

Etats-Unis : une présence massive dans tous les domaines

JEAN-CLAUDE PORÉ *

S'il est un domaine où les efforts de recherche et de développement ne cessent de progresser depuis quelques années, c'est bien celui des matériaux. L'exemple des États-Unis est particulièrement significatif. Une enquête récente faite parmi les membres de l'Académie Nationale des Sciences mettait les travaux entrepris dans le domaine au premier rang, avec la biologie moléculaire, des thèmes de recherche qui devraient être favorisés, en raison de leur intérêt scientifique, technique et économique pour le pays.

Plus d'une douzaine de centres interdisciplinaires de recherche sur les matériaux, au sein d'universités de premier plan, fonctionnent depuis 1962 grâce à l'appui et au soutien financier du Département de la Défense et, de façon moins importante, de la National Aeronautics and Space Administration (N.A.S.A.) et de l'Atomic Energy Commission. Cet essor qui a pris place dans le cadre d'un programme national représente actuellement un budget annuel d'environ 45 millions de dollars. Parallèlement, les agences américaines s'emploient à établir des programmes communs entre les laboratoires universitaires et industriels. La Société Martin Marietta travaille avec l'Université de Denver, et la Monsanto Chemical Co. avec l'Université de Washington, à Saint-Louis. Les liens de l'Université et de l'industrie sont, en outre, renforcés par les programmes spéciaux de liaison Université-Industrie, tels que ceux du M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) ou du CALTECH (California Institute of Technology).

Il y a 20 ans, 10 % seulement des entreprises américaines importantes ou de taille moyenne disposaient de leur propre service de recherche sur les matériaux. Aujourd'hui, ce chiffre est passé à 70 %. Certaines sociétés de création récente se spécialisent, dès maintenant, dans la recherche de nouveaux matériaux. Dans ce but, une firme d'électronique et une société de produits pharmaceutiques ont créé, il y a un an, une filiale pour l'étude des matériaux qui pourraient donner lieu à des applications physiques et biologiques.

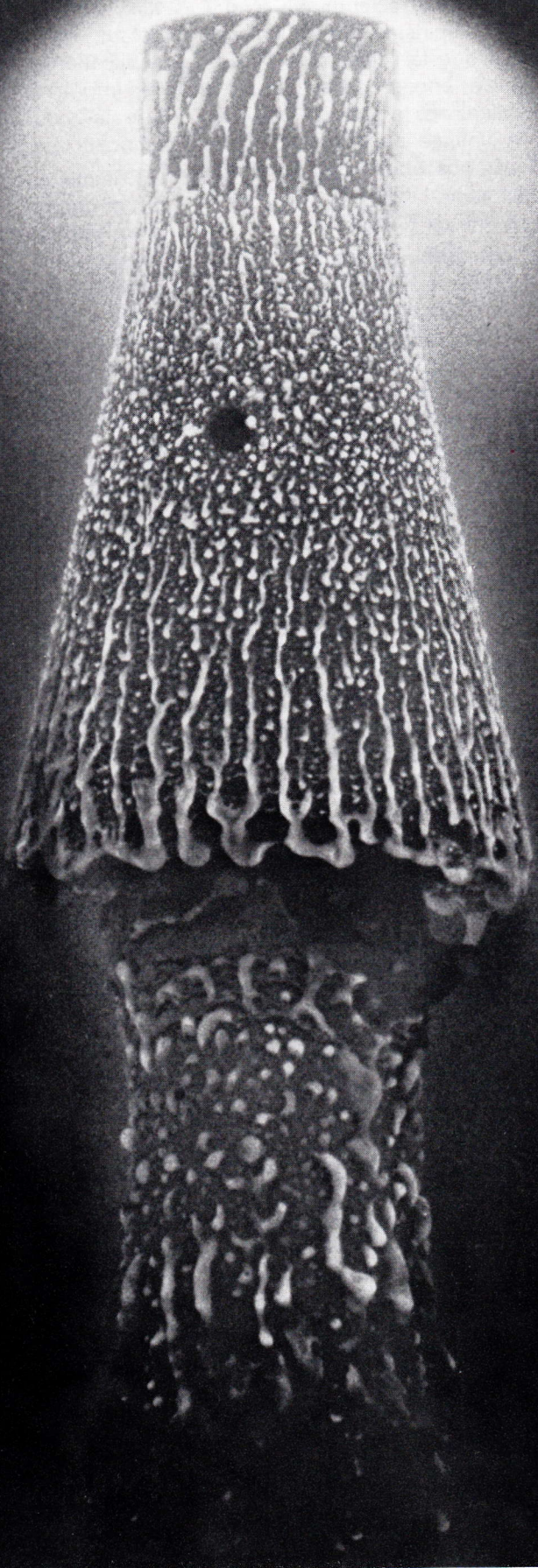
Le résultat de cet effort est déjà éloquent. Sur le plan de la recherche, les matériaux semi-conducteurs et les dispositifs auxquels ils peuvent donner lieu ont fait l'objet de 10.000 publications en 1968.

Sur le plan du développement, un large pourcentage de la production actuelle de l'industrie moderne est constitué par des produits qui n'existaient pas il y a 25 ans. Il apparaît 10.000 produits nouveaux environ chaque année.

Ces quelques chiffres illustrent un effort gigantesque de recherche et de développement, tant universitaire qu'industriel, qui n'est d'ailleurs pas propre aux États-Unis.

Aussi n'est-il pas audacieux de penser qu'en l'an 2000 la plupart des matériaux qui seront utilisés par l'industrie n'ont pas encore été découverts en 1970.

* Chargé d'Études à la Mission Scientifique à l'Ambassade de France aux États-Unis.



Chacun de nous a suivi, avec passion, le voyage d'Apollo II, et plus encore, avec émotion, cette fois, celui d'Appollo XIII et son retour dramatique. La rentrée dans l'atmosphère de la capsule spatiale n'a plus de secret pour personne. Les commentaires nous ont appris que celle-ci était soumise à un échauffement extraordinaire. Nous savons tous aussi que si les cosmonautes résistent à cette épreuve, ils le doivent au fameux bouclier thermique.

Or aucun matériau connu n'était capable de satisfaire à de telles exigences technologiques. Il fallait donc en mettre au point un dont les caractéristiques entièrement nouvelles permettent de répondre au service demandé.

De nombreuses expériences ont permis d'aboutir au constituant actuel du bouclier thermique. Le document ci-contre montre comment, sous l'effet de l'échauffement très brutal (près de 11.000 °C) subi lors d'un vol simulé en laboratoire, le revêtement de la capsule fond littéralement. La propriété de ce matériau nouveau est d'absorber la quasi totalité de la chaleur dégagée. Une fois fondu et carbonisé, il constitue pour les astronautes, une protection totale, qui permet à la température intérieure de la capsule de ne pas dépasser 26 à 27 °C.

Si la démarche scientifique tend à remplacer l'empirisme, il n'en demeure pas moins que la science des matériaux relève encore dans bien des cas de l'alchimie, la part de l'intuition et de la chance restant non négligeable car nos connaissances théoriques demeurent fragmentaires devant la complexité de la matière.

C'est, par exemple, la chance qui a fait découvrir à Remeika, des Bell Telephone Laboratories, le seul cristal à la fois magnétique et piézo-électrique, c'est-à-dire dont la flexion donne naissance à un courant électrique. Ce chercheur souhaitait obtenir un cristal unique à partir de l'oxyde de gallium et de l'oxyde de fer, quand il remarqua la présence de cristaux translucides dans le creuset. Leur examen minutieux montrait cette combinaison très particulière de propriétés qui a permis de réaliser un appareil capable de convertir les signaux magnétiques en signaux électriques.

Au fur et à mesure qu'elle avance, la recherche sur les matériaux bénéficie des « retombées » des développements dont elle est à l'origine et s'enrichit par là de nouvelles méthodes expérimentales.

Le rôle du laser

Celui du laser lui fournit de nouvelles techniques fondamentales comme la spectroscopie, ou appliquées comme l'usinage, le soudage des métaux et même un moyen de changer radicalement l'état de la matière.

L'espace va offrir la possibilité de préparer des matériaux de forte densité et de procéder à des opérations métallurgiques en milieu d'apesanteur dans le laboratoire orbital « Saturn Workshop » qui sera lancé par les États-Unis en 1973. On espère, en particulier, tirer de ces expériences une meilleure connaissance du phénomène de croissance cristalline, obtenir les cris-

taux de grandes dimensions et sans défaut qu'exigent la plupart des applications électroniques et recueillir des informations sur des procédés tels que le moulage des métaux ou la fabrication des alliages.

Comme ces quelques aspects ont pu le montrer, la science des matériaux fait appel par excellence à un large éventail de compétences et de techniques. Cette pluridisciplinarité est sans doute sa caractéristique essentielle et explique les développements spectaculaires qu'elle connaît depuis quelques années et que l'on peut en attendre d'ici la fin du siècle.

Les progrès quotidiens de la recherche, malgré sa complexité croissante, peuvent être illustrés par quelques exemples de matériaux qui sont appelés à devenir très importants grâce aux applications industrielles dont ils pourront faire l'objet.

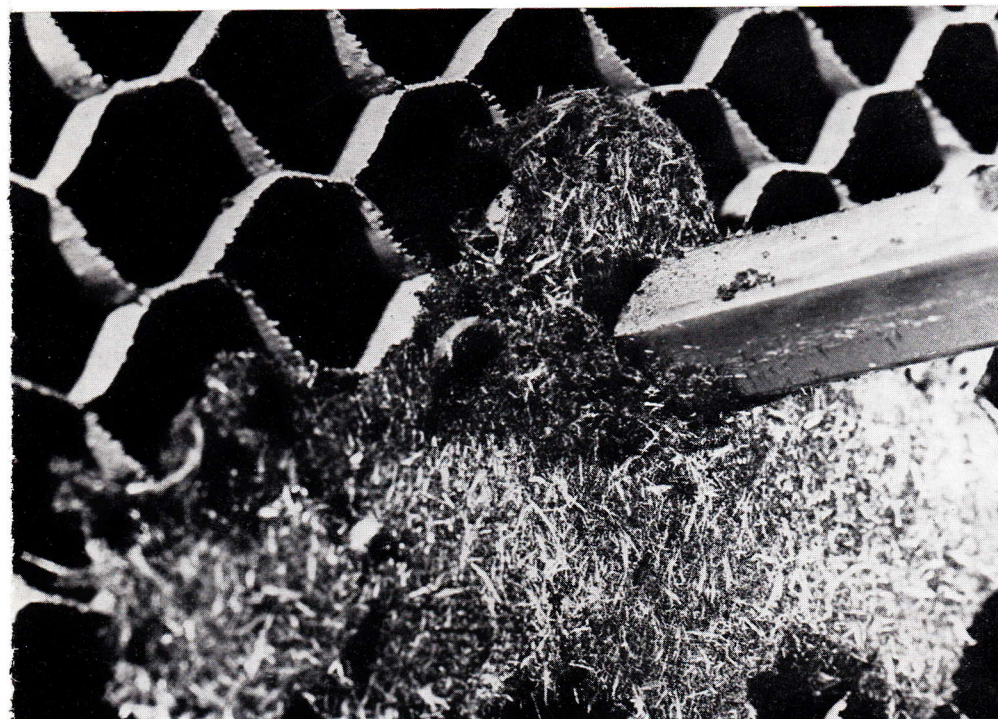
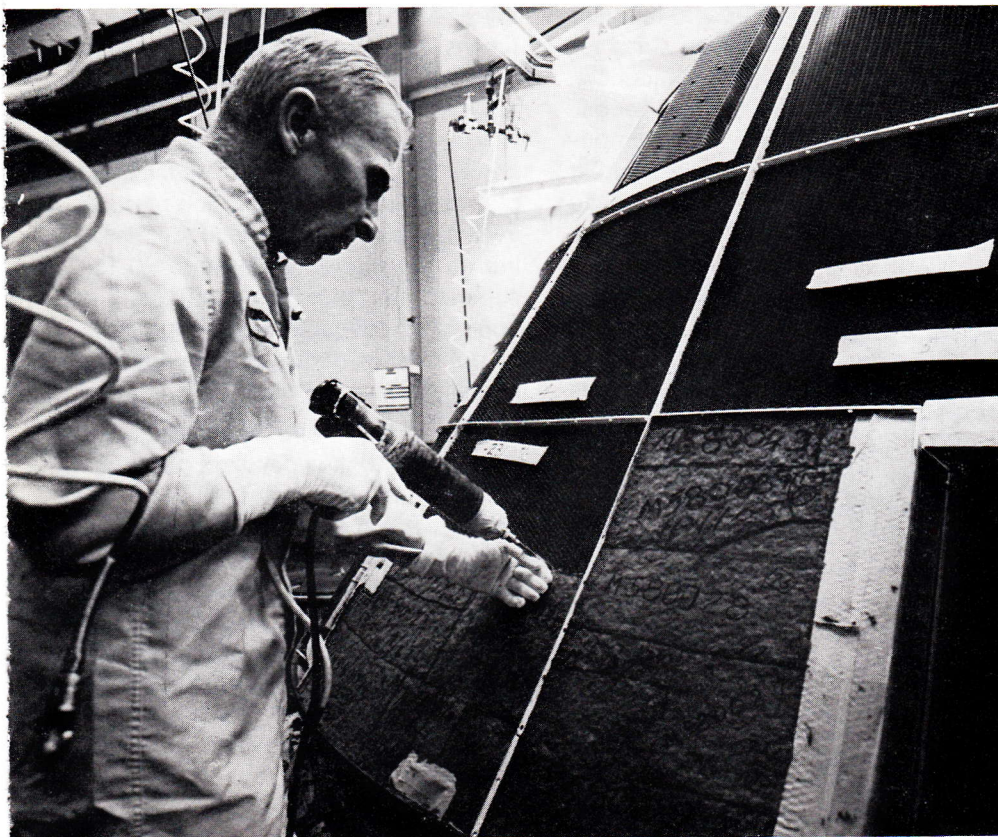
Le tableau périodique des 103 éléments simples, naturels et synthétiques actuellement connus, pourrait comporter, selon les prévisions des théoriciens, jusqu'à 168 éléments. En 1969, les physiciens réussissaient la synthèse de deux isotopes de l'élément 104, et s'efforcent maintenant de fabriquer des éléments plus stables, qui porteraient les numéros 110, 114 et 126 dans la classification. Si ces éléments ne peuvent guère avoir d'applications pratiques dans l'immédiat, ils offrent le moyen de saisir la nature intime de la matière. Néanmoins, la série des éléments synthétiques situés après l'uranium, d'où leur nom de transuraniens, fait depuis plusieurs années l'objet de recherches intensives pour en fabriquer en quantité suffisante et en développer l'utilisation.

Le curium qui porte le numéro 96 servait, à bord de Surveyor V, de sources de particules pour l'analyse chimique de la surface de la lune.

La recherche sur les matériaux est une réalité récente dont la nature et l'importance n'ont été comprises que depuis une vingtaine d'années au moment de la découverte du transistor.

Son caractère pluridisciplinaire et son rôle fondamental de trait d'union entre la science pure et le développement sont à l'origine de l'infrastructure mise en place, aux États-Unis en particulier, où est assuré un va-et-vient entre le concept et l'application, entre la théorie et la pratique, par la présence dans les centres de recherche universitaires et industriels, de physiciens, de métallurgistes, de chimistes et d'ingénieurs, ce qui favorise la communication des idées et de ce fait stimule la créativité.

Au service de la communauté scientifique et technique, la recherche sur les matériaux peut aussi prétendre à la connaissance et au contrôle du comportement et de la structure de la matière, ce qui permettrait de réaliser de façon idéale, à partir de principes fondamentaux, la synthèse d'un matériau parfaitement adapté à son application. C'est pourquoi son champ d'activité englobe non seulement l'étude et la préparation des structures, mais également l'étude des propriétés mécaniques — domaine traditionnel de la métallurgie — optiques, électriques et magnétiques, domaine historique de la physique des solides afin d'établir finalement les liens qui unissent structures et propriétés.



Enfin l'isotope 252 du californium pourrait servir en radiothérapie au même titre que le cobalt dans le traitement de certains cancers.

Un groupe d'éléments simples, les terres rares, qui ne le sont que de nom, intéresse particulièrement l'industrie électronique. L'une d'elles, le néodyme, à l'état de trace dans différentes matrices telles que le Grenat d'yttrium aluminium ou tout simplement le verre, a contribué au développement des lasers. Si toutes les propriétés des terres rares sont loin d'être complètement connues, leurs propriétés magnétiques sont largement utilisées dans plusieurs nouveaux matériaux actuellement au stade du laboratoire.

Les propriétés des cristaux d'orthoferrite où se forment des « bulles magnétiques » promettent de révolutionner l'industrie des ordinateurs, grâce à leurs extraordinaires possibilités de traitement et de densité d'enregistrement de l'information dans un espace extrêmement réduit, sup-

Ces deux photos montrent comment la matière nouvelle, qui a été étudiée et mise au point pour le bouclier thermique de l'engin spatial, est installée sur la capsule.

Tout d'abord, le document du haut permet de voir le revêtement extérieur de la capsule en fibre de verre et en forme de nids d'abeille. La substance est déposée, en force, dans chaque trou de ce treillage à l'aide d'un appareil à air comprimé.

Le second (photo du bas) montre, en gros plan, le détail du processus précédent. C'est cette substance collante, d'apparence fibreuse sur notre cliché, qui fond au moment du considérable échauffement subi lors de la rentrée dans l'atmosphère. Lorsqu'il a brûlé, il se loge en une couche carbonisée indestructible et protectrice dans le fond de chaque alvéole. C'est cette couche, dès lors absorbante, qui assure aux cosmonautes, une température intérieure "humaine" dans la capsule.

LA RECHERCHE

primant ainsi une grande partie des connexions traditionnelles. Ce sont encore les terres rares, et plus particulièrement le manque de l'une d'elles, l'euporium, dans les roches lunaires, qui aident les scientifiques à tirer des conclusions intéressantes sur l'âge de la lune.

Le silicium est actuellement au centre de la technologie des matériaux semiconducteurs et selon certains, le restera pendant longtemps. Les techniques de préparation, de traitement, ne cessent de faire des progrès illustrés, de brillante manière, par les circuits intégrés.

Jusqu'à maintenant, l'industrie électronique a utilisé comme substance semiconductrice des matériaux cristallins. Il n'est pas exclu qu'elle utilise un jour des substances amorphes. Ce sont des matériaux à l'état vitreux dont la préparation ne pose aucun problème. En revanche, la complexité des phénomènes qui s'y produisent pose un défi aux théoriciens.

Les dispositifs fabriqués à partir de substances amorphes présentent des propriétés fascinantes et sont susceptibles d'avoir de nombreuses applications dans les domaines de la commutation, des mémoires d'ordinateur, de l'édition, et de mener peut-être à une nouvelle technologie, comme le montrent les premiers résultats, encore contestés, des travaux de S. Ovshinski.

Les propriétés mécaniques des solides constituent un domaine où la recherche va de pair avec un énorme effort de création et d'évaluation technologique. Certains aciers sont rendus à la fois résistants et ductiles alors que, traditionnellement, la résistance d'un acier se payait par sa fragilité.

Ne considérant que la ductilité, les alliages superplastiques font encore mieux grâce à l'application aux mé-

taux des méthodes jusque là réservées aux verres et aux plastiques. Caractérisés par une structure particulière, ces corps métalliques peuvent, soumis à des efforts de traction à des températures suffisamment élevées, tripler ou quadrupler leur longueur ou même prendre des formes de bulles.

Hautes performances mécaniques

La recherche de hautes performances mécaniques (haute résistance et légèreté) à haute température, en particulier par l'industrie aérospatiale, et l'existence des fibres de verre ont ouvert la voie à un nouveau domaine passionnant : celui des matériaux super-résistants qui met en cause la prédominance traditionnelle des métaux.

Ce sont des filaments continus, des trichites (« poils » monocristallins d'un centimètre de long environ) ou même des paillettes de matériaux non métalliques et réfractaires qui ont des propriétés mécaniques et thermiques tout à fait extraordinaires. La résistance d'un filament d'alumine, à poids égal, est au moins 20 fois supérieure à celle d'un acier à haute résistance et conservée jusqu'à 900°. Cette résistance ne représente cependant que la moitié de la limite théorique.

Incorporées dans une matrice d'enrobage qui peut être une résine synthétique ou un métal, ces fibres donnent lieu à un matériau composite. La nature nous en offre des exemples dans le bois ou l'os.

Si le concept est simple, les problèmes de réalisation le sont beaucoup moins et expliquent que leur développement en est à ses débuts. Par exemple, la résistance d'un composite résine-filament d'alumine est trois fois plus faible que celle du filament lui-même. Néanmoins, les résines renforcées à l'aide de fibres

permettent déjà d'atteindre des résistances supérieures à celles des bons aciers à des températures inférieures à 400 °C, et les matériaux composites à matrice métallique ont une supériorité marquée sur les métaux les plus résistants. Ainsi le titane renforcé avec un filament d'alliage de béryllium a un module d'élasticité 70 fois supérieur à celui du titane seul et apporte un allègement d'environ 30%, ce qui rend ce matériau attrayant pour la réalisation du fameux SST.

Tout porte à croire que cette course aux matériaux spectaculaires fera apparaître des composites 40 à 50 fois plus résistants que les meilleurs aciers. Aussi la recherche et la technologie dans ce domaine s'efforcent de comprendre le comportement de ces matériaux et de mettre au point des méthodes de fabrication qui amèneraient une véritable révolution par la variété des applications possibles dans les domaines de l'espace et de l'aéronautique, du bâtiment, de l'exploration océanographique.

Les volets de voilure et de dérive de l'avion chasseur-bombardier F.111 font déjà appel au composite bore-résine. L'empennage est ainsi, à résistance égale, allégé de 160 kgs.

Les multiples essais en cours dans l'industrie aéronautique jettent les bases de l'avion de demain — le SST peut-être — tout en matériau composite.

Pour l'exploration des profondeurs marines, les premiers sous-marins étaient construits en acier et parfois en titane afin de résister aux pressions considérables. Récemment, l'Aluminote « Reynolds » entièrement en aluminium comme le sera le navire de surface, l'Alcoa Sea Probe, en raison de sa résistance à la corrosion, permettait d'atteindre des profondeurs de 4.500 mètres. On est maintenant sur la voie d'utiliser des matériaux en

fibre de verre. L'heure du sous-marin transparent, pour les grandes profondeurs, est proche.

Pour la propulsion nucléaire des avions, si le matériau utilisé dans les turbines et les échangeurs de chaleur doit résister à la corrosion à haute température, il doit aussi être léger. Aussi la solution de ces problèmes résidera dans la mise au point de nouveaux matériaux.

Tout aussi remarquables que les propriétés des matériaux super-résistants sont celles des substances portées à des températures voisines du zéro absolu, soit $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

L'une d'elle, la supraconductivité découverte en 1911, fait l'objet d'un débat animé. La supraconductivité caractérise certains matériaux, métaux ou alliages, qui perdent complètement leur résistance électrique en-dessous d'une certaine température, dite de transition, devenant alors un conducteur parfait. Pourra-t-on trouver des matériaux dont la température de transition soit plus élevée et plus précisément à la température ambiante? Telle est la question qui divise aussi bien les théoriciens que les expérimentateurs.

Une des applications de la supraconductivité est la transmission d'énergie électrique par câbles supraconducteurs, qui représente une économie d'énergie considérable puisque les pertes dues à la résistance sont supprimées. Dans le plus grand accé-

lérateur linéaire du monde, à l'Université de Stanford, on dépense 2 milliards de watts pour compenser les pertes dans le cuivre.

Enfin, un revêtement supraconducteur des engins qui navigueront dans l'espace pendant des semaines ou des mois éviterait aux astronautes d'emporter des quantités importantes de plomb pour se protéger des radiations émises par le soleil. A côté de la supraconductivité, la superfluidité de l'hélium ouvre des possibilités énormes à la recherche fondamentale. D'une façon générale, ces phénomènes physiques à très basses températures sont potentiellement riches de conséquences et les matériaux dans lesquels ils se produisent peuvent être qualifiés de matériaux d'avenir.

Un autre domaine bien loin d'être épuisé est celui des matériaux organiques.

L'extraordinaire développement de ces matériaux nous est familier à travers leurs innombrables applications : objets en matières plastiques, fibres textiles...

Les matières plastiques connues sont des polymères synthétiques qui résistent bien à la tension, la compression, l'abrasion, la corrosion, mais qui perdent leur forme au point d'ébullition de l'eau. De nouvelles méthodes de traitement font apparaître une nouvelle classe de polymères capables de résister à des températures de $900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ces polymères thermostables sont essentiellement des polymères aromatiques hétérocycliques. Ils peuvent servir aussi bien de fibres d'adhésifs que de revêtements isolants résistant à des températures de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit pour des vêtements de protection, soit pour les pare-brise et les radômes des avions volant à mach-2.

Les polymères de demain ne seront pas nécessairement faits de substances organiques, mais peut-être à partir des substances inorganiques telles que les combinaisons de silicium et d'azote, de bore et d'azote ou de phosphore et d'azote.

Si aucun des polymères minéraux n'est encore réellement passé au stade de l'exploitation industrielle — quelques-uns sont utilisés comme élastomères ou lubrifiants dans le domaine spatial — la discrétion accompagnant les nombreux travaux qui s'y rapportent, témoigne de leur importance potentielle.

On évoquera encore les corps organiques tels que les spiropyranes qui sont, comme certains composés minéraux, photochromes. Ils ont la propriété de changer de couleur sous l'action d'une irradiation lumineuse et retrouvent leur équilibre initial lorsque cesse l'irradiation.

Si les composés photochromes ne sont pas encore au point, (instabilité, phénomène de fatigue) on peut penser que dans 20 ans leur utilisation sera possible.

On pourrait multiplier à loisir les exemples de matériaux qui seront sans nul doute à la base de l'industrie de demain, mais les quelques cas évoqués suffisent à montrer que la versabilité de la matière n'a pas fini de nous surprendre.

Un corps aussi simple que l'eau provoque une controverse passionnée depuis la découverte d'une eau « polymérisée » qui se solidifie au-dessous de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et bout à plusieurs centaines de degrés. Si les résultats actuels étaient confirmés, il s'agirait ni plus ni moins de la découverte d'un nouveau type de liaison chimique qui pourrait avoir des applications scientifiques et industrielles. Autrement, ce ne serait qu'un phénomène banal dû aux méthodes expérimentales.

Aussi, la compréhension détaillée de la préparation, du traitement et finalement du comportement des matériaux présente encore une extraordinaire complexité qui requiert des efforts de recherche sans cesse plus importants.

J.-C. P.