y sont également plus denses (voir la figure 1, au milieu). Si on les prend comme contours de motifs de broderie, on obtient une répartition des



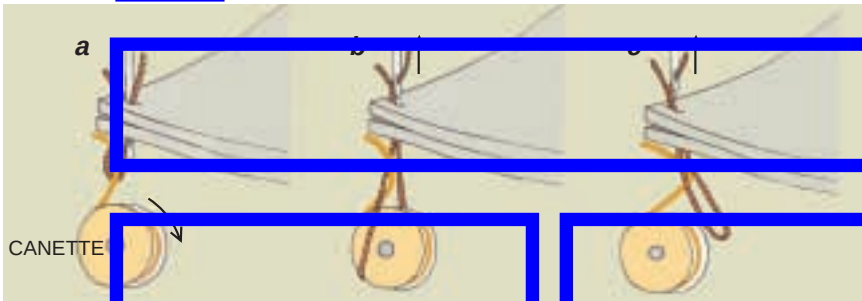
1. ON ALLÈGE des composites en brodant des fibres sur leur textile de renfort : quand ces broderies passent dans les zones de contraintes maximales, les pièces brodées sont plus résistantes ; on peut donc en réduire la taille. Pour appliquer cette technique à un disque d'embrayage (à gauche), on étudie d'abord les contraintes qui s'exer-

cent sur lui. Puis on trace les courbes reliant les vecteurs principaux de contrainte (les deux lignes noires en sont des exemples au centre), dont la densité est maximale au centre du disque. Enfin, on brode des cordelettes de fibres de carbone sur le renfort textile, selon un motif calqué sur ces courbes.



ZSK Strickmaschinen-Gesellschaft, Krefeld

2. CETTE MACHINE À BRODER industrielle possède 20 têtes multi-aiguilles.



3. PRINCIPES DES MACHINES À COUDRE et à broder : le fil supérieur, entraîné par l'aiguille, traverse les deux pièces de tissu à assembler (a). Il forme ainsi une boucle au-dessous des tissus, dans laquelle se glisse un crochet (non représenté) ; le crochet tourne (voir la flèche) pour que la boucle passe autour de la canette (b), puis autour du fil du dessous qui y est enroulé (c). Au total, le fil du dessus est accroché au fil du dessous.

contraintes uniformes sur l'ensemble des fibres, ce qui permet de réduire leur nombre, donc la masse de la pièce (voir la figure 1, à droite).

On utilise des écheveaux de fibres de renfort en verre, en carbone, en aramide ou en matériaux hybrides (des fibres de renfort imprégnées d'une résine). Toutes les matières fibreuses que l'on peut filer sont également utilisables, tels le lin, la ramie (une sorte d'ortie) et le jute, ainsi que celles dont on peut faire des faisceaux, telles les fibres céramiques. Leur emploi devrait réduire le prix de revient des composites à fibres : l'étape de coupe et les chutes sont éliminées, puisqu'on donne directement aux produits leur forme finale ; on peut utiliser des fibres naturelles, bon marché, car elles donnent d'aussi bon

résultats que les fibres de verre. Les procédés automatisés de couture sont capables de reproduire les mêmes pièces avec une grande précision, ce qui garantit une qualité élevée.

En outre, d'autres procédés ont été mis au point à partir de cette technique. Par exemple, on inclut des réserves de fibres étirables dans des pièces extérieures, qui peuvent ensuite être mises en forme pour fabriquer des produits semi-rigides, tels les toiles et des renforts textiles tridimensionnels. La combinaison de ces innovations est particulièrement prometteuse.

Konrad GLIESCHE est spécialiste des composites à renforts brodés, à l'Institut de recherche sur les polymères de Dresde.

Les fibres naturelles dans les composites

ANDRZEJ BLEDZKI • JOCHEN GASSAN

Biodégradables et peu coûteuses, les fibres naturelles commencent à s'imposer dans les composites. Les performances des matériaux obtenues égalent parfois celles de composites classiques.

Il y a 70 ans environ, on utilisait surtout des fibres naturelles pour fabriquer les objets d'usage courant et les produits techniques, même dans les pays industrialisés. Par exemple, les textiles, les cordes et les voiles étaient en lin et en chanvre. À la fin du siècle dernier, les sièges et les réservoirs à carburant des premiers avions étaient en fibres naturelles imprégnées d'un peu de polymère, qui jouait le rôle de liant. En 1908, du papier et du coton renforçaient des résines de bakélite. Avec ces matériaux, les premiers composites, l'industrie produisait des panneaux et des tubes pour l'électrotechnique. À partir des années 1950, les matériaux synthétiques s'imposèrent, notamment dans les domaines techniques, grâce au bas prix du pétrole et au développement fulgurant de la pétrochimie. Les matières premières renouvelables ne retiennent à nouveau l'attention que depuis quelques années.

Les pays en développement, qui n'ont jamais abandonné les fibres naturelles, peuvent aujourd'hui guider les pays industrialisés. En Inde, plusieurs instituts étudient le jute (plante herbacée) dont les fibres, associées à du polyester, entrent dans la composition de produits semi-finis, tels des tubes et des panneaux. Du polyester renforcé au jute a été utilisé pour construire une maison à Madras, en 1978, et un silo à céréales. Dans certaines régions du monde, l'argile mélangée à de la paille est depuis toujours le principal matériau de construction.

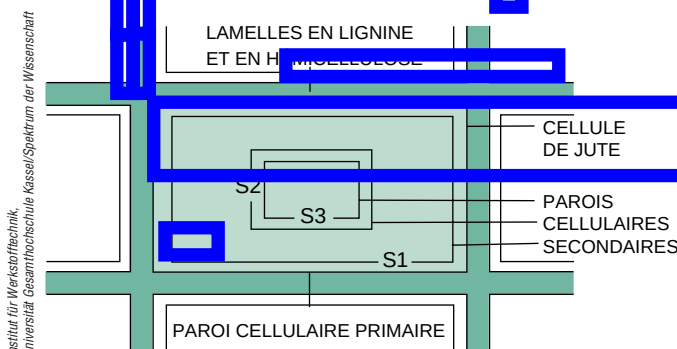
L'industrie automobile des pays occidentaux cherche également à utiliser les fibres naturelles. Pendant des décennies, des fibres issues de déchets textiles ont renforcé le matériau synthétique de la carrosserie de la *Trabant*, en Allemagne. Plus récemment, la Société Mercedes-Benz met au point un nouveau point sa série K, pour *Kaut* (plante du *Kompost*), qui contient des fibres de

bois, de lin, de ramie (sorte d'ortie) et de chanvre. Par exemple, on étudie des garnitures de portes en bois moulé ou en fibres naturelles agglomérées, des toits en résine époxy ou polyuréthane, renforcés avec des fibres de lin.

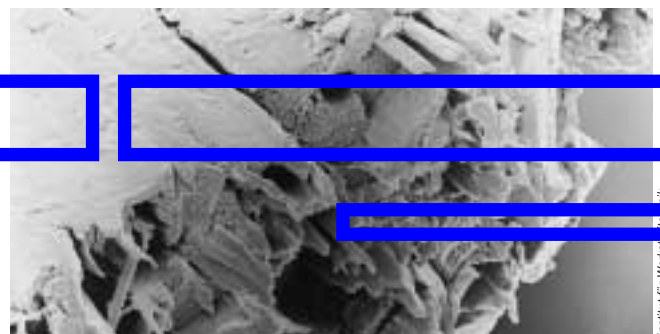
Du naturel amélioré

Les fibres naturelles sont de trois types : les fibres végétales, tels le coton, le lin, le chanvre, la ramie, le jute, le sisal... ; les fibres animales, telles la laine et la soie ; et les fibres minérales, telle l'amiante. Pour renforcer les matériaux synthétiques, on utilise généralement des fibres végétales. Elles sont constituées soit de filaments (coton, kapok), soit de faisceaux de tissus de soutien de plantes dicotylédones, soit de faisceaux de nervures de monocotylédones (lin, sisal).

Aujourd'hui, on produit mondialement 3,6 millions de tonnes de fibres de jute et 0,8 million de tonnes de fibres



1. UNE FIBRE DE JUTE est composée de cellules ordonnées (cellule du centre est en vert clair), séparées par des lamelles en lignine et en hémicellulose (en vert foncé). Chaque cellule a une paroi pri-



maire et trois parois secondaires, en fibrilles de cellulose. À droite, des fibres de jutes, observées au microscope électronique à balayage, sont grossies 2 680 fois.

de lin par an (et 1,2 million de tonnes de fibres de verre). Parmi les fibres végétales, la fibre de lin est la plus solide, mais elle revient 30 pour cent plus cher que la fibre de verre, sans tenir compte des fluctuations des cours, durant les dernières décennies.

Les traitements des fibres naturelles déterminent le prix et la qualité de ces fibres. Comme leurs propriétés sont plus hétérogènes que celles des fibres synthétiques, on les uniformise par délignification ou par dégommeage, c'est-à-dire qu'on élimine la couche adhésive qui entoure les fibres. D'autres traitements agissent sur les propriétés structurelles des fibres pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques, et sur leur état de surface, pour accroître leur adhérence à une matrice polymère, les rendre imperméables et ininflammables (les fibres de verre sont également enrobées de composés qui améliorent leur adhérence à la matrice, mais ce traitement est moins cher que le précédent).

On ne remplace donc pas les fibres de verre par des fibres naturelles pour faire des économies, mais parce que les matières premières renouvelables ont des avantages écologiques : elles font un meilleur emploi des ressources et conduisent à un dégagement réduit de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, puisque la combustion des fibres naturelles ne produit qu'une quantité de dioxyde de carbone égale à celle que la plante a absorbée pendant sa croissance. Enfin les objets en composites à fibres naturelles sont plus faciles à recycler. Si leur matrice était biodégradable, ils pourraient même servir de compost.

Des systèmes structurés

Les fibres végétales ont toutes une composition chimique comparable : elles contiennent de 60 à 85 pour cent de cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des pectines. Les proportions dépendent des conditions de croissance, notamment météorologiques, de l'âge des fibres et du traitement de délignification.

L'organisation structurelle de leurs constituants détermine leurs propriétés mécaniques. En général, les cellules d'un filament de fibre végétale sont organisées en plusieurs couches, dont chacune

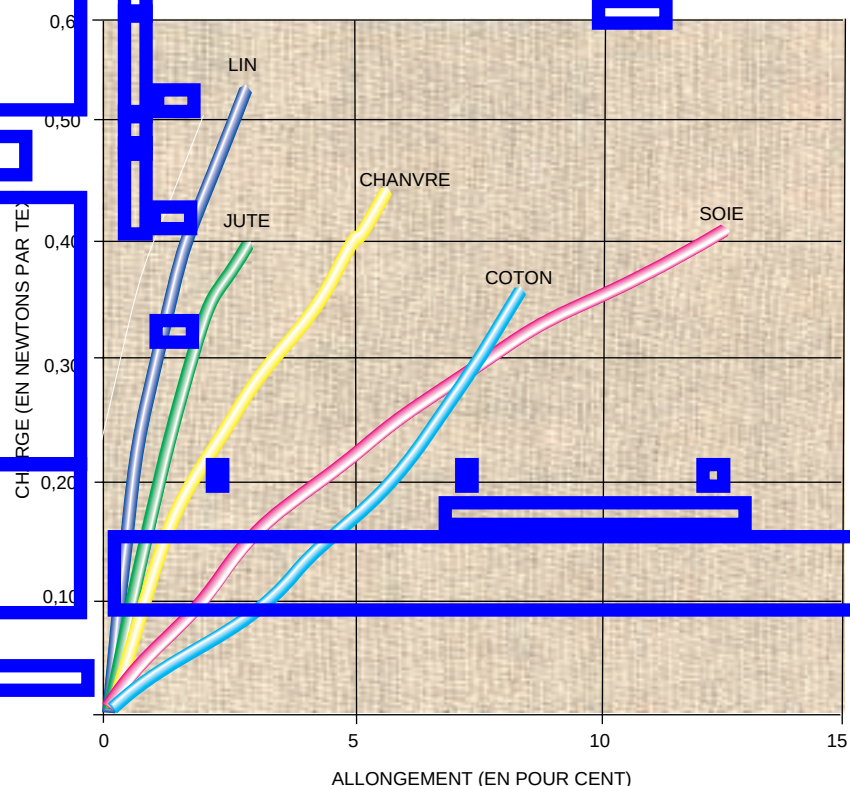
renferme des domaines cristallins (ordonnés de cellulose, séparés par de la lignine et par des hémicelluloses formant des zones amorphes. Les cellules de la plupart des plantes à fibres ont quatre parois concentriques : la paroi primaire et trois parois secondaires (voir la figure 1). Dans la dernière, l'agencement et l'orientation des domaines de cellulose déterminent les caractéristiques mécaniques des fibres (voir la figure 2). D'autres caractéristiques déterminent les propriétés mécaniques des fibres : le degré de polymérisation, la cristallinité (selon le type de cellulose), l'orientation des chaînes de polymère dans les domaines cristallins et amorphes, ainsi que le nombre et la taille des pores de la paroi végétale. En général, les fibres végétales sont deux fois moins denses que les fibres de verre, mais elles sont aussi solides et rigides.

Comme la qualité des composites dépend notamment de l'adhérence des fibres à la matrice, on l'améliore en enrobant les fibres par des composés qui ont deux parties : l'une se lie à la surface des fibres, tandis que l'autre se lie à la matrice. Les silanes, l'acide maléique anhydride et le polyméthacrylate

polyoléfinyle-isocyanate sont de tels composés de liaison. On peut aussi rendre la surface des fibres plus réactive en la bombardant par des ions de haute énergie (traitements par plasmas). On double ainsi les modules qui mesurent les propriétés mécaniques de certains composites.

À la recherche de stabilité

Les fibres naturelles sont biodégradables. C'est un avantage, pour le recyclage des composites qui en contiennent, mais c'est un inconvénient au moment de la fabrication. Les acides, les bases et les rayonnements ultraviolets nuisent à la cohésion des fibres naturelles. Les enzymes digèrent les fibres de cellulose en l'espace de six mois à un an. Ce délai peut être porté à deux ans par certains traitements, sans dégradation des caractéristiques mécaniques des fibres. Un stockage dans un endroit sec permet même d'atteindre deux ans et demi, avec une réduction minime de la solidité et de l'allongement à la rupture. Le sisal donne des fibres légèrement plus stables qu'une autre sorte d'acry



2. COURBES D'ALLONGEMENT en traction de fibres naturelles. La charge maximale que supportent les fibres dépend de leur masse par unité de longueur. Celle-ci est exprimée en tex, une unité qui correspond à la masse, en grammes, d'un kilomètre de fibre.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSES SÛRES

DIDIER NORDON

**Des cailloux
dans les choses sûres**



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 70 F
Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
ÉDITION BELIN

Bon de commande en p. 194

(henequé) et que l'abaca (fibre tirée des feuilles de bananier).

Le séchage atténue les dégradations dues aux basses températures (à partir de 70 °C au-dessous de zéro). Les températures élevées dégradent aussi les fibres. Après 80 jours, à 130 °C, la solidité du coton est ramenée à 68 pour cent de sa valeur initiale ; à 100 °C, elle est réduite à 10 pour cent de cette valeur. Pour le lin, ces réductions sont respectivement de 41 pour cent et de 12 pour cent ; pour la ramie, de 26 pour cent et de 6 pour cent.

Dans un composite à matrice synthétique, l'eau qui diffuse réduit les caractéristiques mécaniques (l'eau de mer provoque plus de dégâts que l'eau douce) ; des bactéries et des champignons attaquent les fibres. Les fibres de ramie et de jute résistent mieux à ce type d'agression que les autres fibres végétales.

Des composites mixtes

Les fibres naturelles renforcent surtout des polymères thermodurcissables et thermoplastiques. Les thermodurcissables, tels les résines époxy et polyester, sont réticulés : ils ne peuvent plus être mis en forme par la suite. Les thermoplastiques, telles les polyoléfines, sont moulés à chaud pour fabriquer des produits semi-finis. Contrairement aux précédents, leur transformation est réversible.

Aujourd'hui, on utilise surtout les composites à matrice thermodurcissable et à fibres naturelles pour fabriquer les pare-chocs, les hayons et les accessoires de carrosserie de voitures, ainsi que les blindages et les boîtiers d'appareils électriques.

Pour les applications techniques, on choisit plutôt des polymères thermoplastiques qui peuvent être refondus et réutilisés. Comme les fibres naturelles sont stables jusqu'à 230 °C seulement, la matrice polymère doit avoir une température de mise en forme inférieure à cette valeur. On utilise essentiellement des polyoléfines, tels le polyéthylène et le polypropylène. Le polyamide, le polyester et le polycarbonate ne conviennent pas, car ils ont une température de mise en forme supérieure à 250 °C. Les nappes de fibres de verre sont les renforts les plus courants des matières thermoplastiques. La Société BASF met aujourd'hui au point un composite à

matrice thermoplastique, renforcée avec des nappes en fibres naturelles. On fabrique tout d'abord les nappes : une installation de cardage transforme les fibres en voiles réguliers (couches de fibres très fines). Plusieurs voiles sont ensuite liées pour former une structure non tissée qu'on intègre à la matrice en polypropylène dans une presse en acier à chaud : la matière synthétique fondue imprègne les fibres, puis le composite refroidit sous pression. La Société Daimler-Benz met également au point un procédé nommé «Express», qui pourrait concurrencer la méthode précédente : une extrudeuse à filière plate injecte la matière thermoplastique dans un moule contenant les voiles de fibres naturelles, puis l'ensemble est pressé. Ce procédé en une seule étape produit un matériau multicouche, composés de deux voiles séparés par un film thermoplastique.

Les propriétés mécaniques et physiques des composites à fibres naturelles semblent moins bonnes que celles des composites à fibres de verre, sauf dans certaines conditions. En associant les deux sortes de fibres, on remédie partiellement à cet inconvénient. De tels composites, dits hybrides, sont nettement moins sensibles aux effets de l'environnement.

Pour obtenir des matières biodégradables on étudie également les biopolymères à fibres naturelles, notamment les fibres de lin : la résistance à la traction et le module d'élasticité de ces composites dépendent de l'adhérence entre la matrice et les fibres, donc de la matrice utilisée. Certains spécialistes considèrent que les biocomposites peuvent servir de matériaux de construction dans l'industrie automobile, l'ameublement ou les chemins de fer, à condition qu'ils ne soient pas soumis à des conditions environnementales trop rigoureuses.

Les composites à fibres naturelles ouvrent de nouveaux débouchés aux produits agricoles. Au lieu d'être réduits par des subventions, les excédents de la agriculture seront ainsi utilisés dans de nouvelles applications techniques.

Andrzej BLEDZKI est professeur de plasturgie et de recyclage des plastiques à l'Université de Kassel. Jochen GASSAN est spécialiste des fibres de renfort pour composites.

Des composites à partir de textiles

DOMINIQUE LOUBINOUX

On obtient des composites en fondant un textile mixte, composé de filaments de verre et de filaments de matière plastique.

Les matériaux composites sont communément constitués d'une matrice et d'une charge renforçante : l'association apporte au produit final les avantages des deux composants. Par exemple, la plupart des matières plastiques, ou matériaux macromoléculaires (les molécules sont composées de milliers, voire de millions d'atomes), sont légères, résistantes à la corrosion et aptes à former des structures compliquées par moulage ; elles sont aussi de bons isolants thermiques et électriques. Par ajout d'une charge renforçante, cette matrice polymère acquiert des qualités qui lui sont étrangères : faible coefficient de dila-

tation, rigidité et résistance mécanique, par exemple.

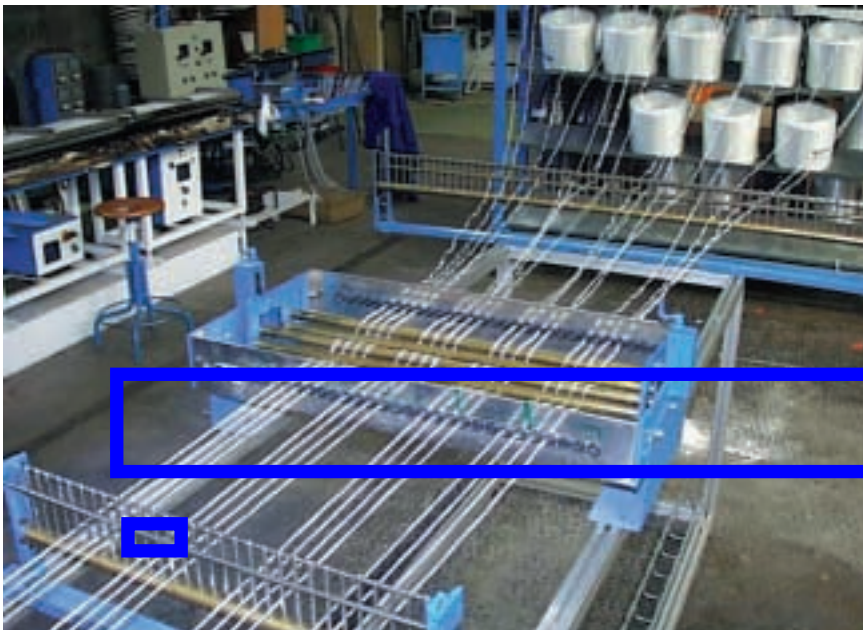
Les charges les plus efficaces sont des fibres dont la longueur est bien supérieure au diamètre : de la sorte, le renfort assuré par une fibre est relayé par une autre fibre voisine. Il est plus efficace si les fibres s'étendent sur toute la longueur de la pièce. La finesse de ces fibres, qui correspond à une grande surface d'échange, assure un bon transfert des contraintes mécaniques, de la matrice aux fibres.

Pour des applications où des performances supérieures s'imposent, l'industrie utilise beaucoup les fibres de

carbone, qui ont la structure du graphite, et les fibres de para-aramides (des polyamides aromatiques) : leur rigidité est élevée, mais elles sont coûteuses. Toutefois les fibres de verre, un peu moins rigides, sont nettement moins coûteuses. Elles renforcent aujourd'hui la plus grande partie des matériaux composites de grande diffusion : coques de bateaux, skis, surfs, plaques de circuits imprimés, coffrets électriques, pièces pour l'automobile...

Les polymères utilisés dans les matrices sont de deux types : les thermodurcissables, qui, comme leur nom l'indique, durcissent quand on les chauffe, et les thermoplastiques, qui fondent alors réversiblement. La mise en œuvre des polymères thermodurcissables impose une impregnation préalable des renforts de verre placés dans un moule par les constituants liquides de la résine non polymérisée ; puis on « cuit » la matrice thermodurcissable, c'est-à-dire que l'on déclenche une réaction chimique qui provoque la réticulation des macromolécules en un bloc qui enserre les fibres.

Les polymères thermoplastiques sont particulièrement appréciés pour les grandes séries, car on peut simplement les mouler en les chauffant à une température supérieure au point de fusion du polymère, puis en les refroidissant. De surcroît, les durées de fabrication sont inférieures au lieu d'attendre la réaction chimique de polymérisation et, parfois, l'évaporation de solvant, on attend seulement le refroidissement de la résine. Enfin, la technique est écologiquement plus intéressante : on n'utilise pas de solvant, et les produits sont



1. UTILISATION du Twintex pour la réalisation de profilés : les bobines du matériau sont tirées, et les fils mixtes, composés de filaments de verre mêlés à des filaments de polymère, sont tirés jusqu'à un four (non représenté), où la matrice polymère est fondue ; l'ensemble est alors poussé à travers des filières dont la section est celle du profilé recherché.

totallement recyclables. En revanche, l'imprégnation d'un tissu ou d'un non tissé de verre par du polymère fondu impose d'exercer des pressions considérables, car la viscosité du polymère reste très importante. Comment imprégner les renforts? C'est la question que nous avons étudiée.

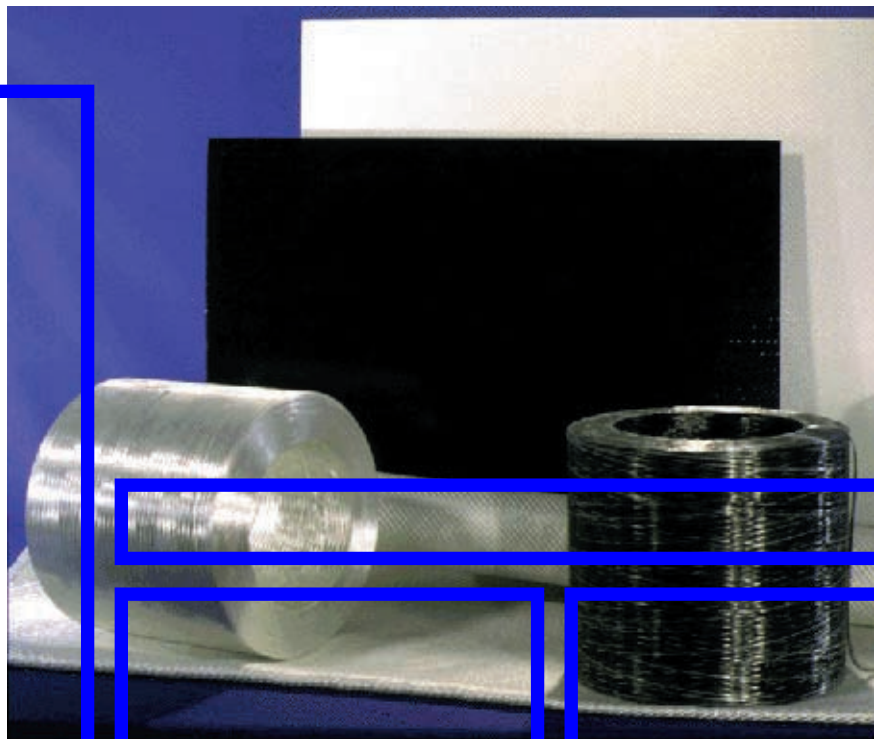
Filaments de verre et de polymère

Afin de favoriser le développement des matières composites à polymère thermoplastique, nous avons voulu proposer un semi-produit qui réunit une matrice et des fibres de verre aussi longues que possible : ainsi l'utilisateur n'a plus à imprégner ses renforts avant le moulage ; pour mettre en œuvre le produit, nommé Twintex, il lui suffit d'effectuer un cycle comportant des phases de chauffage, de mise en pression et de refroidissement. Les pièces en composite réalisées comportent des renforts continus et orientés, du fait de la présentation du produit sous forme de « roving » (gros fil multifilaire) ou de tissus de roving.

Le roving est constitué de filaments continus de verre et de filaments, également continus, de thermoplastique. Le polymère choisi, le polypropylène, a été principalement retenu pour son rapport performances / prix avantageux (le polypropylène est largement utilisé par l'industrie automobile, l'électroménager, le mobilier de jardin, l'emballage).

Les filaments de verre sont formés par l'étirage du verre fondu à plus de 1 200 degrés, à travers une multitude de trous aménagés dans une filière. Les filaments sont refroidis par de l'air et recouverts d'un ensimage dont les composants chimiques assurent un bon mouillage du polymère thermoplastique du fil composite.

D'autre part, les filaments de polypropylène sont obtenus au moyen d'une extrudeuse qui fond le polymère (introduit dans la machine sous la forme de granules) en même temps qu'elle le mélange à des additifs tels que des colorants, des stabilisants thermiques, des anti-UV, etc. Le polymère fondu est extrudé sous la forme de filaments à travers une plaque filière, également perforée de nombreux trous dont la géométrie est adaptée au comportement rhéologique de ce polymère. À la sortie des filières, les deux popu-



2. BOBINES de Twintex prêtes à l'emploi. Le matériau peut être teinté par ajout de colorant (noir, à droite) dans la matrice de polymère thermoplastique. Derrière les bobines, on voit du tissu à partir duquel on a obtenu les plaques composites d'arrière plan.

lation de filaments sont mêlées à grande vitesse (plusieurs centaines de mètres par minute), puis regroupées en une mèche unique, qui est bobinée en spires croisées : les bobines se tiennent alors mieux, et leur dévidage chez l'utilisateur est facilité.

Le concept de multimatériaux à deux composants peut être étendu à d'autres matrices thermoplastiques, telles que les polyesters, qui présentent une rigidité et une tenue thermique supérieures. Ces produits sont aujourd'hui étudiés par notre société.

Les usages du Twintex

Comment réaliser des pièces en matériaux composite, à partir du semi-produit qui contient tous les composants élémentaires? La transformation comportera toujours les étapes suivantes : fusion des filaments de polypropylène ; compression du produit ; refroidissement sous pression. Directement à partir des rovings, on peut faire des corps creux par enroulement filamentaire ou des profilés par pultrusion (contraction, du verbe anglais *pull*, «tirer», et extrusion, technique utilisée dans la fabrication des profilés en thermoplastique). Avant toute transformation en pièce

composite, les rovings peuvent être arrangés pour former des surfaces textiles telles que tissus chaîne et trame, tissus coussu uni- ou multidirectionnels, non tissés plus ou moins directionnalisés. À partir de ces étoffes, on peut réaliser des plaques, des sandwiches, par compression à chaud, ou calandrage ; des pièces en formes demoulables par moulage à haute pression ou par estampage de produits préchauffés ; des pièces creuses ou de grandes dimensions par moulage dans un four à air chaud avec une membrane souple en silicone à haute tenue thermique, la pression étant appliquée par de l'air comprimé ou par l'effet du vide.

C'est ainsi que les industries des transports et des articles de sport, notamment, ont fabriqué des pièces pour des remorques de camions, des poutres de pare-chocs thermoformées pour les voitures monospaces, des éléments de fixation pour surf des neiges, des renforts antiperforants pour siège de parapente, ou des dos estampés de sac à dos...

Dominique LOUBINOUX est ingénieur de recherche et développement à la Société Vetrotex International.

Textiles et enzymes de l'extrême

YANNICK GUEGUEN • JACQUES DIETRICH

Les enzymes des micro-organismes des sources chaudes, au fond de l'océan, résistent à des températures et à des pressions extrêmes : elles sont bien adaptées aux conditions contraignantes de certaines réactions industrielles.

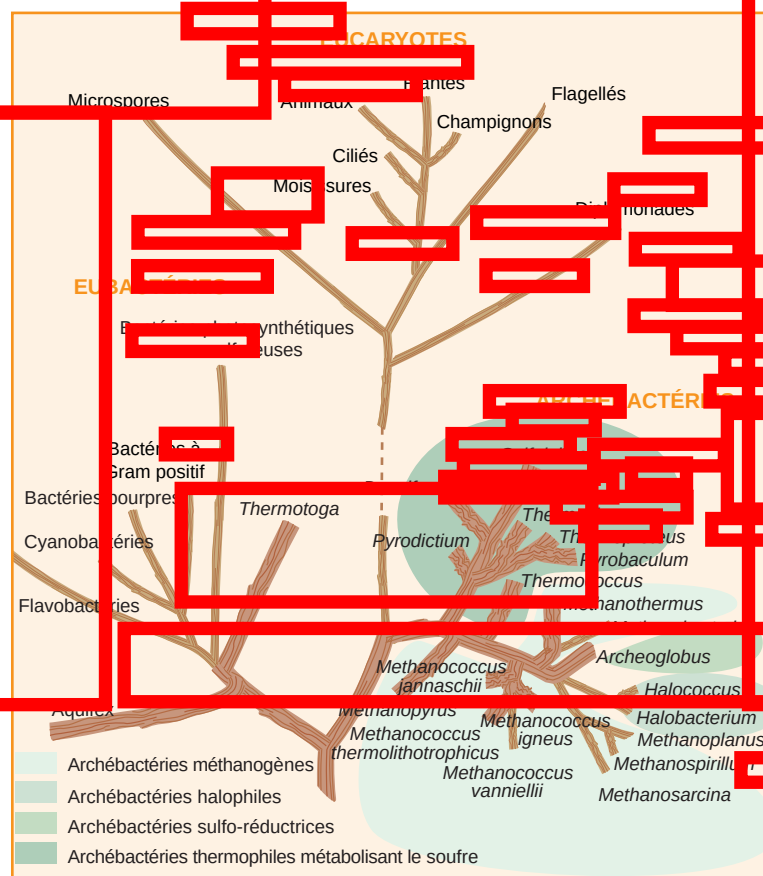
Au fond des océans, près des sources hydrothermales, la vie foisonne. Les organismes et micro-organismes qui y vivent sont soumis à des conditions de température (entre 2 °C et 100 °C) et de pression (entre 2×10^7 et 10^8 pascals, soit entre 200 et 1 000 atmosphères), d'acidité ou de salinité extrêmes. Pourtant, leur machinerie cellulaire est parfaitement adaptée à ces conditions. Depuis une dizaine d'années, l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, IFREMER, a organisé plusieurs campagnes océanographiques pour étudier ces sites et réaliser une collection de micro-organismes hydrothermaux de l'extrême, qui appartiennent au monde des extrémophiles.

Ces organismes fonctionnent notamment grâce à des enzymes qui résistent aux conditions environnementales et qui fournissent l'énergie nécessaire à leur métabolisme, à leur croissance et à leur reproduction. Plusieurs enzymes ont été isolées et brevetées par le laboratoire de biotechnologie de l'IFREMER. Elles sont en cours d'évaluation ou déjà utilisées dans divers domaines industriels, tels que le diagnostic médical, la

chimie, l'industrie agro-alimentaire et l'industrie textile. Toutefois, si elles ont des propriétés qui intéressent les industriels, elles n'ont pas livré tous leurs secrets : sept genres de bactéries ont déjà été séquencés, mais on n'a produit, en laboratoire, qu'un très petit nombre d'enzymes de l'extrême, car on manque de systèmes d'expression de ces gènes assez performants pour produire ces enzymes en quantité suffisante.

Aujourd'hui, la plupart des enzymes industrielles sont issues de micro-organismes, tels des champignons, des levures ou des bactéries. Seule une infime fraction des micro-organismes existant sur Terre a été identifiée. Le monde microbien est une source inépuisable de biodiversité et, par conséquent, un réservoir de nouvelles enzymes.

Les extrémophiles ont été regroupés selon des conditions physico-chimiques où ils se développent. Ainsi, les psychrophiles croissent à des températures voisines de 0 °C, sous la calotte glaciaire de l'Antarctique ; les thermophiles se développent à des températures proches du point d'ébullition de l'eau (entre 80 et 105 °C), près des geysers ou des sites hydrothermaux océaniques profonds ; les barophiles supportent des pressions atteignant 1 000 atmosphères ; les acidophiles et les alcaliphiles poussent dans des milieux où le pH est très acide (0) ou très basique (10) ; les halophiles colonisent les marais salants et les milieux dont la concentration en sel est proche de la saturation ; enfin, d'autres micro-organismes poussent dans des environnements riches en soufre, tels les solfatares, ou dans les nappes pétrolifères (voir la figure 2).



1. LES BACTÉRIES EXTRÊMOPHILES ont été représentées par les branches les plus épaisses de cet arbre phylogénétique. Les archéobactéries sont celles qui résistent aux conditions de vie les plus extrêmes.

Les enzymes utilisées en routine dans les procédés industriels présentent des limites, car elles sont fragiles : elles ne sont actives que dans des zones de température ou de pH très limitées ; elles sont inactivées par divers solvants et dès que la salinité est trop élevée. Ainsi certaines réactions enzymatiques sont interdites. On recherche donc des enzymes plus résistantes et, dans ce cadre, les micro-organismes de l'extrême sont une source potentielle d'enzymes plus performantes : dans certains procédés industriels, les enzymes de l'extrême se substituent à leurs homologues classiques.

Elles sont plus faciles à conserver et à utiliser : elles permettent de réduire le nombre d'étapes des procédés, et d'augmenter la productivité sans risques pour l'environnement : actives dans des conditions extrêmes, ces enzymes résistent mieux aux conditions imposées par certains procédés de synthèse chimique. De surcroît, la résistance de ces enzymes leur ouvre des domaines d'application interdits aux enzymes usuelles. Les producteurs d'enzymes disposent désormais de toute une panoplie de molécules extrémophiles et commencent à diversifier les domaines d'application de ces enzymes dans l'industrie.

La recherche de nouvelles sources de micro-organismes et d'enzymes a un intérêt économique indéniable. Le marché mondial des enzymes industrielles, estimé à plus de deux milliards de francs en 1983, était de l'ordre de six milliards de francs en 1995 et atteindra vraisemblablement 12 milliards de francs en 2005.

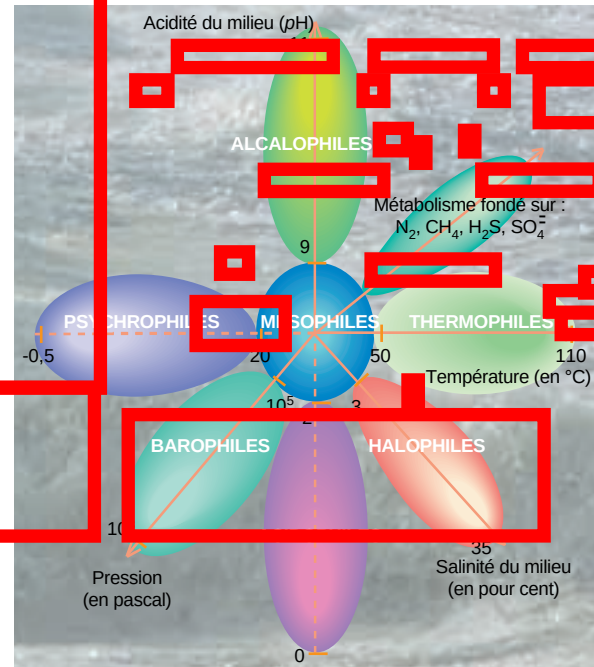
Les enzymes sont utilisées dans de nombreux secteurs de l'industrie : l'industrie des détergents, les industries alimentaires (industrie laitière, brasseries, production de jus de fruits, d'huiles, d'arômes), l'industrie de la pâte à papier, les secteurs de la pharmacie, de la cosmétique, de la chimie fine, sans oublier l'industrie textile.

En effet, les enzymes sont de plus en plus utilisées dans le traitement des textiles, notamment dans le finissage des tissus et des vêtements. Pour que les fibres textiles soient plus résistantes et qu'elles ne se rompent pas pendant le tissage, elles sont généralement encollées, c'est-à-dire enduites avec de l'amidon. Après le tissage, l'amidon doit être éliminé pour que les teintures et les impressions prennent sur le tissu.

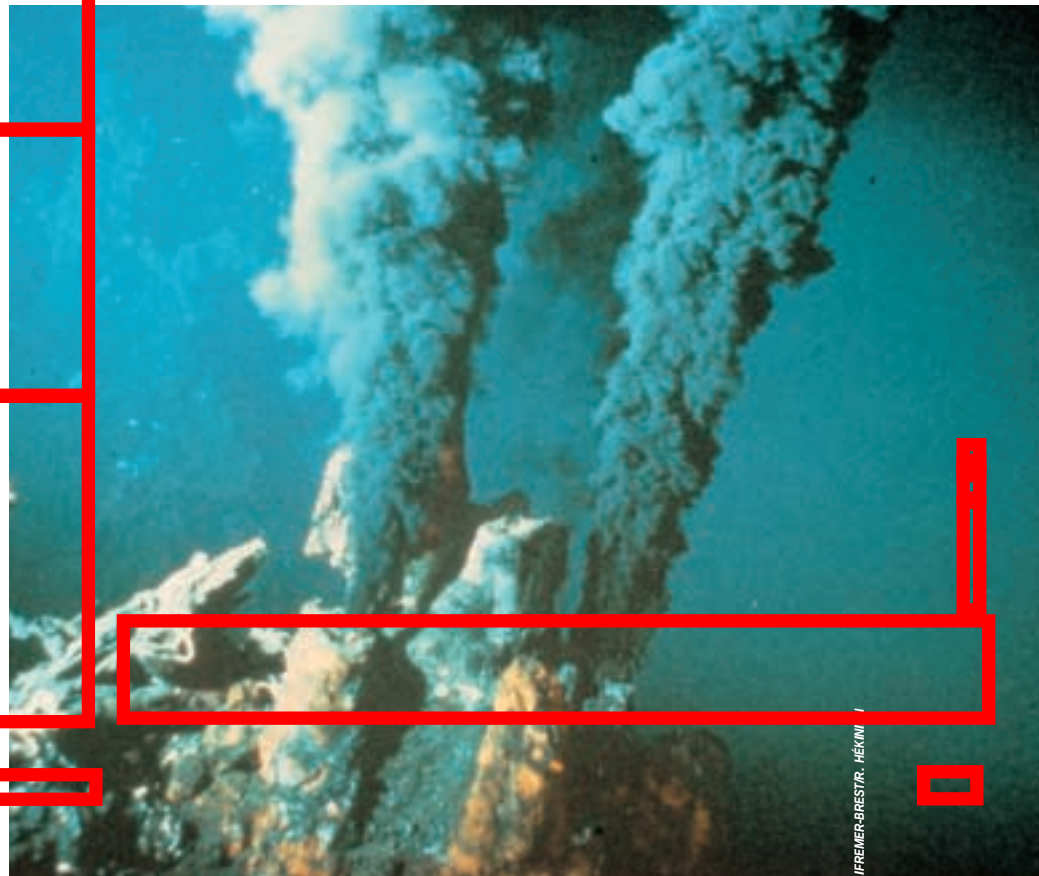
Cette opération peut être effectuée par un traitement du tissu avec des produits chimiques puissants, tels des acides, des bases ou des agents oxydants. Depuis plusieurs années, les enzymes sont nommées amylases sont utilisées en raison de leur efficacité et de leur spécificité : elles éliminent complètement l'apprêt d'amidon, sans aucun effet indésirable sur le vêtement.

Les amylases catalysent la réaction d'hydrolyse de l'amidon : parce qu'elles diminuent l'énergie qu'il faut fournir au système pour que la réaction ait lieu, elles facilitent la réaction de désencollage et l'accélèrent. Jusqu'à présent, on utilisait des amylases bactériennes classiques et les amylases thermorésistantes réduisent la durée de l'étape d'hydrolyse de l'amidon à moins d'une minute, tandis qu'il faut une à quatre heures avec les autres amylases.

Le lavage des jeans est une autre application des enzymes. De nombreux vêtements subissent un lavage qui leur confère un aspect légèrement usé. Récemment encore, on préparait les jeans



2. LES CONDITIONS de vie (température, pression, etc.) des bactéries extrémophiles ont été rassemblées sur ce schéma, où figurent, au centre, les bactéries usuelles, dites mésophiles.



3. AU VOISINAGE DES SOURCES CHAUDES, les micro-organismes pullulent. Leur métabolisme est assuré par des enzymes qui résistent à des conditions extrêmes de température et de pression. Ces enzymes résistent mieux que les enzymes classiques aux conditions physico-chimiques de divers procédés industriels.

délavés en avant les pantalons dans des machines chargées de pierres ponce, qui «usaient» le tissu.

Dès le début des années 1980, la Société *Novo* a introduit l'usage d'enzymes, nommées cellulases, résistant aux milieux basiques où les tissus sont plongés après le désencollage. Ces enzymes favorisent l'hydrolyse de l'extrémité des fibres cellulosiques qui composent le tissu ; par action mécanique, ces extrémités sont alors éliminées du corps du tissu et, avec elles, la teinture indigo, ce qui donne au jean son aspect délavé. Une petite dose d'enzymes remplace ainsi des kilogrammes de pierres ponce. Progressivement, la pierre ponce a été remplacée par les traitements enzymatiques. Par ailleurs, les

a



cellulases assouplissent les tissus en coton en «digerant» les parties endommagées des fibres textiles.

Le troisième domaine d'utilisation des enzymes dans le domaine des textiles est celui des détergents. En 1995, 13 milliards de tonnes de détergents d'usage domestique, destinés à l'usage des vêtements, ont été produits ; ils contiennent presque

b



tous (près de 90 pour cent d'entre eux) des enzymes. L'addition d'enzymes dans les détergents a permis aux producteurs de lessive de réduire les proportions d'autres ingrédients nuisibles pour l'environnement et de diminuer les températures de lavage. Dans la majeure partie des applications, les enzymes sont utilisées comme produits auxiliaires et elles ne sont généralement

Les autres applications des enzymes d'extrémophiles

Pâte à papier

La première étape de fabrication du bois, dont les principaux constituants sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, est la désintégration de ces constituants en une suspension de fibres de bois, la pâte à papier. Certaines étapes se déroulent à des températures élevées (entre 130 et 190 °C), en présence de concentrations élevées en acides ou en bases : les enzymes classiques ne sont pas utilisables.

Au cours des étapes ultérieures, on utilise diverses enzymes : des cellulases qui digèrent la cellulose et améliorent le drainage des pâtes ou assurent le désencrage ; des xylanases qui assurent le blanchiment des pâtes chimiques ; des amylases qui modifient l'amidon utilisé comme additif dans la fabrication de certains papiers.

Les déchets organo-chlorés issus des agents chimiques de blanchiment sont nuisibles pour l'environnement, et les fabricants de papier cherchent à en réduire la production. Une enzyme extrémophile, commercialisée en 1995 par la Société *Novo Nordisk*, potentialise l'effet des agents chimiques de blanchiment de sorte que pour un même degré de blanchiment, la consommation de chlore est réduite de 30 pour cent environ.

La Société canadienne *logen Corporation* a mis au point une nouvelle génération d'enzymes de blanchiment, qui réduit les émissions chlorées dans les usines de pâte à papier. Ces nouvelles enzymes ont été créées par les méthodes d'ingénierie des protéines : elles fonctionnent dans des milieux très basiques et vers 70 °C.

Industrie alimentaire

Des enzymes sont utilisées au cours de la production de la plupart des aliments industriels : bière, jus de fruits, vin, pain, arômes alimentaires, etc. Elles améliorent la qualité des produits et ouvrent la possibilité de mise au point d'aliments adaptés à des besoins spécifiques, par exemple des aliments pour les nouveau-nés ou pour les personnes âgées.

L'alimentation animale représente aussi un secteur industriel important, car on ajoute des enzymes dans les aliments pour animaux pour dégrader les fibres qui n'ont pas de valeur nutritionnelle et pour compléter les enzymes du tube digestif des animaux : le «rendement nutritif» des aliments absorbés est amélioré.

L'hydrolyse de l'amidon est effectuée par des enzymes. L'amidon, l'une des principales ressources alimentaires, est contenu dans le maïs, dans le blé, dans la pomme de terre, par exemple. L'utilisation de l'amidon exige plusieurs étapes réactionnelles, et l'on utilise diverses enzymes : des amylases, des protéases, des hémicellulases, des amyloglucosidases, des pullanases, des phospholipases ou des glucoses-isomérases.

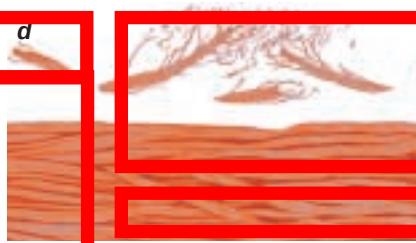
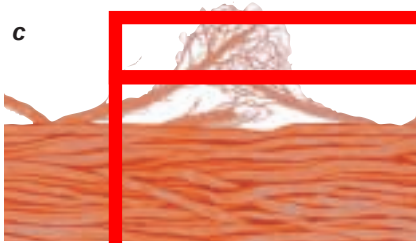
Selon les enzymes utilisées, la composition et les propriétés physico-chimiques des produits obtenus varient, de sorte que leur utilisation doit être parfaitement contrôlée. L'utilisation d'une alpha-amylase issue d'une bactérie thermostable permet de réaliser l'hydrolyse de l'amidon en une seule étape. Toutefois, on ne dispose pas encore d'enzyme assurant le passage de l'amidon au glucose.

Industrie pharmaceutique

L'utilisation des enzymes pour la synthèse de composés chimiques stéréoisomériques (deux stéréoisomères sont l'image l'un de l'autre dans un miroir) est souvent plus aisée et plus économique par voie enzymatique qu'à l'usage de la chimie, malgré les progrès notables de la synthèse chimique. Deux stéréoisomères n'ont généralement pas la même activité biologique selon leur «sens», c'est-à-dire que les rendements de certaines réactions chimiques sont meilleurs avec l'un des deux molécules ; on cherche à produire le plus actif, et certaines enzymes favorisent la synthèse spécifique de l'un des deux stéréoisomères.

Traditionnellement, les enzymes ont surtout servi à dégrader les molécules de grande taille en molécules plus simples. Aujourd'hui on les utilise de plus en plus pour la synthèse de molécules à activité biologique. Ces synthèses devraient être favorisées par l'utilisation d'enzymes issues d'extrémophiles, qui résistent, notamment à la présence de grandes quantités de solvant organique.

Ainsi, des enzymes interviennent dans la synthèse d'un intermédiaire essentiel de la production de nombreux antibiotiques, l'acide 6-aminopénicillanique. La synthèse chimique nécessite trois étapes qui mettent en œuvre des réactifs toxiques et nécessitent des conditions réactionnelles drastiques. Au contraire, la bioconversion se fait en une seule étape, dans des conditions réactionnelles douces. La conversion enzymatique a remplacé la synthèse chimique dans la synthèse de l'acide 6-aminopénicillanique.



4. LES CELLULASES éliminent les «peluches», sur les vêtements. À mesure que les tissus s'usent (a à c), les fibres de surface se détachent et s'effritent ; «digérées» par les enzymes, elles se détachent et sont éliminées au lavage (d).

pas présentes sous forme active dans le produit fini.

Les différentes enzymes utilisées dans l'industrie des détergents sont les protéases, qui éliminent les taches dues aux protéines, par exemple les taches d'œuf ; les lipases, qui enlèvent les taches d'huile ; les amylases qui dégradent les substances amylacées (pommes de terre, pâtes), et les cellulases. Ces dernières assurent un biopolissage qui améliore la qualité du coton et des autres fibres naturelles cellulosiques. Elles donnent un aspect lisse et lustré aux tissus. En effet, à l'usage, les fibres de surface des vêtements deviennent cassantes et forment de petites pilosités, qui donnent un aspect pelucheux. Les cellulases (qui, nous l'avons indiqué, hydrolysent les extrémités des fibres cellulosiques) utilisées dans les détergents éliminent les microfibrilles de surface, assouplissent les tissus et avivent les couleurs (en éliminant les fibrilles endommagées et décolorées).

L'utilisation des enzymes dans les détergents pose de nombreuses difficultés techniques. Elles doivent résister à de notables variations de l'acidité du milieu, à des concentrations ioniques variables et aux divers additifs, notamment les substances tensioactives qui évitent aux salissures de se redéposer sur le tissu propre. Les lessives domestiques liquides posent des difficultés supplémentaires, car les enzymes y sont moins stables que dans les lessives en poudre : en milieu liquide, elles risquent de perdre partiellement leur stabilité et, par conséquent, leur activité, tandis que dans les lessives en poudre, elles ne deviennent actives qu'au moment de la dissolution de la poudre.

Ainsi, depuis mai 1997, la Société Genencor International commercialise Puradax HA, un nouvel additif pour les détergents, dont le composé principal est une cellulase extraite d'un extrêmophile : elle a une forte activité catalytique lors du nettoyage des vête-

ments à un pH supérieur ou égal à 10. Cette cellulase provient de lagons alcalins situés au milieu des montagnes, dans un pays dont les découvreurs taisent le nom.

L'intérêt des catalases

Sous la pression de l'opinion publique qui réclame une industrie textile moins polluante, les industriels essaient de substituer les agents de blanchiment à base de chlore par le peroxyde d'hydrogène (l'eau oxygénée). Après l'opération de blanchiment, l'excès de peroxyde d'hydrogène est éliminé des bains et des effluents grâce à des catalases, des enzymes qui dégradent ce composé en eau et en oxygène. De surcroît, comme elles libèrent de l'eau, les catalases réduisent les besoins en eau dans les étapes ultérieures (de teinture, par exemple). Les enzymes utilisées dans ce procédé doivent être stables à des températures élevées et en milieu basique, et résister au peroxyde d'hydrogène, très réactif.

Ainsi, les extrêmophiles, capables de résister à des conditions physico-chimiques extrêmes, constituent une nouvelle source de molécules intéressantes pour l'industrie. Aujourd'hui, seules quelques unes sont utilisées dans des procédés industriels, dans le secteur de la biologie moléculaire, dans celui de la papeterie ou dans celui des détergents. Lorsque des enzymes naturelles sont utilisées dans des applications industrielles, comme catalyseurs pour des synthèses chimiques ou comme additifs dans des détergents, elles ne sont pas toujours très bien adaptées à leur tâche, car les substrats ne sont pas assez solubles, ou que les produits sont instables, ou encore en raison de réactions chimiques «parasites» qui entrent en compétition avec la réaction principale.

Ainsi, les enzymes qui interviennent dans certaines voies biochi-

miques sont souvent inhibées par leurs propres substrats ou par les produits réactionnels, ces derniers agissant alors en limitant le rendement du procédé biocatalytique. Au contraire, les biotechnologies nécessitent des enzymes qui sont stables et actives sur de longues périodes et dans un environnement contraignant (solvant organique, par exemple). Les enzymes disponibles ne présentent généralement pas toutes les caractéristiques nécessaires à une application industrielle particulière et doivent être modifiées.

Malheureusement, on ignore, la plupart du temps, les relations entre la séquence protéique d'une enzyme, sa structure et sa fonction, condition pourtant indispensable à la modélisation rationnelle d'une protéine. En revanche, les techniques moléculaires permettent aux biologistes de réaliser des mutations dirigées *in vitro* sur des gènes clonés et de sélectionner ainsi les gènes et les molécules qu'ils codent qui ont les caractéristiques recherchées. En continuant l'exploration de l'immense réservoir d'activité enzymatique enfoui au fond des océans et en utilisant les techniques d'ingénierie des protéines pour ajuster les propriétés des enzymes aux exigences industrielles, on disposera, dans quelques années, de catalyseurs enzymatiques qui faciliteront les réactions déjà connues et qui autoriseront de nouvelles réactions, qui restent à découvrir.

Yannick GUEGUEN, biochimiste, mène ses recherches dans le Laboratoire de biotechnologie des micro-organismes hyperthermophiles, de l'IFREMER, à Brest, que dirige Jacques DIETRICH.

C. R. WOESE et al., *Towards a natural system of organisms : proposal for the domain Archaea, Bacteria and Eucarya*, in *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, vol. 87, pp. 4576-4579, 1990.

J. GUEZENNEC et J. DIETRICH, *Les micro-organismes extrêmophiles*, in *La science au présent : 2000*, coll. Biotechnologies, Éditions Encyclopedia Universalis, 1999.



AKG Paris

Promenade au pays des indécidables

JEAN-PAUL DELAHAYE

Débat difficile entre logiciens et mathématiciens à propos de l'importance à accorder aux indécidables.

L'universalité de l'incomplétude, c'est-à-dire l'existence dans chaque système mathématique de propositions indécidables, dont les axiomes du système ne permettent de prouver ni la vérité ni la fausseté, est inquiétante. Depuis que ce résultat a été établi par Kurt Gödel en 1931, il a donné lieu à une multitude de commentaires (voir l'article de cette rubrique de novembre 1999). Sans contester l'exactitude mathématique du résultat de Gödel, les mathématiciens y opposent une sorte de résistance passive : ils tentent de se persuader que, malgré son universalité, l'incomplétude est un phénomène marginal. Nous verrons que le débat n'est pas simple à trancher, pour des raisons profondes qui forcent à reconsidérer la nature intime des mathématiques et de son rapport avec ses applications.

La contradiction, presque un paradoxe, apparaît grande entre les logiciens qui ont, depuis 1931, construit un grand nombre d'indécidables, et les mathématiciens qui remarquent qu'aucun résultat central des mathématiques classiques, concernant par exemple l'arithmétique élémentaire, n'a été, jusqu'à présent, prouvé ou réfuté.

Le mathématicien Jean Dieudonné écrivait en 1985 pour cent des mathématiciens se moquent sporadiquement de ce que peuvent faire tous les logiciens et tous les philosophes. » La vérité est-elle du côté des cinq pour cent restants ?

LES INDÉCIDABLES S'OBTIENNENT MÉCANIQUEMENT

La démonstration de K. Gödel de 1931 non seulement indique qu'il existe des indécidables pour tout système formel S consistant (c'est-à-dire non contradictoire), mais donne un moyen mécanique pour construire explicitement un indécidable I_S à partir de la description de tout système S . Grossièrement dit, cette formule est une transposition élaborée de la formule Je

mens exprimée dans le langage de tous les jours. Le mécanisme consiste à décrire, dans une formule de S , la description du fonctionnement de S , puis, grâce à cette description, à fabriquer une formule qui exprime *Je ne suis pas prouvable dans S* ; cette formule est indécidable dans S .

Le procédé permettant, à partir d'un système consistant S , d'obtenir l'indécidable I_S est mécanique, et donc un ordinateur peut le élaborer.

Notons que ce point retire toute valeur aux considérations qui prétendent tirer du théorème de Gödel un argument montrant l'impossibilité logique de simuler un être humain par une machine. Cela ne signifie pas que cette simulation est possible, mais seulement que le théorème de Gödel n'apprend rien à son sujet : si l'intelligence artificielle peut exister, elle le prouvera par ses réalisations, comme celle évoquée dans cette rubrique au mois de septembre, où l'on décrivait un système informatique qui battait les humains en exploitant leur incapacité à simuler le hasard.

La construction de Gödel étant générale, c'est donc chaque système formel assez puissant pour faire de l'arithmétique (y compris l'arithmétique) qui est concerné. Tous les mathématiciens devraient donc se sentir menacés, y compris Nicolas Bourbaki, le mathématicien polycéphale qui, depuis plus de 50 ans, développe un traité de mathématiques qui sera le plus complet jamais écrit. Toute la théorie de Bourbaki se développe dans le système formel de la théorie des ensembles de Zermelo-Fraenkel, sujette, bien sûr, à l'incomplétude. Pour suivre plus commodément l'exposé, nous caricaturerons en disant que Zermelo-Fraenkel comprend les axiomes de l'arithmétique de Peano, plus les axiomes traitant de l'infini.

Le fait que, pour tout système S consistant, l'affirmation exprimée dans S de cette consistance est un indécidable de S confirme à l'évidence que les indécidables doivent inquiéter tous les mathématiciens. En particulier, lorsqu'ils tentent de démontrer une conjecture difficile en utilisant

les moyens de la théorie de Zermelo-Fraenkel, doit-il leur venir à l'esprit que, si la conjecture est vraie, les mathématiciens devraient se poser la question si nous ne sommes pas en présence d'un indécidable de Zermelo-Fraenkel, et ne sommes-nous donc pas en train de perdre notre temps à vouloir prouver ce qui, avec les méthodes de Zermelo-Fraenkel, est improuvable ?

VOS INDÉCIDABLES SONT INCOMPRÉHENSIBLES

Les mathématiciens ne sont pas inquiets : une de leurs premières réponses aux logiciens consiste à dire que les énoncés indécidables construits par Gödel ne sont justement pas écrits explicitement. Gödel décrit les méthodes qu'il faut utiliser pour construire les indécidables, mais n'explique jamais toutes les étapes de ce qu'on appelle le codage de I_S qui conduirait à mettre noir sur blanc la formule indécidable, sans raccourcis de notation ni abréviation typographiques. Jamais par exemple personne n'a vu écrit dans le formalisme utilisé par Bourbaki l'indécidable que la méthode de Gödel prétend tirer du système de Zermelo-Fraenkel utilisé par Bourbaki.

Les mathématiciens font remarquer que, si l'on menait le travail jusqu'au bout (en s'aidant de programmes, c'est sensible), on tomberait sur des propositions tellement compliquées qu'aucun mathématicien ne serait en mesure d'en percevoir le sens. Le fait est patent : sans les logiciens, personne n'aurait jamais tenté de démontrer les formules dont les logiciens disent qu'elles sont indécidables. Etant, même aussi compliquées, il est donc possible que les énigmes sur lesquelles les mathématiciens travaillent ne soient jamais des indécidables.

Les mathématiciens marquent un point : ce que les théorèmes de Gödel leur disent être indécidable n'est pas donné explicitement par Gödel et ne correspond pas aux préoccupations authentiques des mathématiciens. Les mathématiciens

peuvent espérer ne jamais rencontrer les monstres de Gödel, car les développements de la théorie du calcul par K. Gödel, A. Turing, E. Post et S. Kleene, à partir des années 1930 et qui se poursuivent aujourd'hui, donnent de nouveaux arguments aux logiciens.

LA THÉORIE DU CALCUL RÉPAND L'INDÉCIDABILITÉ

En tentant de généraliser le théorème de Gödel, on peut-être parce que ces problèmes étaient dans l'air des années 1930 (on commençait à s'intéresser aux calculateurs qui deviendront les ordinateurs), les logiciens proposèrent une théorie du calcul ; celle-ci allait fournir quelques munitions pour ébranler les mathématiciens.

La théorie du calcul consiste à détailler mathématiquement ce qu'est un algorithme. Pour ce faire, plusieurs voies sont possibles, dont celle, très élégante, qui propose à A. Turing. Elle consiste à définir une machine à calcul prototypique d'une simplicité parfaite (appelée aujourd'hui machine de Turing), dont le pouvoir théorique de calcul est aussi grand que le plus puissant des ordinateurs passés ou à venir. Cette théorie précise ce qu'est un système formel et fait grâce à cela, émerger deux grands progrès.

D'une part, on peut formuler des versions générales des théorèmes d'incomplétude de Gödel. L'article de 1931 de Gödel ne concernait que le système formel des *Principia* de B. Russell et A. Whitehead, et quelques systèmes apparentés. La portée des méthodes qu'il utilisait était à identifier, ce que fit la théorie du calcul en précisant ce qu'est un mécanisme de preuve dans un système formel.

D'autre part, la théorie du calcul a permis de formuler, dans chaque système formel une multitude de propositions indécidables ayant un sens proche des préoccupations des mathématiciens, et certainement plus troublantes pour un mathématicien que les énoncés proposés initialement par Gödel.

BOURBAKI CONCERNÉ ?

Donnons quelques exemples d'indécidables parmi les certaines provenant de cette théorie du calcul. Nous nous fixons un système formel S (par exemple, celui de la théorie des ensembles que Bourbaki utilise, mais ce pourrait être celui de l'arithmétique de Peano, ou un autre encore) dont nous supposons qu'il est consistant (lorsque S est inconsistent, tout est vrai et faux à la fois, et donc rien d'intéressant ne se produit dans S).

1. EXEMPLE D'ALGÈBRE INDÉCIDABLE

En algèbre, on utilise des structures (qu'on appelle des semis-groupes) qui sont définies par la donnée de symboles, ici trois, a , b et c , et par des lois qui sont des égalités, ici également au nombre de trois : (1) $ab = bc$, (2) $b = ccc$, (3) $bb = b$. Ce sont les tables de la loi.

Quelles sont les autres lois, exprimées sous forme d'égalités, que nous pouvons obtenir en procédant uniquement par substitution ? (Attention, ab n'est pas égale à ba .)

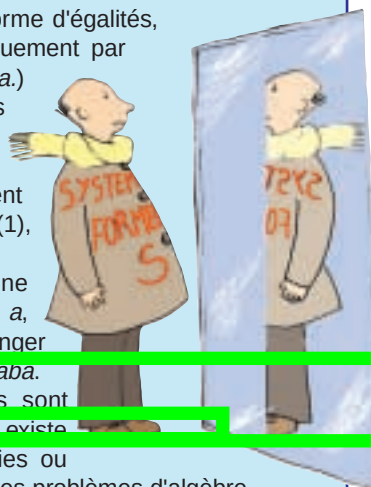
Peut-on, par exemple, en utilisant les égalités ci-dessus et aucune autre arriver à la nouvelle égalité : $aaab = b$?

La réponse est oui : en utilisant successivement les égalités 1, 2 et 3, on obtient, en partant de (1), $aaab = aaac = abcc = bccc = bb = b$.

On démontre, avec ces égalités, que l'on ne trouvera jamais $aba = a$. En effet, partant de a , aucune des trois équations ne permet de changer quoi que ce soit, et l'on ne parviendra jamais à aba .

Ainsi, on démontre que certaines équations sont vraies et que d'autres sont fausses, mais il en existe

dont on ne peut démontrer qu'elles sont vraies ou fausses : aussi élémentaires qu'il paraissent, ces problèmes d'algèbre engendrent l'indécidabilité. Pour tout système formel donné, il existe un ensemble fini E_S d'équations et une équation e_S telle que e_S ne permet pas de déduire e . Pourtant, les lois régissant S ne permettent pas de démontrer la proposition " e_S ne permet pas de déduire e_S ".



2. L'INDÉCIDABILITÉ AVEC DES JEUX

On appelle jeu diophantien un jeu du type suivant : une équation est fixée, par exemple : $(b_1 + a_2) + 3 + a_1 + a_3 = (b_2 + 2)(b_3 + 2) + a_1 + a_3$.

Le joueur A choisit un nombre entier positif pour a_1 .

Le joueur B choisit un nombre entier positif pour b_1 .

Le joueur A choisit un nombre entier positif pour a_2 .

Le joueur B choisit un nombre entier positif pour b_2 .

Le joueur A choisit un nombre entier positif pour a_3 .

Le joueur B choisit un nombre entier positif pour b_3 .

La partie est alors terminée.

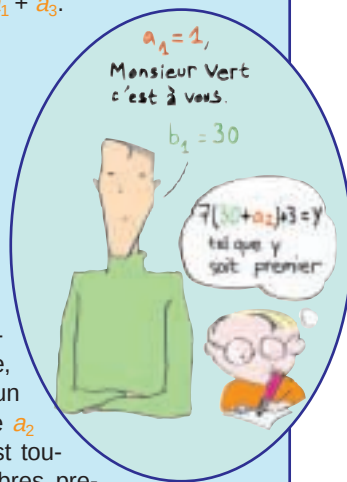
Si l'équation est vérifiée, B a gagné ; si elle ne l'est pas, A a gagné.

En analysant le jeu correspondant à l'équation indiquée, on voit que A gagnera toujours. Justification.

Le premier choix de A est sans importance, car a_1 se simplifie. Le joueur B propose ensuite un nombre b_1 . Le joueur A doit choisir alors un nombre a_2

tel que $7(b_1 + a_2) + 3$ soit un nombre premier. C'est toujours possible, puisqu'il existe une infinité de nombres premiers de la forme $7n + 3$. À partir de là, B ne pourra plus s'arranger pour que l'égalité soit vérifiée, car si l'égalité était vérifiée, après simplification de a_1 et a_3 elle donnerait une décomposition de $7(b_1 + a_2) + 3$ en deux facteurs >1 , ce qui est impossible puisque $7(b_1 + a_2) + 3$ est premier. Le joueur A a donc gagné.

À chaque équation correspond un jeu. Dans un tel jeu à information complète, on sait qu'il existe pour chaque équation une stratégie gagnante pour l'un des deux joueurs : soit A possède la possibilité de toujours gagner, soit c'est B. Bien que le nombre d'échanges soit fini et connu à l'avance, ces jeux diophantiens sont difficiles à analyser. En fait, d'après un résultat d'indécidabilité de Matiassevitch, aucune méthode générale ne permet de mener l'analyse de tous ces jeux : à chaque système formel S correspond au moins un jeu diophantien dont l'analyse est infaisable dans S . Précisément : à chaque système formel S , on peut associer une équation gagnante pour B, et un premier coup pour le joueur A tel que la formule indiquant ce que B doit jouer en réponse à ce premier coup est une proposition indécidable de S .



– On peut écrire un programme *pro* (ou une machine de Turing) qui ne s'arrête pas, mais tel que l'énoncé de *S* qui exprime «*pro* ne s'arrête pas» est indécidable dans *S*. Dit en bref dans le cas particulier du système formel de Bourbaki : Bourbaki n'est pas assez puissant pour comprendre le comportement du programme *pro*.

– On peut construire un ensemble fini de formes géométriques simples (chaque forme a un bord polygonal, possède des sommets à coordonnées entières et est disponible en quantité illimitée) avec lesquelles on peut paver le plan sans interstice ni chevauchement, et pourtant l'énoncé qui exprime l'existence d'un pavage n'est pas démontrable dans *S*. Bourbaki ne voit pas qu'avec les formes de *ens* on pave le plan.

– On peut définir un jeu à information complète (le jeu de damme ou le jeu d'échec sont de tels jeux) tel que le second joueur possède une stratégie gagnante, mais telle aussi que *S* soit incapable de voir comment répliquer correctement à certains coups initiaux du premier joueur. Bourbaki, même s'il continue à développer son travail pendant plus de 1 000 ans, ne connaît jamais la stratégie gagnante au jeu *pro*. Alors qu'elle existe.

– Certaines égalités algébriques ne sont pas vraies, mais *S* ne sait pas le démontrer. En bref, les méthodes de preuves qu'on utilise dans le traité de Bourbaki, même lorsqu'il s'intéresse à des problèmes algébriques simples, sont parfois aveugles.

– Certaines propriétés élémentaires concernant des produits de matrices sont indécidables dans *S*. Il s'agit d'un résultat

très récent (de V. Blondel et J. Tsitsiklis). Même dans des parties élémentaires des mathématiques, Bourbaki ne pourra jamais démontrer tout ce qui est vrai.

LA COMPLEXITÉ EST INDÉCIDABLE

D'autres avancées de la théorie du calcul ont conduit depuis 1965 au développement de la théorie de la complexité de Kolmogorov, où l'on définit la complexité d'une séquence *s* composée uniquement de 0 et de 1, par la taille *K(s)* du plus court programme qui engendre *s*.

Cette théorie, pourtant importante sur le plan pratique (car c'est la théorie mathématique de la compression de données qui, on le sait, concerne toutes les technologies de l'information), est un remarquable nid d'indécidabilité. Certaines situations sont même profondément troublantes, comme celle-ci. Il existe une infinité de propositions du type «la séquence *s* possède la complexité *n*», certaines sont vraies et d'autres fausses. Non seulement un système formel donné passe à côté de certaines formules vraies de ce type mais il ne peut en démontrer qu'un nombre fini (ces résultats ont été établis par N. Kolmogorov et G. Chaitin). La complexité de Kolmogorov échappe gravement à tout système formel qui, par nature, n'en connaîtra qu'une partie finie.

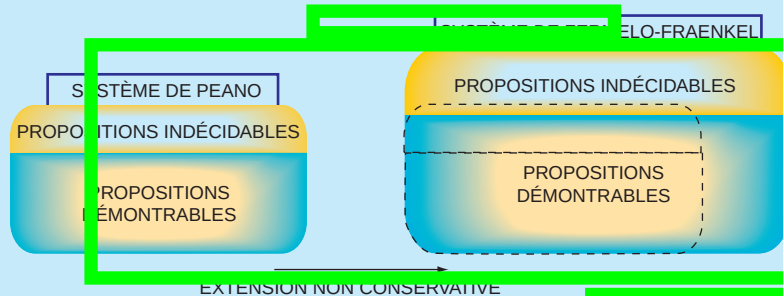
En particulier, en exploitant au mieux les ressources que donne le traité de Bourbaki, il arrivera un moment où il aura déduit tout ce qu'il pouvait sur la complexité des séquences *s* : il aura réussi à identifier quelle était la complexité *K(s)* pour certaines suites *s* en nombre fini, par exemple $K(010101) = 3$, $K(01101001110) = 12$, mais ne pourra pas prouver un seul résultat de plus de ce type. Récemment, certains travaux de S. Chaitin conduisent à évaluer que Zermelo-Fraenkel (donc cela s'applique à Bourbaki) ne pourrait jamais démontrer qu'aucune séquence *s* ne possède une complexité de Kolmogorov supérieure à 100 000. Notamment, tant que Zermelo-Fraenkel permet de montrer l'énoncé «il existe une infinité de *s* ayant une complexité supérieure à 100 000».

La situation n'est pas la marque d'une contradiction dans Zermelo-Fraenkel, mais celle de l'indécidabilité.

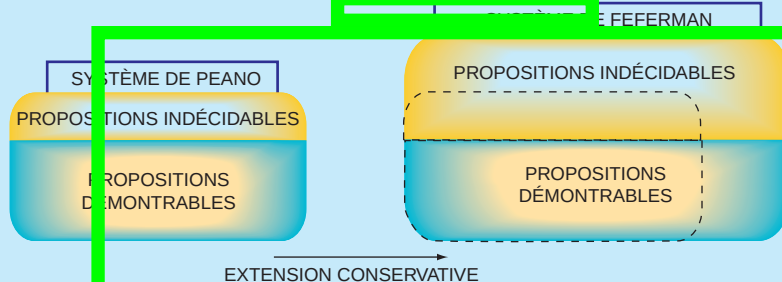
EFFRATABLE ÉQUATION

Un autre domaine où l'indécidabilité a été explicitée par la théorie du calcul est celui des équations arithmétiques. Citons le résultat de G. Chaitin, qui a construit explicitement et a fait imprimer pour de vrai (j'en ai une copie que je garde

3. CONSERVER LES MÊMES INDÉCIDABLES



Quand on passe de l'arithmétique de Peano (PA) à la théorie des ensembles de Zermelo-Fraenkel (ZF), on étend le domaine des objets que l'on peut traiter. On augmente alors le nombre de formules d'arithmétique que la théorie peut démontrer, et l'on ajoute même de nouvelles formules arithmétiques indécidables. Hélas, ce faisant, on risque de démontrer des formules absurdes telles que $0 = 1$, ce qui signifierait que le nouveau système est inconsistent. L'augmentation du pouvoir de preuve que donne une telle extension dite non conservatrice s'accompagne d'une prise de risque.



En revanche, quand on passe de l'arithmétique de Peano (PA) à une extension conservatrice du type de celles proposées par S. Feferman ou S. Simpson, on étend le domaine d'objets que l'on peut traiter (ce qui permet, par exemple, de développer l'analyse classique), mais cette fois sans augmenter le nombre de formules arithmétiques que la théorie peut démontrer (les formules arithmétiques indécidables restent donc les mêmes). Cette attitude prudente empêche d'introduire une inconsistance (si le nouveau système était inconsistent, on y démontrerait la formule $0 = 1$, ce qui signifierait que PA le démontre aussi : donc si PA est consistant, le nouveau système aussi). La découverte qu'on pouvait mener l'essentiel des mathématiques utiles aux sciences de la nature dans de telles extensions prudentes conduit à s'interroger sur le sens des autres extensions : en plus d'être dangereuses, ne sont-elles pas illusoires ?

précieusement) une équation terriblement indécidable (voir l'encadré 5).

L'équation est terriblement indécidable, car G. Chaitin a démontré qu'un système formel donné S ne peut jamais résoudre qu'un nombre fini de cas de l'équation, tous les autres cas étant indécidables dans S . Les moyens de preuve définis au début de ce chapitre ne parviendront donc un jour à résoudre une face à cette équation. Même elle traite se développe pendant un milliard d'années, au-delà d'un certain point d'élucidation maximale, il ne permettra plus jamais de régler un seul cas supplémentaire de l'équation.

QUE RÉPONDEZ-VOUS DONC À ÇA ?

Quelle est la réponse des mathématiciens face à cet arsenal de résultats d'indécidabilité qui ont envahi chaque spécialité mathématique ?

Ils répondent qu'à chaque fois tout cela est construit sur du codage. Le programme qui ne s'arrête pas, le jeu à information complète que Bourbaki ne réussit pas à analyser, l'équation indécidable dont on ne peut traiter qu'un nombre fini de cas, etc., tout cela provient à chaque fois du déguisement avec les notations de divers domaines mathématiques, des indécidables originaux trouvés par Gödel et Turing. À chaque fois, les objets en cause sont complexes et longs à écrire (l'équation de Chaitin, avec ses 12 000 variables, battant tous les records). Les mathématiciens spécialistes d'équations diophantiennes ne se seraient jamais intéressés d'eux-mêmes aux équations que les logiciens aigres de la théorie du calcul leur mettent sous le nez. Les mathématiciens répondent donc : « Les indécidables que vous construisez sont artificiels et toutes vos tentatives de les utiliser ne forcent à croire qu'ils existent. »

ceux que nous rencontrons dans le cours normal du développement de nos théories, risquent d'être indécidables. »

Face à cette réponse, les logiciens devaient dégager les indécidables de tout codage.

INDÉCIDABLES DE J. PARIS ET L. HARRINGTON

Cela se produisit il y a une vingtaine d'années, quand plusieurs énoncés arithmétiques simples et dégagés de tout codage furent démontrés indécidables vis-à-vis de l'arithmétique de Peano (voir l'énoncé indécidable concernant les hydres cité dans la rubrique du mois de novembre).

Nombreux furent ceux, y compris parmi les mathématiciens, qui reconnurent alors qu'un pas important avait été franchi.

Malgré ces progrès, certains mathématiciens ont eu beau jeu de remarquer que les indécidables arithmétiques dégagés du codage inventés par les logiciens n'avaient jamais été envisagés spontanément par les mathématiciens. On parla d'énoncés « cuisinés exprès ».

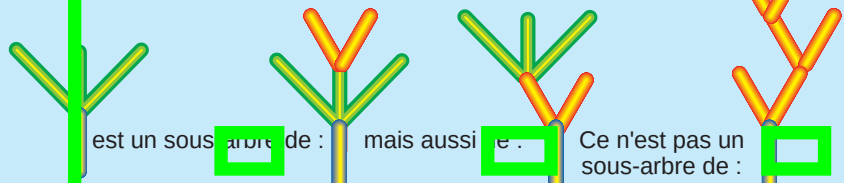
Des énoncés sont, là encore, des constructions de logiciens. De plus, dans la grande majorité des cas, il s'agit d'indécidables de l'arithmétique de Peano, indécidables dans Zermelo-Fraenkel, et non pas d'indécidables de Zermelo-Fraenkel. Il manque donc encore un cas indécidable d'énoncé que les spécialistes d'arithmétique ont cherché à trouver avant que les logiciens ne s'y intéressent et sur lequel ils travaillent, que les logiciens démontreraient indécidable vis-à-vis de l'arithmétique de Peano (qui

est la théorie naturelle pour écrire les raisonnements d'arithmétique) ou, mieux, indécidable avec Zermelo-Fraenkel.

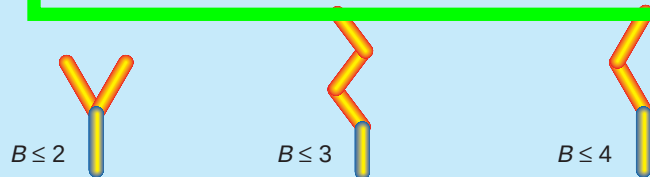
Les candidats ne manquent pas. Il y a d'une part les résultats d'arithmétique qu'on démontre avec des outils plus puissants que ceux de l'arithmétique de Peano. C'est le cas de nombreux théorèmes concernant les nombres premiers dont les premières démonstrations – qualifiées de « secondaires » – utilisaient des techniques d'analyse formalisables dans la théorie Zermelo-Fraenkel, mais pas dans Peano. Il en existe d'autres, mais on ne sait aujourd'hui que l'on peut en fait le démontrer dans l'arithmétique de Peano. Ces énoncés ne constitueront donc pas des propositions envisagées spontanément par les mathématiciens, démontrables dans Zermelo-Fraenkel, indécidables dans

4. LES ARBRES DE KRUSKAL

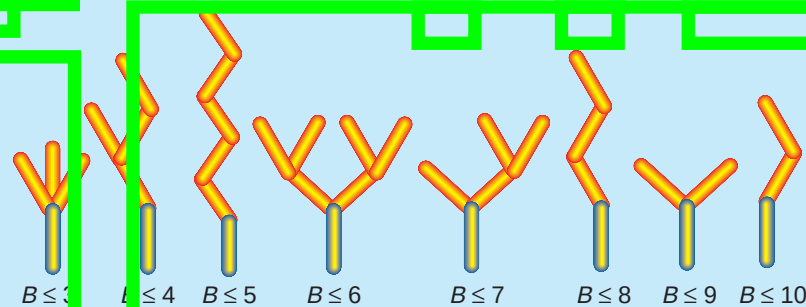
Un arbre est dit sous-arbre d'un autre si on peut retrouver la forme du premier dans le second.



On cherche à construire des séries d'arbres tels qu'aucun ne soit le sous-arbre d'un arbre placé plus loin. Une telle série d'arbres est dite correcte.



On dit qu'une série est de type 2 si le premier arbre possède deux branches au plus, le second trois branches au plus, etc. En construisant des séries correctes de type 2, on s'aperçoit qu'elles n'ont jamais plus de quatre arbres.



Une série est de type 3 si le premier arbre possède trois branches au plus, le second quatre branches au plus, etc. On s'aperçoit, là aussi, qu'on ne peut jamais prolonger indéfiniment les séries correctes de type 3.

Le théorème de Kruskal indique que, « pour tout entier n supérieur à 1, il existe une limite k à la longueur des séries correctes de type n . »

Cet énoncé ne contient aucun codage déguisé de proposition logique. C'est pourtant un énoncé indécidable de l'arithmétique de Peano. Cet énoncé est l'un de ceux qui auraient dû convaincre les mathématiciens que, même à propos de problèmes simples et naturels, l'indécidabilité peut surgir.



Gregory Chaitin

5. LES INDÉCIDABLES DE LA COMPLEXITÉ

Même le plus puissant système formel ne peut traiter qu'un nombre fini de cas de l'équation de Chaitin.

Gregory Chaitin a construit et fait imprimer une équation indécidable. L'équation est à coefficients entiers et ne fait intervenir que des additions, des multiplications et des exponentiations (une équation simple de ce type serait :

$n - x^y + 3y + 2t = 0$). On ne s'intéresse qu'aux solutions en nombres entiers de l'équation. L'équation dépend d'un paramètre n et possède 12 000 variables : on peut la résumer en écrivant : $P(n, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{12000}) = 0$.

Pour chaque valeur de n , l'équation possède soit un nombre fini de solutions, ou n'en possède qu'un nombre fini. On dit que "l'équation est résolue pour n " si on réussit à savoir dans lequel des deux cas on se trouve. G. Chaitin a démontré qu'un système formel fermé n ne peut jamais résoudre qu'un nombre fini de cas de l'équation, tous les autres cas étant indécidables dans S . Pour avancer dans la résolution de cette équation, les mathématiciens seront indéfiniment obligés d'ajouter de nouveaux axiomes à leurs théories.

Peano. Pour le grand théorème de Fermat, la question est ouverte : la démonstration actuelle utilise des méthodes qui dépassent l'arithmétique de Peano, et l'on ne sait pas la retranscrire dans Peano.

Les conjectures considérées par les arithméticiens (conjectures des nombres premiers jumeaux, conjecture de Riemann, conjecture de Goldbach, etc.) sont peut-être des indécidables de l'arithmétique de Peano ou de Zermelo-Fraenkel. Personne n'a su le démontrer, et aucune piste ne semble ouverte. Force est de constater ici l'échec des logiciens. Finalement aucun argument définitif n'a été fourni aux mathématiciens sceptiques, et la plupart des arithméticiens restent persuadés que la question de l'indécidabilité ne se pose pas vraiment pour les conjectures non démontrées. Au pire, pensent-ils, ces conjectures seront indécidables dans Peano, mais décidables dans Zermelo-Fraenkel. Le débat n'est donc pas clos.

AUTRES EXTENSIONS DE L'ARITHMÉTIQUE

Une explication de cette situation est suggérée par certains travaux récents des logiciens S. Feferman et S. Simpson qui se sont intéressés à des types nouveaux d'extension de l'arithmétique.

Lorsqu'on envisage d'étendre le pouvoir de l'arithmétique pour inclure les nombres réels, des fonctions continues et des objets complexes que l'analyse utilise, la méthode que, adoptée par Bourbaki et par la quasi-totalité des mathématiciens, consiste à passer à la théorie des ensembles Zermelo-Fraenkel. La puissance de Zermelo-Fraenkel provient de l'axiome de l'infini, car on sait que si l'on prend Zermelo-Fraenkel et qu'on y remplace l'axiome «il existe un ensemble

infini» par l'axiome «il n'existe pas d'ensemble infini», on obtient alors un système équivalent à Peano.

L'existence de Peano et de Zermelo-Fraenkel augmente le domaine d'objets mathématiques que le mathématicien peut traiter, mais accroît le risque de l'inconsistance dans le sens suivant : Zermelo-Fraenkel pourrait être inconsistant et Peano consistant, alors que l'inverse est impossible (car la consistance de Zermelo-Fraenkel permet de prouver celle de Peano, mais pas l'inverse).

Autrement dit, en passant de Peano à Zermelo-Fraenkel, le mathématicien enrichit les objets au prix d'un risque nouveau de contradiction. Si la situation était réversible, ce qu'on a cru longtemps, pour des raisons de commodité, on hésiterait, car nul ne souhaite renoncer aux résultats de l'analyse, qui sont si importants en physique et dans les applications des mathématiques. Cependant il existe un autre type d'extensions de l'arithmétique qui ne prend pas de risque et qui pourtant permet aussi de faire de l'analyse et de développer toutes les mathématiques nécessaires aux physiciens.

Ainsi, S. Feferman et S. Simpson ont mis à la disposition des mathématiciens des versions de l'analyse où l'on retrouve des résultats classiques (théorie classique des fonctions continues, existence de solution de systèmes différentiels, etc.) et tous les objets et méthodes utiles aux développements des mathématiques servant dans les sciences de la nature.

Ces systèmes sont un peu plus complexes à utiliser que Zermelo-Fraenkel, mais leur intérêt est immense. Ils montrent, d'une part, que d'autres voies que celle un peu brusque de la théorie des ensembles sont praticables et suffisent pour fonder et développer les mathéma-

tiques dont les sciences ont besoin. D'autre part, ils montrent que ce n'est peut-être pas par hasard si ce qui intéresse spontanément les mathématiciens quand il s'agit d'arithmétique n'a jamais été prouvé indécidable vis-à-vis de Peano.

Certaines extensions prudentes possèdent les mêmes indécidables arithmétiques que Peano, aussi s'interroge-t-on : les extensions prudentes ne sont-elles pas la voie raisonnable et réaliste d'extension de Peano ? La voie de Zermelo-Fraenkel correspondrait à une maison miniature,

commode, mais imprudente, voire trompeuse. Les indécidables de l'arithmétique de Peano seraient indécidables pour de bonnes raisons, et les mathématiciens ne s'intéresseraient jamais spontanément à des indécidables de Peano parce que ils seraient dans le monde des mathématiques applicables, où les indécidables de Peano sont indécidables.

Pour faire de la physique, seules certaines parties des mathématiques sont utiles ; pour des raisons de commodité, on utilise Zermelo-Fraenkel qui est inutilement puissant. Cette puissance a pour effet (peut-être malencontreux) de diminuer le nombre des indécidables ; ne considérer que les systèmes formels juste assez puissants pour faire de la physique ne conduit pas à la suppression d'indécidables. Il y a peut-être une raison profonde, mal comprise aujourd'hui, à cette situation : il se pourrait que seuls les systèmes qui gardent les mêmes indécidables (les extensions conservatrices de Peano correspondent aux «vraies mathématiques», ce que, instinctivement, les mathématiciens avaient compris).

Tout cela est bien mystérieux et compliqué. S'astreindre à ne considérer que des systèmes qui maintiennent les mêmes indécidables plutôt que de vouloir s'en débarrasser (chose de toutes les façons impossible, on le sait) non seulement limiterait les risques d'inconsistance, mais éviterait d'entrer dans un monde abstrait irréel et peut-être insensé, et en tout cas inutile à l'applicabilité des mathématiques.

V. BLODEL et J.N. TSITSIKLIS, *The Boundedness of All Products of a Pair of Matrices is Undecidable*, rapport de recherche de l'Université de Liège, 1999.

G. CHAITIN, *The Limits of Mathematics*, Springer-Verlag, 1997.

J.-P. DELAHAYE, *Information complexité et hasard*, Hermès, Paris, 1994 et 1999.

J.-L. KRIVINE, *Théorie des ensembles*, Nouvelle bibliothèque mathématique, Cassini, Paris, 1998.

Y. MATHIASSEVITCH, *Le dixième problème de Hilbert et son indécidabilité*, Masson, 1995.



La gravité sans pesanteur

ROLAND LEHOUCQ

En chute libre, dans un champ de pesanteur, on a la sensation de l'absence de pesanteur ! De ce paradoxe résulte l'état d'impesanteur.

Platon avait tort : si, à la surface de la Terre, les corps «graves» tombent, ce n'est pas en raison... de leur propension à la chute. Un tel raisonnement circulaire évoque le raisonnement des médecins de Molière, «voilà ce qui fait que votre fille est muette» pour expliquer que Lucinde ne parlait pas. Les corps tombent parce que les masses s'attirent : c'est la gravitation universelle, et les corps sur Terre sont attirés vers le bas par la masse de la Terre, plus précisément vers le centre de la Terre.

Toutefois, la Terre n'est pas parfaitement sphérique, comme l'imposerait la seule gravitation (la gravitation tend à ce que les masses soient aussi proches que possible et c'est la forme sphérique qui remplit cette condition). La Terre tourne, et, outre la force d'attraction universelle, les masses subissent aussi une force tendant à les écarter de la surface. Cette force centrifuge est d'autant plus importante que la distance à l'axe de rotation de la Terre est grande, de sorte que la Terre est renflée à l'équateur, où la force centrifuge est maximale, et aplatie aux pôles, où elle est nulle.

Sur l'équateur terrestre, la force centrifuge n'est qu'un trois-centième de l'at-

traction gravitationnelle, et la pesanteur est peu différente de l'attraction terrestre. Remarquons cependant qu'en sautant en hauteur, la intérêt à sauter aux pôles, et qu'une variation d'un trois-centième du record du monde de saut en hauteur (2,45 mètres) n'est que très légèrement inférieur à un centimètre, la précision de mesure des sauts. Si la Terre tournait 17 fois plus vite, les jours n'auraient que 1,4 heure, et les habitants situés sur l'équateur seraient éjectés dans l'espace.

Notre perception physiologique du poids est indissociable du sol sur lequel nous reposons. Nous ne passons pas à travers le sol, parce que l'attraction terrestre n'est pas suffisante pour briser les liaisons chimiques qui lient les atomes du sol : ainsi subissons-nous de la part de celui-ci une force de réaction exactement opposée à la gravité terrestre. C'est justement cette réaction qui nous donne la sensation de poids : que le sol se dérobe sous nos pieds et c'est la chute ! Le mouvement est théoriquement uniformément accéléré, mais dans l'air, par exemple pour un parachutiste en chute, la vitesse de chute atteint une limite déterminée par la densité de l'air et par la géométrie du corps.

Dans un puits vidé de son air, la chute libre imposée par la gravité n'est perturbée par aucune autre force. Le mouvement est alors rectiligne et uniformément accéléré, à condition de négliger les variations de l'accélération de la pesanteur (l'attraction diminue à mesure que l'on s'approche du centre de la Terre et la force de Coriolis (due à la rotation de la Terre) agit légèrement sur la trajectoire des objets en mouvement). Supposons que nous lâchions un objet pendant la chute. Stupeur ! Il semble flotter sur place. Repoussé, il s'éloigne de nous à vitesse constante. La gravité semble avoir disparu.

LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

Cette situation est comparable à celle vécue par un astronaute en orbite autour de la Terre : la force de gravitation est équilibrée par la force centrifuge due à sa rotation. On peut aussi décomposer son mouvement en une chute perpétuelle et un mouvement uniforme résultant de sa vitesse le long de son orbite. Toujours est-il que nous ressentons les effets, parce que le sol s'oppose à notre chute vers le centre de la Terre. Mais cette sensation disparaît quand nous subissons l'attraction gravitationnelle sans que s'exerce aucune résistance. La conclusion semble donc paradoxale : un mobile en chute libre dans un champ de pesanteur donne à ses passagers l'illusion que le champ de gravitation n'existe pas ! C'est la définition de l'état d'impesanteur où les effets de la pesanteur ne se manifestent plus, ce qui implique nécessairement la disparition réelle de la gravité.

Inversement, un mobile accéléré uniformément dans une direction donne à ses passagers l'illusion d'une pesanteur dans la direction opposée. C'est ce que ressentent les astronautes lors du décollage d'une fusée où l'accélération initiale est si forte qu'ils subissent une pesanteur artificielle plusieurs fois



Dessins de Bruno Vacaro

supérieure à celle de la Terre. Dans la bande dessinée *Objectif Lune*, Hergé distingue la phase propulsée (avec création d'une pesanteur artificielle) de la phase balistique de la fusée lunaire (qui s'accompagne d'un état d'impesanteur). L'équivalence entre chute libre et impesanteur ou entre pesanteur et mouvement accéléré, connue sous le nom de principe d'équivalence, est le fondement de la théorie de la gravitation élaborée par Albert Einstein au début du ^{xx}e siècle sous le nom de Relativité générale.

La Terre étant en chute libre dans l'espace (car elle gravite autour du Soleil) pourquoi ses habitants ne sont-ils pas en état d'impesanteur? Ils le seraient si la Terre avait une masse négligeable, mais, étant très massive, elle crée dans son voisinage un champ de gravité suffisant pour nous plaquer à sa surface. Dans une station orbitale habitée, la situation est différente : les astronautes sont en impesanteur, car l'attraction qu'exerce la station sur ses occupants est totalement négligeable par rapport au champ de pesanteur terrestre.

Dans la pratique, l'obtention d'un état d'impesanteur parfait est délicate, même dans une station orbitale. Divers facteurs ajoutent des effets perturbateurs : l'inhomogénéité de la répartition de la masse de la Terre, le frottement de la haute atmosphère sur la station, le mouvement de la station sur elle-même, etc. Ainsi, utilise-t-on souvent le terme de microgravité, qui désigne un état où la pesanteur apparente est très faible.

L'ACCÈS À UNE PHYSIQUE ORIGINALE

En microgravité, les scientifiques étudient des systèmes physiologiques et des matériaux dans des conditions impossibles à réaliser sur la Terre. L'absence de pesan-

teur apparente modifie considérablement les comportements expérimentaux et fait disparaître des phénomènes aussi courants que la sédimentation ou la convection.

Les liquides ont aussi des comportements étonnants. Sur Terre, sous l'effet de la gravité, un liquide prend la forme du récipient qui le contient. La tension superficielle, une force beaucoup plus faible qui résulte de la différence entre la force de liaison des molécules à la surface et la force de liaison des molécules à l'intérieur du liquide n'a d'effets que sur le ménisque, aux bords du récipient. En microgravité, puisque la pesanteur apparente est quasi nulle, la tension superficielle impose ses effets et fixe la configuration d'équilibre du liquide, c'est-à-dire celle qui minimise son énergie. En l'absence de gravité, tout liquide tendra vers la forme sphérique pour laquelle la surface est minimale à volume fixé, car c'est l'état où l'énergie liée aux forces de tension superficielle est minimale.

C'est ce comportement insolite qui surprend le capitaine Haddock lorsqu'il tente de boire un verre de whisky dans *Objectif Lune*. La fabrication des plombs de chasse est également fondée sur ce comportement : de petites quantités de métal fondu placées en chute libre adoptent la forme sphérique et se solidifient dans cette configuration avant d'atteindre le sol. Cet effet peut être simulé au sol, comme

l'a fait Joseph Plateau en 1861, en mélangeant deux liquides de même densité, mais non miscibles : grâce à la

faiblesse d'un liquide dans l'autre, la masse liquide isolée au sein du second fluide adopte la forme

sphérique (ce que l'on voit dans les lampes à lave).

Ce comportement inhabituel n'est pas sans poser problème : comment boire dans l'espace? Comment alimenter les systèmes de

propulsion des satellites?

Sans précautions particulières, le carburant se répartirait au hasard le long des parois du réservoir rendant impossible l'alimentation régulière des propulseurs.

Le séjour des humains dans l'espace est limité par les modifications physiologiques qui résultent de l'état d'impesanteur. Après, plusieurs mois, les os se décalcifient, comme dans l'ostéoporose. Deux solutions pour les séjours de longue durée dans l'espace : l'adaptation de l'environnement à l'homme ou l'adaptation de l'homme à son environnement. Dans le premier cas, il s'agit de recréer un état de pesanteur analogue à celui que l'on a sur Terre, par exemple en faisant tourner la station sur elle-même. Dans le second, il faudrait attendre (ou provoquer?) les mutations qui permettraient l'adaptation de l'homme à cette absence de pesanteur. Toutefois, ces nouveaux humains adapteront-ils leur corps? Nous ne pourrions difficilement revenir sur la Terre... excepté dans une piscine, où la poussée d'Archimède compense une partie de la gravité.

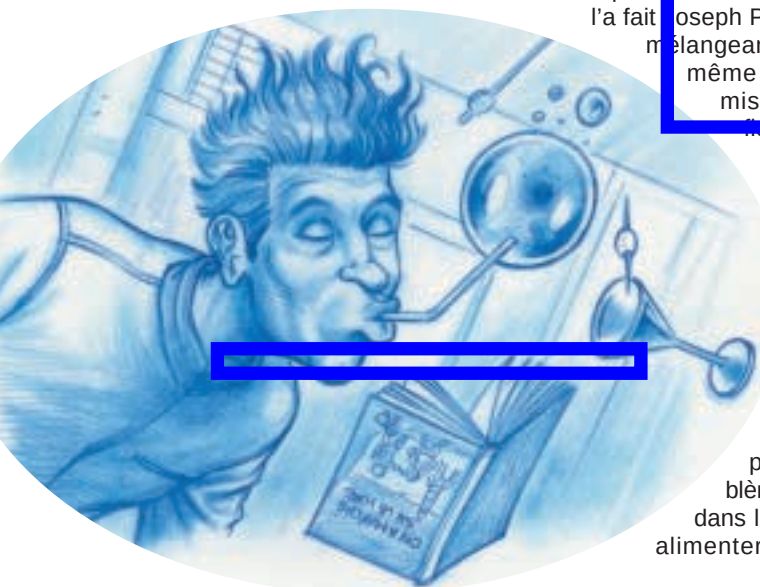
Roland LEBOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

J.-P. PENOT, *Le phénomène d'impesanteur*, in *Bulletin de l'Union des physiciens*, n° 700, p. 1-44, 1988.

V. PLETZER, *Pesanteur? Non, merci!*, in *Ciel et Terre*, vol. 113, p. 53, 1997.

Superdéformation en apesanteur, in *Pour la Science*, p.22, août 1997.

R. WHITE, *Le corps humain en apesanteur*, in *Pour la Science*, novembre 1998.



Epistémologie

Le cas Spencer. Religion, science et politique

Daniel Becquemont et Laurent Mucchielli, Presses universitaires de France, 1998 (358 pages, 170 francs).

À la fin du ^{xx}e siècle, qui connaît et l'Herbert Spencer ? Il fut novateur, puisqu'il fonda la philosophie évolutionniste, et on le pense, à tort, lié à son contemporain et compatriote Charles Darwin. Certes, Spencer (1820-1903) a intégré la sélection naturelle darwinienne dans sa théorie, la « philosophie synthétique », et Darwin a repris la formule spencérienne de la « survivance du plus apte ». Toutefois, on connaît mal cet auteur, premier, qui a publié de nombreux ouvrages et articles, qui a connu une gloire aussi éclatante qu'éphémère (une vingtaine d'années, entre 1860 et 1880) dans son pays, l'Angleterre, et jusqu'à la fin du siècle en Europe, aux États-Unis et en Asie. Il a séduit avant d'être marginalisé et rejeté dans les oubliettes de l'histoire de la philosophie. Bref, il existe bel et bien un « cas Spencer ».

De ses origines familiales, il restera fortement marqué par des idées religieuses méthodistes : en rupture avec l'Église anglicane, sa religion prône l'individualisme, l'individualisme (assurer la prospérité matérielle par un travail acharné), l'antiétatisme (compter sur soi et non sur l'État, ses lois et ses aides), la morale et la rigidité. Fragile, solitaire, dépressif et peu cultivé, Spencer sera employé aux chemins de fer avant d'entamer une terne carrière de journaliste et de se consacrer à l'écriture, après plusieurs héritages.

Spencer sera viscéralement attaché à quelques idées essentielles qui lui sont personnelles. Pour lui, la pensée doit se développer lentement, sans asservissement ni recherche particulière. Fidèle à ce raisonnement, il rejettera toute contradiction, considérée comme une ingérence intolérable. Il est confiant dans les lois universelles de la nature, dans l'amélioration du monde vers un avenir radieux. Il croit à une progression de l'homogène vers l'hétérogène, de l'incohérent vers le cohérent, et de l'indéfini vers le défini, reliant la matière (l'inorganique) au vivant (l'organique). De principes en synthèses successives, il procède par généralisations, du cosmos aux sociétés humaines, et il a ainsi englobé divers champs de la connaissance, comme la psychologie, la biolo-

gie, la sociologie et l'éthique, voulant reconcilier science et religion.

Dès 1822, c'est-à-dire plusieurs années avant la publication de l'*Origine des espèces* (1859) de Darwin, Spencer emploie le terme « évolution » et propose son hypothèse du développement des espèces : elle lui semble bien plus vraisemblable que celle de la Création. Toute espèce subit « certains changements de structure » dès qu'elle rencontre des conditions différentes de celles qui précédaient. Il va même jusqu'à concevoir une origine commune à tous les êtres vivants. Les organismes les plus hétérogènes sont apparus plus récemment, et le progrès organique est influencé par les circonstances, une même cause donnant plusieurs effets (« loi de multiplicité des effets »). Selon Spencer, les espèces se modifient dans leur ensemble, contrairement à Darwin (il ne considère pas les variations individuelles), et plus les formes s'élèvent en complexité, plus elles se différencient ; c'est le résultat de l'adaptation fonctionnelle de chaque organisme au milieu et de l'hérédité des caractères acquis. Il considère l'évolution comme un progrès jusqu'à certaines limites indépassables, qui correspondraient à un équilibre parfait.

La place de l'homme est liée à la recherche d'un but immédiat : le bonheur. Chacun porte en lui les qualités morales qui lui permettent une meilleure adaptation possible aux conditions d'existence. L'amélioration de l'esprit humain se fait grâce à plus d'ingéniosité, plus d'énergie. Mais le mal existe, il résulte de la non-adaptation, mais il tend à disparaître, tout comme ceux qui sont incapables à l'adaptation. Une seule entrave représente le mal absolu : les restrictions infligées par l'État à la liberté individuelle. Reconnaître dans cette position le darwinisme social est abusif ; c'est plutôt une position proche de la théologie naturelle du ^{xviii}e siècle.

La philosophie spencérienne a séduit par sa simplicité, mais elle s'est rapidement trouvée en contradiction avec les aspirations et les exigences d'une société industrielle qui a engendré des lois sociales, une organisation du travail, qui a donné de l'importance à l'État et à la politique. Le philosophe a assisté, impuissant, à la transformation d'une société qu'il réprouvait et ne comprenait pas. Ses idées se sont effacées par ailleurs par manque de connaissances, et son œuvre immense, voire boursouflée, est apparue médiocre et pitoyable : cet évolutionniste n'a su ni évoluer ni s'adapter !

Daniel Becquemont et Laurent Mucchielli dressent, dans cet essai, un constat documenté, argumenté et sévère. Ils démontrent magistralement que l'éclipse spencérienne était justifiée.

Michèle FEBVRE

Biologie

Les rythmes du vivant (Origine et contrôle des rythmes biologiques)

Jean Boissin et Bernard Canquillhem (préface de Michel Jouvet). Éditions Nathan Université/CNRS Éditions, 1998.

En 1779, l'astronome J. d'Ortous de Mairan observe le maintien d'une activité biologique rythmique en l'absence du cycle jour-nuit : les feuilles de la sensitive continuent de se mouvoir quand on supprime les repères temporels. Cependant, c'est seulement en 1952 que Augustin D. Candoille réussit la première inversion d'un rythme biologique, ce qui le conduira à la formulation de l'hypothèse de l'existence d'une horloge interne autonome. La série des travaux ultérieurs, menés par les botanistes, s'inscrit, au ^{xix}e siècle dans un débat plus large sur l'autonomie du vivant par rapport aux influences de l'environnement.

Il faut attendre 1972 pour que, chez les mammifères, l'horloge endogène principale soit localisée dans le système nerveux central. Beaucoup plus récemment, la génétique moléculaire a décrit, chez des espèces variées (une algue, un insecte, un mammifère), des gènes aux caractéristiques communes, responsables de la genèse de certains rythmes circadiens (période proche de 24 heures) ou de leur régulation par la lumière. Ces résultats récents semblent à l'origine du regain d'intérêt pour les rythmes, ainsi que leur prise en compte dans diverses branches de la médecine.

C'est dans ce contexte d'actualité scientifique renouvelée que J. Boissin et B. Canquillhem nous offrent une synthèse des connaissances sur les rythmes biologiques de différentes périodes. Leur panorama embrasse les rythmes « infradiens », de période inférieure à 24 heures (l'exemple plus particulièrement développé est celui de la pulsativité de l'hormone GnRH, libérée par l'hypothalamus, qui agit sur l'hypophyse et les glandes sexuelles) ; les rythmes circadiens avec des développements intéressants sur leurs propriétés formelles, le rôle de la localisation des structures qui les engendrent, les rythmes annuels, avec un accent sur l'analyse phénoménologique et physiologique de la réaction aux variations de la durée des jours au cours de l'année et la signification de cette réaction adaptative aux variations saisonnières de l'environnement.

D'emblée, les auteurs adoptent une approche qui permet de situer les rythmes dans le contexte de l'adaptation aux fluctuations cycliques de l'environnement. Cette approche, très finaliste, a toutefois l'avantage de bien conduire le lecteur et de faciliter la lecture. Ainsi de grandes régulations physiologiques, longtemps conçues dans le cadre exclusif d'une homéostasie «réactive» (concept qui renvoie à la fixité du milieu intérieur, de Claude Bernard), s'enrichissent du concept d'adaptation anticipatoire aux variations cycliques de l'environnement. Le chapitre sur les propriétés formelles de l'oscillateur circadien, clair et détaillé, aide à saisir le sens d'expériences qui concernent aussi bien le niveau comportemental que cellulaire, où l'oscillateur est soumis à un stimulus perturbateur (lumière ou agent chimique) à un moment particulier du cycle.

Dans le deuxième chapitre, les auteurs abordent des questions contemporaines, de la compréhension des «racines moléculaires et génétiques» des oscillateurs circadiens à l'identification de l'horloge, ou des horloges des organismes. Le débat, à ce propos, a été récemment ravivé par la découverte d'oscillateurs dans de nombreux tissus extérieurs au système nerveux central : l'horloge circadienne de l'hypothalamus, qui est effectivement le siège de fluctuations rythmiques de l'activité cellulaire, semble intégrer des signaux provenant de divers oscillateurs périphériques.

C'est également dans ce chapitre que l'on touche aux limites inhérentes à ce type d'ouvrage, qui présente un tableau inévitablement décalé par rapport aux avancées scientifiques. En revanche, la démarche synthétique, passant en revue une question comme celle du siège de l'automatisme circadien dans de nombreuses espèces, permet d'éclairer la phylogénétique par la génétique.

Le troisième chapitre est consacré aux stratégies adaptatives des organismes face aux variations saisonnières de l'environnement. Les auteurs y abordent la question du rapport entre photosensibilité et rythme circadien, développant les notions qui concernent la mesure photopériodique du temps. Cette question concerne la compréhension du lien entre les variations saisonnières de la durée du jour et l'activité de reproduction. Après une présentation des diverses théories proposées, les auteurs détaillent les étapes nerveuses et endocriniennes du photopériodisme, terminant ce chapitre avec l'examen du rôle de la mélatonine dans la synchronisation des rythmes circadiens avec les cycles saisonniers.

Enfin le dernier chapitre, qui consi-

dère l'espèce humaine, commence par un catalogue raisonné et souvent critique des grands rythmes circadiens (fluctuations de la vigilance, de la température corporelle, rythmes hormonaux, etc.) pour aboutir à la question de l'existence de rythmes saisonniers. C'est dans ce chapitre qu'un lecteur intéressé par la relation entre les rythmes circadiens et les rythmes du sommeil trouvera le plus matière à réflexion. La question de la pathologie du système circadien, souvent évoquée par les biologistes pour justifier leurs travaux, est vue avec le regard critique du praticien qui est confronté aux limites de l'application des données expérimentales en clinique. Ce chapitre s'achève sur les contraintes que l'organisation sociale (travail posté, changements fréquents de fuseaux horaires) exerce sur l'expression des rythmes biologiques. Les auteurs, très prudents, à ce sujet, admettent toutefois que les contradictions entre un environnement artificiel et le caractère endogène des rythmes biologiques peuvent déboucher sur des accidents du système circadien. Ils montrent l'existence d'une authentique chronopathologie en psychiatrie. Le chapitre s'achève par un examen de la maîtrise pharmacologique des rythmes biologiques, présentant rapidement quelques exemples de cas où la chronopharmacologie a donné des résultats très encourageants.

Cette synthèse arrive à point nommé. Ceux qui, attirés par des débats parfois trop médiatisés sur la mélatonine ou par de prétendues cures chronobiologiques, s'interrogent sur la réalité des phénomènes y trouveront des données fiables. Ceux qui, curieux, souhaitent acquérir une culture chronobiologique, y trouveront d'utiles informations. Paraphrasant la préface de Michel Juvet, nous dirons que ce livre constitue une invite à dépasser le cadre étroit du raisonnement moléculaire ou endocrinien : il incite à prendre conscience de l'aboutissement des rythmes du vivant dans nos raisonnements, à intégrer les constantes interactions du biologique avec les cycles naturels, à réfléchir à la notion d'adaptation telle qu'elle peut être appréhendée au travers d'un concept, incongru pour certains : celui d'anticipation en biologie.

Jacques SERVIÈRE

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de **Pour la Science** est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>

FRANCE INFO

et

POUR LA SCIENCE

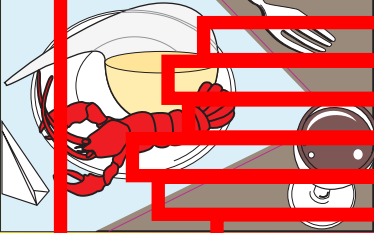
vous invitent

à écouter la chronique

de Marie-Odile Monchicourt

Info Sciences

Tous les jours sur France Info à 15 heures 41, 17 heures 10, 20 heures 12, 22 heures 12, et 23 heures 42



Les prochains résultats présentés dans la rubrique Science et Gastronomie seront annoncés sur France Info le 28 décembre 1999.



analyses de livres

© POUSSIN 1999 - 28 DÉCEMBRE 1999

205

Index 1999

ARTICLES

ARCHÉOLOGIE – ETHNOLOGIE PALÉONTOLOGIE

- ARGENT DE L'ANCIEN PÉROU (*L'*), par Alain Gioda et Carlos Serrano, n° 259, p. 42.
- DATATION DES OBJETS EN BOIS (*La*), par Gottfried Matthäus, n° 261, p. 42.
- DENTS DES TIRANNOSAURES (*Les*), par William Abler, n° 260, p. 38.
- FEU DOMESTIQUÉ (*Le*), par Jacques Collina-Girard, n° 258, p. 56.
- GALETS, OUTILS DU PALÉOLITHIQUE (*Les*), par Sophie A. de Brugghe, n° 260, p. 52.
- JARDINS ET LES ZOOS DANS L'ANTIQUITÉ (*Les*), par Karen Polinger Foster, n° 264, p. 72.
- QUERCY TROPICAL (*Le*), par C. Maurice Channin et S. Legendre, n° 261, p. 68.
- TREMBLEMENTS DE TERRE ET ARCHÉOLOGIE, par Hervé Philip et Arkadi Karakhanian, n° 261, p. 36.
- VIE DES TYRANNOSAURUS REX (*La*), par Gregory Erickson, n° 265, p. 32.
- VILLES DES MAYAS (*Les*), par W. Wurster, n° 262, p. 38.

ASTRONOMIE ASTROPHYSIQUE

- AMAS DE GALAXIES (*Les*), par Hans Böhringer, Ulrich Briel et Patrick Henry, n° 256, p. 44.
- BIG BANG MINIATURE (*Un*), par Madhusree Mukerjee, n° 259, p. 48.
- BRIQUES DE LA VIE (*Les*), par Max Bernstein, Scott Sandford et Louis Allamandola, n° 262, p. 70.
- CARTOGRAPHIE DE L'UNIVERS (*La*), par Stephen Landy, n° 260, p. 80.
- CIEL INFRAROUGE VU DE L'ESPACE (*Le*), par A. Abergel, J. Boulanger, G. Lagache, E. Dartois et J.-L. Pugeat, n° 260, p. 82.
- CLIMAT VARIABLE DE VÉNUS (*Le*), par Mark Bullock et David Grinspoon, n° 259, p. 34.
- DERRIÈRE LA VOIE LACTÉE, par René Kraus, Korteweg et Ofer Lahav, n° 255, p. 74.
- ÉCLIPSES DE SOLEIL (*Les*), par Pierre Guillermier et Serge Koutchmy, n° 259, p. 70.
- ÉCLIPSES ET CHRONOLOGIE, par Denis Savoie, n° 259, p. 78.
- INFLATION DE L'UNIVERS (*L'*), par Martin Bucher et David Spergel, n° 257, p. 50.
- MAGNÉTOILES (*Les*), par Kevin Hurley, n° 265, p. 84.

MIGRATION DES GALAXIES (*Les*), par René Kraus, Korteweg et Ofer Lahav, n° 255, p. 74.

SOURCES DE RAYONNEMENT X MOU (*Les*), par Saul Rappaport et Edward van den Heuvel, n° 258, p. 76.

SUPERNOVES POUR SONDER L'ESPACE-TEMPS (*Des*), par Craig Hogan, Robert Kirshner et Nicholas Suntzeff, n° 257, p. 36.

BIOLOGIE – GÉNÉTIQUE MÉDECINE – PHYSIOLOGIE

- ADN ET ÉVOLUTION, par Richard Moxon et Christopher Villan, n° 257, p. 84.
- CELLULES ENCAPSULÉES (*Les*), par Michael Lysaght et Patrick Aebischer, n° 266, p. 160.
- CELLULES SOUCHES EMBRYONNAIRES (*Les*), par Roger Pedersen, n° 260, p. 58.
- CHIRURGIE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR (*La*), par Eric Grison, Ron Kikinis, Ferenc Jolesz et Peter Black, n° 261, p. 70.
- CLONAGE DES MAMMIFÈRES (*Le*), par Ian Wilmut, n° 256, p. 36.
- CONFECTION DE TISSUS VIVANTS (*La*), par Robert Langer et Joseph Vacanti, n° 266, p. 150.
- DE L'ÉTOFFE À LA MAIN, par Marie-Ange Bigué-Bueno et Marc Renner, n° 266, p. 144.
- DÉCLENCHEMENT DE L'ACCOUCHEMENT (*Le*), par Roger Smith, n° 259, p. 56.
- DÉTECTION DES PHÉROMONES (*La*), par Didier Trotier et Kjell Døving, n° 263, p. 88.
- DÉVELOPPEMENT DES MEMBRES (*Le*), par Robert Riddle et Clifford Tabin, n° 258, p. 84.
- FABRICATION D'INSECTES UTILES (*La*), par Peter Atkinson et David O'Brochta, n° 256, p. 82.
- GRIPPE CONTRE LA GRIPPE (*La*), par N. Bischofberger, C. Laver et R. Webster, n° 257, p. 60.
- LUTTE CONTRE LE CANCER DE LA PROSTATE (*La*), par William Fair et Marc Garnick, n° 256, p. 50.
- MOLÉCULES BIOLOGIQUES DANS L'EAU (*Les*), par Mark Gostein et Michael Levitt, n° 255, p. 92.
- MULTIPLICATION DES NEURONES CHEZ L'ADULTE (*La*), par R. Kempermann et F. Gage, n° 261, p. 30.
- NAISSANCE DES ESPÈCES (*La*), par Axel Meyer et Melaine Slassny, n° 258, p. 70.
- NOUVELLES ARMES CONTRE L'ASTHME (*Les*), par Marc Humbert, n° 264, p. 46.
- ORGANES ARTIFICIELS (*Les*), par David Mooney et Antonios Mikos, n° 266, p. 168.
- ORGANISME DISTINGUE LA GAUCHE DE LA DROITE (*Le*), par Juan Carlos Izpisua Belmonte, n° 262, p. 46.
- ORIGINE DES MALADIES (*L'*), par Randolph Nesse et George Williams, n° 255, p. 50.
- PEAU RECONSTRuite (*La*), par Marcelle Régnier et Marie-Claire Staquet, n° 266, p. 154.
- POUR UN MOIRAI DE QUALITÉ, par Daniel Allain, n° 266, p. 142.
- RÉPARATION DE LA MOELLE SPINALE (*Le*), par John McDonald, n° 265, p. 40.
- SYNDROME POSTPOLIO (*Le*), par Lauro Halstead, n° 260, p. 76.
- TEXTILES ANTIMICROBIENS (*Les*), par François N.R. Renaud et Jean Freney, n° 266, p. 134.
- VACCINS GÉNÉTIQUES, par David Weiner et Ronald Kennedy, n° 263, p. 54.
- VISUALISATION DE L'EMBRYON HUMAIN (*La*), par Bradley Smith, n° 259, p. 64.

GÉOLOGIE – GÉOPHYSIQUE OCÉANOGRAPHIE

- ARCHIVES CLIMATIQUES DES LACS DU JURA (*Les*), par Michel Magny, n° 265, p. 76.
- JOURS OÙ LES SABLES ENFLAMMENT (*Le*), par Eugene Shoemaker et Jeffrey Wynn, n° 255, p. 24.
- MÉTAL DANS LES SABLES (*La*), par E. Suess, Gerhard Bohrmann, Jan Garinet et Emile Lausch, n° 261, p. 86.
- MYSTÈRE D'UNE MÉTÉORITE GROENLANDAISE (*Une*), par Weyt Gibbs, n° 255, p. 42.
- SISMIQUE ET TECTONIQUE, par Maurice Mat-tauer, n° 265, p. 28.
- TSUNAMIS (*Les*), par Frank González, n° 260, p. 64.

HISTOIRE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

- ART DE LA SUE (*L'*), par C. Zanier, n° 266, p. 44.
- AVÈNEMENT DES COLOMANES DES INDIENNES (*Le*), par G. Bam et Nguyễn T. Anh, n° 266, p. 56.
- DU COTON NATURELLEMENT COLORÉ, par James Vreeland, n° 266, p. 62.
- LADY ALICE ET LE PREMIER ORDINATEUR, par E. E. Kirk et A. Toole, n° 261, p. 64.
- TEINTURES NATURELLES (*Les*), par Dominique Cardon, n° 266, p. 50.
- TEXTILE DE PRINCES CELTES (*Les*), par Christophe Moulérat, n° 266, p. 36.

MATHÉMATIQUES INFORMATIQUE

- CAMÉLION DE LA COMMUNICATION (*Les*), par John Guttag, n° 264, p. 40.
- CONVERSATION AVEC VOTRE ORDINATEUR, par Victor Zee, n° 264, p. 38.
- CRYPTOGRAPHIE ET RÉSEAU, par Philip Zimmerman, n° 260, p. 38.
- LANGAGE XML (*Le*), par Jon Bosak et Tim Bray, n° 261, p. 48.
- MESURE ET INFORMATION, par Jacques Oksman, n° 258, p. 90.
- NOUVELLES VISIONS DES QUASI-CRISTAUX, par Christoph Puppe, n° 263, p. 70.
- ORDINATEURS PASSERONT L'AN 2000 (*Les*), par Peter de Agre, n° 257, p. 78.
- PAIEMENT SUR L'INTERNET (*Le*), par Octavian Ureche et Réan Plamondon, n° 260, p. 45.
- PIRATES SUR L'INTERNET, par Carolyn Meinel, n° 260, p. 30.
- POUR LA LIBÉRALISATION DE LA CRYPTOGRAPHIE, par Ronald Rivest, n° 260, p. 30.
- PUCE UNIVERSELLE (*Une*), par Anant Agarwal, n° 264, p. 42.
- RECHERCHE INTELLIGENTE SUR L'INTERNET, par les membres du Projet Clever, n° 262, p. 52.
- RÉVOLUTION DE L'INFORMATIQUE (*La*), par Michael Dertouzos, n° 264, p. 32.

PHYSIQUE – CHIMIE

- ANTIGRAVITÉ (*L'*), par Lawrence Krauss, n° 257, p. 42.
- ASYMÉTRIE DE LA MATIÈRE (*L'*), par Helen Quinn et Michael Witherell, n° 255, p. 66.

BOULES DE COULEUR (*Les*), par Frank Close et Philip Page, n° 256, p. 88.

DES TISSUS AUX COULEURS CHANGEANTES, par Serge Berthier et Jacques Lafait, n° 266, p. 94.

DÉTECTION DES NEUTRINOS MASSIFS (*La*), par Edward Keams, Takaaki Kajita et Yoji Totsuka, n° 263, p. 62.

DU CRUSTACÉ AU TISSU, par Alain Domard, n° 266, p. 12.

ENNOBLISSEMENT DES TEXTILES (*L'*), par Pierre Viallier, n° 266, p. 118.

ENSIMAGE (*Le*), par David Quéré, n° 266, p. 108.

FIBRES ARTIFICIELLES RÉSISTANTES (*Les*), par Doetze Sikkenha et Maurits Northolt, n° 266, p. 112.

FIBRES, FILS ET TISSUS, par Theo Tervoort et Paul Smith, n° 266, p. 20.

HALTE AUX TACHES, par Kenneth Wong et Daniel Joubert, n° 266, p. 102.

MÉCANIQUE DES TISSUS (*La*), par Jean-François Ganghoffer et Massimo Magno, n° 266, p. 68.

NOUVELLES SOURCES DE RAYONS X (*Les*), par Massimo Altarelli, Jane Cross et Fred Schlachter, n° 256, p. 74.

OSCILLATIONS DE BLOCH (*Les*), par Maxime Dahan et Christophe Salomon, n° 261, p. 84.

POURQUOI LES OBJETS SE CASSENT-ILS?, par Mark Eberhart, n° 265, p. 68.

SPIN DES NEUTRONS (*Le*), par Klaus Rith et Andreas Schiffer, n° 262, p. 82.

SCIENCES HUMAINES

CHANT DES COUVAS (*Le*), par Theodore Levin et Michael Edgerton, n° 265, p. 50.

CULTURE DES ÎLES ANDAMAN (*La*), par Sita Venkateswar, n° 261, p. 78.

DÉVELOPPEMENT MORAL DES ENFANTS (*Le*), par William Damon, n° 264, p. 64.

ENSEIGNEMENT DES SCIENCES (*L'*), par Wayt Gibbs et Douglas Fox, n° 265, p. 60.

GUERRE BIOLOGIQUE CONTRE LES CULTURES (*La*), par Paul Rogers, Simon Whitby et Malcolm Dando, n° 263, p. 74.

HYPERTENSION CHEZ LES NOIRS D'AMÉRIQUE (*L'*), par Richard Cooper, Charles Rotimi et Ryk Ward, n° 258, p. 62.

INSTRUCTIVE HISTOIRE DES NOMS DE FAMILLES (*L'*), par Jean-Marie Legat et Michel Vernier, n° 255, p. 58.

MÉTAMORPHOSE D'ANDREI SAKHAROV (*La*), par Gennady Goriunov, n° 259, p. 90.

ODYSSÉE ABÉGÉE (*L'*), par Martin Grötschel et Manfred Pabst, n° 262, p. 90.

RÉQUISITOIRE CONTRE LES SIMULATIONS NUCLÉAIRES, par Christopher Paine, n° 265, p. 92.

TECHNIQUE

CENTRALE ÉLECTRIQUE DANS VOTRE SOUS-SOL (*Une*), par Alan Lloyd, n° 265, p. 44.

DE LA VOILE À L'AILE, par V. Radhakrishnan, n° 257, p. 70.

DES COMPOSITES À PARTIR DE TEXTILES, par Dominique Loubinoux, n° 266, p. 188.

DES TEXTILES À TROIS DIMENSIONS, par Jürgen Brandt et Klaus Dreschler, n° 266, p. 178.

FIBRES NATURELLES DANS LES COMPOSITES (*Les*), par A. Bledzki et J. Gassan, n° 266, p. 184.

PILES À COMBUSTIBLE POUR LES PORTABLES (*Des*), par Christopher Dyer, n° 263, p. 48.

PLEIN D'HYDROGÈNE, S'IL VOUS PLAÎT (*Le*), par John Appleby, n° 263, p. 38.

RENFORCES TEXTILES BRODÉS (*Les*), par Konrad Gliessen, n° 266, p. 182.

RESTITUTION DES TEXTES ANTIQUES (*Les*), par Jean Irigoin, n° 256, p. 60.

TEXTILES ET ENZYMES DE L'EXTREME, par Yannick Guéhen et Jacques Dietrich, n° 266, p. 190.

TEXTILES TECHNIQUES (*Les*), par Klaus-Dieter Linsmeier, n° 266, p. 176.

TRANSPORT SPATIAL DU FUTUR (*Le*), par Tim Beardsley, n° 258, p. 36.

VRAI ET FAUX EN PEINTURE DE CHEVALET (*Le*), par Patrick Le Chanu, n° 264, p. 90.

ZOOLOGIE – BOTANIQUE

CHOIX ALIMENTAIRES DES PRIMATES (*Les*), par Claude Mariel Hladik et Bruno Simmen, n° 255, p. 84.

CÔNES ET TIGRINES, par Frédéric Le Gall, Philippe Faure et Georges Richard, n° 261, p. 56.

COULEUR DES OISEAUX (*La*), par Maurice Pomarède, n° 261, p. 92.

DRAGON DE KOMODO (*Le*), par Claudio Ciofi, n° 259, p. 82.

DRAGONS DE MER (*Les*), par Paul Groves, n° 256, p. 68.

KANGOUROUS CARNIVORES (*Les*), par Stephen Wroe, n° 260, p. 82.

PROTECTION DES JEUNES CHEZ LES INSECTES (*La*), par Douglas Tallamy, n° 257, p. 90.

STRATÉGIES DE DÉFENSE DES PLANTES (*Les*), par Sergio Kaffmann, Stéphane Dorey et Bernard Firtig, n° 262, p. 30.

LOGIQUE ET CALCUL

NÉGLIGABLE, MAIS TROUBLANT, par Jean-Paul Delahaye, n° 255, p. 100.

FORMULES POUR LES NOMBRES PREMIERS, par J.-P. Delahaye, n° 256, p. 100.

LES DÉCOUPAGES ARTISTIQUES, par J.-P. Delahaye, n° 257, p. 100.

LES NOMBRES DE NOMBRES PREMIERS, par J.-P. Delahaye, n° 258, p. 100.

LA CONJECTURE DE KEPLER DÉMONTRÉE, par Christoph Pöppe, n° 259, p. 100.

PREMIERS JUMEAUX FRÈRES ENNEMIS?, par J.-P. Delahaye, n° 260, p. 102.

CETTE PHRASE CONTIENT EXACTEMENT..., par Jacques Tits, n° 261, p. 104.

LE NOMBRE LOGE LE NOMBRE D'OR, par J.-P. Delahaye, n° 262, p. 108.

L'INTELLIGENCE HUMAINE À NOUVEAU DOMINER, par J.-P. Delahaye, n° 263, p. 102.

UN NOMBRE PREMIER À 50 000 \$, par J.-P. Delahaye, n° 264, p. 104.

LES PROPOSITIONS INDÉCIDABLES, par J.-P. Delahaye, n° 265, p. 104.

PROMENADE AU PAYS DES INDÉCIDABLES, par J.-P. Delahaye, n° 266, p. 196.

VISIONS MATHÉMATIQUES PAR IAN STEWART

BULLES DE SAVANTS, n° 255, p. 106.

DU CHOCOLAT AU SAVON, n° 256, p. 96.

PLIAGES ET ORIGAMI, n° 257, p. 96.

GRAPHES ET ÉLECTRONIQUE, n° 258, p. 96.

CHŒUR LUMINEUX, n° 259, p. 104.

TOURS, TORTILLEMENTS, TOPOLOGIE ET TÉLÉPHONE, n° 260, p. 108.

COULEURS TORIQUES ET FABRIQUE DE BRIQUES, n° 261, p. 102.

L'ART DU PAVAGE, n° 262, p. 100.

LE TRIANGLE OMNIPRÉSENT, n° 263, p. 100.

GRAPHES ET CHORÉGRAPHES, n° 264, p. 102.

LES SPHERICÔNES, n° 265, p. 102.

AUTEURS

A – B

ABERGE Alain, *Le ciel infrarouge vu de l'espace*, n° 260, p. 82.

ABLER William, *Les dents des tyrannosaures*, n° 265, p. 68.

AEBISCHER E. J., *Les cellules encapsulées*, n° 266, p. 160.

AGARWAL Anant, *Une puce universelle*, n° 264, p. 42.

ALLAIN Daniel, *Pour un mohair de qualité*, n° 266, p. 142.

ALLAMAND LA Louis, *Les briques de la vie*, n° 262, p. 70.

ALTARELLI Massimo, *Les nouvelles sources de rayons X*, n° 256, p. 74.

APPLEBY John, *Le plein d'hydrogène, s'il vous plaît*, n° 263, p. 38.

ATKINSON Peter, *La fabrication d'insectes utiles*, n° 256, p. 82.

BEARDSLEY Tim, *Le transport spatial du futur*, n° 258, p. 36.

BERNSTEIN Max, *Les briques de la vie*, n° 262, p. 70.

BERTHIER Serge, *Des tissus aux couleurs changeantes*, n° 266, p. 94.

BIGUÉ-BENO Marie-Ange, *De l'étoffe à la main*, n° 266, p. 142.

BISCHOFER Norbert, *La lutte contre la grippe*, n° 257, p. 60.

BLACK Peter, *La chirurgie assistée par ordinateur*, n° 261, p. 70.

BLEDZKI Andrzej, *Les fibres naturelles dans les composites*, n° 266, p. 184.

BLOMBERG Peter, *Le plein d'hydrogène, s'il vous plaît*, n° 263, p. 38.

BOHRMANN Gerhard, *Le méthane dans les océans*, n° 264, p. 80.

BOSAK Jon, *Le langage XML*, n° 261, p. 48.

BOULANGER François, *Le ciel infrarouge vu de l'espace*, n° 260, p. 82.

BRAM Georges, *L'avènement des colorants synthétiques*, n° 266, p. 56.

BRANDT Jürgen, *Des textiles à trois dimensions*, n° 266, p. 178.

BRAY Tim, *Le langage XML*, n° 261, p. 48.
 BRIEL Ulrich, *Les amas de galaxies*, n° 256, p. 44.
 BUCHER M., *L'inflation de l'Univers*, n° 257, p. 50.
 BULLOCK Mark, *Le climat variable de Vénus*, n° 259, p. 34.

C - D

CARDON Dominique, *Les teintures naturelles*, n° 266, p. 50.
 CIOFI Claudy, *Le dragon de Komodo*, n° 259, p. 82.
 CLOSE Franck, *Les boules de glu*, n° 256, p. 88.
 COLLINA-GARARD Jacques, *Le feu domestiqué*, n° 258, p. 56.
 COOPER Richard, *L'hypertension chez les Noirs d'Amérique*, n° 258, p. 62.
 CROSS Jane, *Les nouvelles sources de rayons X*, n° 256, p. 74.
 DAHAN M., *Les oscillations de Bloch*, n° 261, p. 84.
 DAMON William, *Le développement moral des enfants*, n° 264, p. 64.
 DANDO Malcolm, *La guerre biologique contre les cultures*, n° 263, p. 74.
 DARTOIS Emmanuel, *Le ciel infrarouge vu de l'espace*, n° 260, p. 82.
 de BEAUNE Sophie A., *Les galets, outils du Paléolithique*, n° 260, p. 52.
 de JAGER Peter, *Les ordinateurs passeront l'an 2000*, n° 257, p. 78.
 DERTOUZOS Michael, *La révolution de l'informatique*, n° 264, p. 32.
 DIETRICH Jacques, *Textiles et enzymes de l'extrême*, n° 266, p. 190.
 DOMARD Alain, *Du crustacé au poisson*, n° 260, p. 44.
 DOREY Stéphan, *Les stratégies de défense des plantes*, n° 262, p. 30.
 DØVING K., *La détection des phéromones*, n° 263, p. 88.
 DRESCHLER Klaus, *Des textiles à trois dimensions*, n° 266, p. 178.
 DYER Christopher, *Des piles à combustible pour les portables*, n° 263, p. 48.

E - F - G

EBERHART Mark, *Pourquoi les objets se cassent-ils?*, n° 265, p. 68.
 EDGERTON M., *Le chant des Touvas*, n° 265, p. 50.
 ERICKSON Gregory, *La vie des Tyrannosaurus rex*, n° 265, p. 32.
 FAIR William, *La lutte contre le cancer de la prostate*, n° 256, p. 50.
 FAVREAU Philippe, *Cônes et toxines*, n° 261, p. 56.
 FIRTIG Bernard, *Les stratégies de défense des plantes*, n° 262, p. 30.
 FOX Douglas, *L'enseignement des sciences*, n° 260, p. 60.
 FRENEY Jean, *Les textiles antimicrobiens*, n° 266, p. 134.
 GAGE Fred, *La multiplication des neurones chez l'adulte*, n° 261, p. 30.
 GANGHOFFER Jean-François, *La mécanique des tissus*, n° 266, p. 88.
 GARNICK Marc, *La lutte contre le cancer de la prostate*, n° 256, p. 50.

GASSAN Jochem, *Les fibres naturelles dans les composites*, n° 266, p. 184.
 GERSTER Mark, *Les molécules biologiques dans l'eau*, n° 255, p. 92.
 GIBBS W., *L'enseignement des sciences*, n° 265, p. 60.
 GIBBS Wytse, *Une mystérieuse météorite groenlandaise*, n° 255, p. 42.
 GIODA A., *L'argent de l'ancien Pérou*, n° 259, p. 42.
 GLIESCHER Konrad, *Les renforts textiles brodés*, n° 266, p. 184.
 GONZÁLEZ Frank, *Les tsunamis*, n° 260, p. 64.
 GORELIE Gennady, *La métamorphose d'Andreï Sakharov*, n° 259, p. 90.
 GREINER J., *Le méthane dans les océans*, n° 264, p. 80.
 GRIMSON Eric, *La chirurgie assistée par ordinateur*, n° 261, p. 70.
 GRINSPON David, *Le climat variable de Vénus*, n° 259, p. 34.
 GRÖTSCHEL Martin, *L'Odyssée abrégée*, n° 260, p. 90.
 GROVES Paul, *Les dragons de mer*, n° 259, p. 80.
 GUEGUEN Yannick, *Textiles et enzymes de l'extrême*, n° 266, p. 190.
 GUILLERME P., *Les éclipses de Soleil*, n° 259, p. 70.
 GUTTAC John, *Les caméléons de la communication*, n° 264, p. 40.

H - I

HALSTEAD Ian, *Le syndrome postpolio*, n° 260, p. 76.
 HENRY Patrick, *Les amas de galaxies*, n° 256, p. 44.
 HLADIK Claude-Marcel, *Les choix alimentaires des hommes*, n° 255, p. 84.
 HOGAN Craig, *Des supernovae pour sonder l'espace-temps*, n° 257, p. 36.
 HUMBERT Marc, *Les nouvelles armes contre l'asthme*, n° 264, p. 46.
 HURLEY Kevin, *Les magnétoiles*, n° 265, p. 84.
 IRIGOIN Jean, *La restitution des textes antiques*, n° 256, p. 60.
 IZPISUA EL MONTE Juan Carlos, *L'organisme distingue la gauche de la droite*, n° 262, p. 46.

J - K

JOLESZ Ferec, *La chirurgie assistée par ordinateur*, n° 261, p. 70.
 JOUBERT Daniel, *Halte aux taches*, n° 266, p. 102.
 KAHABIA Peter, *Les sources de rayonnement X mou*, n° 258, p. 76.
 KAJITA Takaki, *La détection des neutrinos massifs*, n° 263, p. 62.
 KARAKHANIAN Arkadi, *Tremblements de terre et archéologie*, n° 261, p. 36.
 KAUFFMAN Serge, *Les stratégies de défense des plantes*, n° 262, p. 30.
 KEARNS Edward, *La détection des neutrinos massifs*, n° 263, p. 62.
 KEMPERMANN Gerd, *La multiplication des neurones chez l'adulte*, n° 261, p. 30.
 KENNEDY Ronald, *Vaccins génétiques*, n° 263, p. 54.
 KIKINIS Ron, *La chirurgie assistée par ordinateur*, n° 261, p. 70.
 KIM Eugene Eric, *Lady Ada et le premier ordinateur*, n° 261, p. 64.

KIRSHNER Robert, *Le temps et la relativité espace-temps*, n° 257, p. 36.
 KOUTCHERY Serge, *Les éclipses de Soleil*, n° 259, p. 70.
 KRAAN-LOHTEWEG Renée, *Derrière la Voie lactée*, n° 259, p. 74.
 KRAUSS Lawrence, *L'antigravité*, n° 257, p. 42.

L - M

LAFAIT Jacques, *Des tissus aux couleurs changeantes*, n° 266, p. 94.
 LAGACHE Gilaine, *Le ciel infrarouge vu de l'espace*, n° 260, p. 82.
 LAHAV Ofer, *Derrière la Voie lactée*, n° 255, p. 74.
 LANDY Teemu, *La cartographie de l'Univers*, par n° 263, p. 80.
 LANGER Robert, *La confection de tissus vivants*, n° 266, p. 154.
 LAUSCHER E., *Le méthane dans les océans*, n° 264, p. 80.
 LAVER C., *La lutte contre la grippe*, n° 257, p. 60.
 LE CHATEL Patrick, *Le vrai et le faux en peinture de cheval*, n° 264, p. 90.
 LE GALL Frédéric, *Cônes et toxines*, n° 261, p. 56.
 LEGAY Jean Marie, *L'instructive histoire des noms de plantes*, n° 255, p. 58.
 LEGENDE S., *Le Quercy tropical*, n° 262, p. 60.
 LEVIN Theodore, *Le chant des Touvas*, n° 265, p. 50.
 LEVITT Michael, *Les molécules biologiques dans l'eau*, n° 255, p. 92.
 LINSMEIER Klaus-Dieter, *Les textiles techniques*, n° 266, p. 178.
 LLOYD Alan, *Une centrale électrique dans votre sous-sol*, n° 263, p. 44.
 LOUBINOUX Dominique, *Des composites à partir de textiles*, n° 266, p. 188.
 LYSAGH Michael, *Les cellules encapsulées*, n° 266, p. 160.
 MAGNO Massimo, *La mécanique des tissus*, n° 266, p. 88.
 MAGNY Michel, *Les archives climatiques des lacs du Jura*, n° 265, p. 76.
 MALHOTRA Annu, *La migration des planètes*, n° 264, p. 54.
 MARANAT B., *Le Quercy tropical*, n° 262, p. 60.
 MATTAU Maurice, *Sismique et tectonique*, n° 265, p. 28.
 MATTHIAS Gottfried, *La datation des objets en bois*, n° 261, p. 42.
 McDONALD John, *La réparation de la moelle épinière*, n° 265, p. 40.
 MEINEL Carolyn, *Pirates sur l'Internet*, n° 260, p. 30.
 MEMBRE D'UN PROJET CLEVER, *Recherche intelligente sur l'Internet*, n° 262, p. 52.
 MEYER Axel, *La naissance des espèces*, n° 258, p. 70.
 MIKOS Antonios, *Les organes artificiels*, n° 266, p. 168.
 MOONEY David, *Les organes artificiels*, n° 266, p. 168.
 MOULHERAT Christophe, *Les textiles des peuples celtes*, n° 266, p. 36.
 MOURER-CHAUVIRÉ C., *Le Quercy tropical*, n° 262, p. 60.
 MOXON Richard, *ADN et évolution*, n° 257, p. 84.
 MUKERJEE Madhusree, *Un Big Bang miniature*, n° 259, p. 48.

N - O - P

- NESSE R., *L'origine des maladies*, n° 255, p. 50.
 NORTHOLT Maurits, *Les fibres artificielles résistantes*, n° 260, p. 112.
 NGUYỄN Trọng Anh, *L'avènement des colorants synthétiques*, n° 266, p. 56.
 O'BROCHTA David, *La fabrication d'insectes utiles*, n° 256, p. 82.
 OKSMAN J., *Mesures et information*, n° 258, p. 90.
 PADBERG Manfred, *L'Odyssée abrégée*, n° 262, p. 90.
 PAGE Philip, *Les boules de glu*, n° 256, p. 88.
 PAINE Christopher, *Réquisitoire contre les simulations nucléaires*, n° 265, p. 92.
 PEDERSEN Roger, *Les cellules souches embryonnaires*, n° 260, p. 58.
 PHILIP Hervé, *Les tremblements de terre et les tsunamis*, n° 261, p. 36.
 PLAMONDON Réjean, *Le paiement sur l'Internet*, n° 260, p. 45.
 POLINGER Robert, *Les pyramides et les éoliennes dans l'Antiquité*, n° 264, p. 72.
 POMARÈDE M., *La couleur des oiseaux*, n° 261, p. 92.
 PÖPPE Christoph, *Nouvelles visions des quasi-cristaux*, n° 263, p. 70.
 PUGET J.-L., *L'infrarouge vu de l'espace*, n° 260, p. 82.

Q - R

- QUÉRÉ David, *L'ensimage*, n° 266, p. 108.
 QUINN Helen, *L'asymétrie de la matière*, n° 255, p. 66.
 RADHAKRISHNAN V., *De la voile à l'aile*, n° 257, p. 70.
 RAPPAPORT Paul, *Les sources de rayonnement X mou*, n° 258, p. 76.
 RÉGNIER M., *La peau reconstruite*, n° 266, p. 154.
 RENAUD F.N., *Les textiles antimicrobiens*, n° 266, p. 134.
 RENNER Marc, *De l'étoffe à la main*, n° 266, p. 144.
 RICHARD Georges, *Cônes et toxines*, n° 261, p. 56.
 RIDDLE R., *Le développement des membranes*, n° 265, p. 84.
 RITH Klaus, *Le spin des nucléons*, n° 260, p. 82.
 RIVEST Ronald, *Pour la libéralisation de la cryptographie*, n° 260, p. 50.
 ROGERS Paul, *La guerre biologique contre les cultures*, n° 263, p. 74.
 ROTIOMI Charles, *L'hypertension chez les Noirs d'Amérique*, n° 258, p. 62.

S - T

- SALOMON Christophe, *Les oscillations de Bloch*, n° 261, p. 84.
 SANDFORD Scott, *Les briques de la vie*, n° 262, p. 70.
 SAVOIE Denis, *Éclipses et chronologie*, n° 259, p. 78.
 SCHÄFER A., *Le spin des nucléons*, n° 262, p. 82.
 SCHLACHTER Fritz, *Les nouvelles sources de rayons X*, n° 256, p. 74.
 SERRANO C., *L'argent de l'ancien Pérou*, n° 259, p. 42.
 SHOEMAKER Eugene, *Le jour où le sable s'enflamma*, n° 255, p. 34.
 SIGÉ B., *Le Quercy tropical*, n° 262, p. 60.
 SIKKEMA Doetze, *Les fibres artificielles résistantes*, n° 266, p. 112.

- SIMMONI Roberto, *Les choix alimentaires des primates*, n° 255, p. 84.
 SMITH Bradley, *La visualisation de l'embryon humain*, n° 259, p. 64.
 SMITH Paul, *Fibres, fils et tissus*, n° 266, p. 20.
 SMITH Roger, *Le déclenchement de l'accouchement*, n° 259, p. 56.
 SPERGE D., *L'inflation de l'Univers*, n° 257, p. 50.
 STAQUET M., *La peau reconstruite*, n° 266, p. 154.
 STIASSNI M., *La naissance des espèces*, n° 258, p. 70.
 SUESS E., *Le méthane dans les océans*, n° 264, p. 80.
 SUNTZEFF Nicholas, *Des supernovae pour sonder l'espace-temps*, n° 257, p. 36.
 TABIN Clifford, *Le développement des membres*, n° 258, p. 84.
 TALLAM Douglas, *La protection des yeux chez les insectes*, n° 257, p. 90.
 TERVOORT T., *Les pyramides et les éoliennes*, n° 264, p. 72.
 TOOLE Betty Alexandra, *Lady Ada et le premier ordinateur*, n° 261, p. 64.
 TOTSUKA Y., *La détection des neutrinos massifs*, n° 263, p. 62.
 TROTIER P., *La détection des phéromones*, n° 263, p. 88.

U - V

- URECHE Octavian, *Le paiement sur l'Internet*, n° 260, p. 45.
 VACANT Joseph, *La confection de tissus vivants*, n° 266, p. 154.
 VAN DEN HEUVEL Edward, *Les sources de rayonnement X mou*, n° 258, p. 76.
 VENKATSWAR Sita, *La culture des sites Andaman*, n° 261, p. 78.
 VERNAY Michel, *L'instructive histoire des noms de famille*, n° 255, p. 58.
 VIALLE Pierre, *L'ennoblissement des textiles*, n° 266, p. 114.
 VREELAND James, *Du coton naturellement coloré*, n° 266, p. 62.

W - Z

- WARD Rick, *L'hypertension chez les Noirs d'Amérique*, n° 258, p. 62.
 WEBSTER R., *La lutte contre la grippe*, n° 257, p. 60.
 WEINER David, *Vaccins génétiques*, n° 263, p. 54.
 WHITBY Jim, *La guerre biologique contre les cultures*, n° 263, p. 74.
 WILLIAMS G., *L'origine des maladies*, n° 255, p. 50.
 WILLS Christopher, *ADN et évolution*, n° 257, p. 84.
 WILMUT I., *Le clonage des mammifères*, n° 256, p. 36.
 WITHERILL Michael, *L'asymétrie de la matière*, n° 255, p. 66.
 WONG Kenneth, *Haute aux taches*, n° 266, p. 102.
 WOOD S., *Les lampes à incandescence*, n° 260, p. 82.
 WÜRSTER W., *Les vides des miroirs*, n° 262, p. 50.
 WYNN J., *Le jour où le sable s'enflamma*, n° 255, p. 34.
 ZANIER Claudio, *L'art de la soie*, n° 266, p. 44.
 ZIMMERMANN Philip, *Cryptographie et réseau*, n° 260, p. 38.
 ZUE Victor, *Conversation avec votre ordinateur*, n° 264, p. 38.

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
 Tél : 01-55-42-84-00
 http://www.pourlascience.com

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Ciototti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Lepercq (Rédactrice en chef adjointe), Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulhennec (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tanguenet, Pascale Thiollier, Céline Lapert, Joëlle Le...

Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Bouty. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Vivie Millet, assistée de Lucie Romier. Directeur de publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Ch. Collobert, M. Crenet, É. Host-Platret, M.-T. Landousy, Cl. Lehman, V. Lerner, M. Schwendiman, M. Vaissayre, Cl. Werner.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of Editors : Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Jayas, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Joachim Rossler. Vice-President : Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06. Tél. : 01 55 42 84 28. Télécopieur : 01 43 25 18 29.

Etranger : 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10171 - Tél. (212) 754.02.62.

SERVICE ABONNEMENTS
 Ginette Grénolon : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP
 Marie-Hélène...

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Seridis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - Paris.

Belgique : Les Éditions de la Bibliothèque de la rue de la Loi - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressés par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.
 Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont des marques déposées.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 194A et 195B.