

L'univers des matériaux

*Une
recherche
plurielle* p.4

Saint-Étienne :
la tradition de
l'excellence p.6

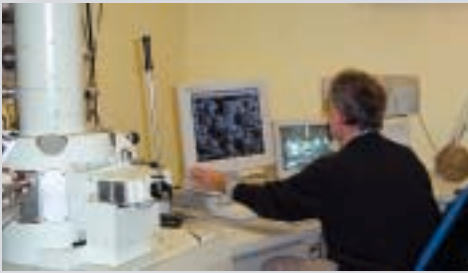
Dossier
Les prothèses
articulaires p.8

ZOOM MATÉRIAUX

- Du très neuf avec du vieux** 3
Une recherche plurielle 4
Testez vos connaissances 4
Le procédé US Steel d'étamage 5

EXPERTISE

- Un pôle d'excellence de l'Ecole** 6



- Biomatériaux : des progrès à petits pas** 8
Pr. Michel-Henri Fessy : "Des technologies très sophistiquées mais bien maîtrisées" 10
Le Pôle des Technologies médicales et le Cercle Prothèses 11

POINT DE VUE

Ludovic Boldu

- "Faire avancer la métallurgie"** 12

RESSORTS

Une publication de
l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
www.emse.fr

Directeur de la publication:
 Robert Germinet

Conception, rédaction
 et réalisation: ADH
www.adh-presse.com

Ont collaboré à ce numéro :
 Régis Blondeau, Bernard Forest
 Numéro CPPAP : en cours

Bientôt un 6^{ème} Centre

Liée par l'histoire à l'industrie métallurgique, porteuse d'une tradition éminente dans le domaine des matériaux et désormais aussi du design, la région stéphanoise doit bientôt donner une dimension nouvelle à cette vocation à la fois ancienne et très moderne grâce



François Gerin

Directeur général adjoint de Siemens SAS et président du conseil d'administration de l'Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Étienne

à la création d'un pôle dédié à l'ingénierie et à la santé. Le CIADT (comité interministériel d'aménagement et de développement du territoire), qui a évoqué ce projet le 26 mai 2003, a en effet décidé de le confier à l'Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne et de le localiser dans l'agglomération. Une étude de préfiguration doit être présentée dès le début de 2004.

Ce pôle doit devenir le sixième centre de formation et de recherche de l'Ecole. Il devrait faire travailler ensemble les ingénieurs et les professionnels de la santé, qui ont peu d'occa-

sions de le faire. L'enjeu est immense, car on en espère des réalisations qui contribueront demain à la santé et au mieux-être de chacun : de nouveaux traitements contre la maladie, des méthodes d'investigation plus performantes, des prothèses mieux tolérées. La constitution des tissus osseux, une recherche clinique plus efficace, ou la neuro-imagerie comptent également parmi les domaines que le Centre pourrait explorer.

L'Ecole des Mines de Saint-Etienne a au moins deux bonnes raisons de se réjouir de ce projet. La première, c'est qu'il conforte son choix d'un décloisonnement des spécialités. Favoriser le dialogue entre experts de domaines différents, leur permettre d'enrichir mutuellement leurs recherches grâce à une coopération féconde a toujours été la ligne de conduite de l'Ecole. Ce sera particulièrement le cas ici, où devront se conjuguer les efforts nationaux et régionaux de l'Université Jean-Monnet et du CHU de Saint-Etienne, du pôle des technologies médicales, du CNRS et de l'INSERM, de l'Université de pharmacie de Lyon, sans parler de grands groupes industriels compétents dans les domaines de la santé, de l'imagerie, de l'électronique ou de l'atome, dont on espère le concours.

L'autre motif de satisfaction sera de voir Saint-Etienne exploiter des compétences déjà reconnues dans le domaine des matériaux et de la santé pour leur donner une nouvelle dimension. S'appuyant sur cet acquis, la ville et l'Ecole doivent créer avec ce Centre, n'en doutons pas, un nouveau pôle d'excellence de dimensions nationale et internationale.

Du très neuf avec du vieux

A l'instar de l'acier, la plupart des matériaux utilisés dans l'industrie sont anciens. Mais la recherche ne cesse de mettre au point des traitements, thermomécaniques ou de surface, qui en améliorent les propriétés.

Parce que tout est matériau, partout autour de nous, en particulier les produits industriels, il n'est pas de progrès technologique sans progrès sur les matériaux. Y compris dans le secteur de pointe par excellence, la microélectronique, qui n'existerait pas sans le silicium. Y compris aussi en amont du produit fini, car avant la pièce existe le moule qui sert à la fabriquer. Améliorer les propriétés des matériaux, puis décider lesquels employer en fonction de tous les paramètres à considérer : nous sommes là au cœur d'une activité de l'ingénieur si déterminante et si universelle qu'on en finirait presque par l'oublier.

Une activité de pointe, même si, paradoxalement, l'expression " nouveaux matériaux ", souvent rencontrée, n'a pas vraiment de sens. En effet, si des céramiques, des composites, quelques textiles peuvent être qualifiés de " nouveaux ", la plupart des matériaux sont, dans leur principe, fort anciens. L'aluminium date de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, l'acier est plus vieux encore. Mais leurs caractéristiques dans les produits d'aujourd'hui n'ont plus rien à voir avec celles d'hier, et certaines de leurs applications étaient insoupçonnées il y a seulement 15 ou 20 ans. Le futur viaduc de Millau aura un tablier en acier, mais les aciers contemporains possèdent jusqu'à 80% de caractéristiques mécaniques de plus que l'acier traditionnel.

Qu'entend-on par là ? Essentiellement leur résistance : à la traction, la flexion, la compression, la torsion, la corrosion, l'usure. Certains aciers sont faits pour endurer des " mauvais traitements " de ce genre, d'autres sont surtout élaborés pour affronter des températures extrêmes, jusqu'à -200 ou



Même dans les objets les plus courants, l'acier d'aujourd'hui possède des caractéristiques qui le distinguent profondément de celui d'hier.

Doc. Arcelor Packaging

+500 degrés. Un acier industriel contient aujourd'hui de 15 à 30 éléments. Toute la difficulté de la recherche consiste à définir les rôles spécifiques de chacun d'eux et leurs interactions. La connaissance mathématique et physique des phénomènes permet de prolonger les essais en laboratoire par une modélisation sur ordinateur. On met ainsi au point une famille de matériaux très différents regroupés sous le même terme : l'acier d'une boîte de boisson n'a rien à voir avec celui d'une cuve de centrale nucléaire.

Quels matériaux choisir ?

C'est surtout grâce aux traitements que l'on améliore les caractéristiques d'un métal. Il est formé de cristaux, qu'on appelle grains. Des traitements mécaniques ou thermomécaniques appropriés transforment ces grains, dont la taille et les arrangements deviennent différents, et donc aussi leurs propriétés. Dans un laminoir par exemple, l'acier est porté jusqu'à

1 200 degrés. Les grains écrasés donnent naissance à de nouveaux grains ; il y a alors recristallisation. Le produit brut donne un " coil ", qui est souvent relaminé à froid. Au terme du process, même si la composition chimique demeure la même, les caractéristiques des grains n'ont plus rien à voir avec celles qu'ils avaient avant traitement. Avec certains aciers, on peut fabriquer par laminage des pièces de 20 à 30 microns d'épaisseur.

Les pièces de fonderie, elles, ne subissent pas de recristallisation : elles sont coulées dans un moule. Comme elles en ressortent fatalement avec des défauts -des pores plus ou moins gros dans le métal-, elles sont ensuite contrôlées par radiographie. On imagine la taille et la complexité de ce dispositif lorsque la pièce à contrôler est une pièce de centrale nucléaire.

Enfin, un aspect essentiel de la recherche s'intéresse aux traitements de surface, autrement dit aux dépôts d'autres matériaux sur cette partie en contact avec l'environnement. En ce sens, les matériaux

modernes sont de plus en plus des "multimatériaux". Là encore, il s'agit souvent d'améliorer la résistance, mais fréquemment aussi l'aspect du produit, son design. La science des matériaux progresse donc en liaison avec les exigences du marketing et de la vente.

Si le rôle des chercheurs est d'élargir sans cesse la palette des matériaux et propriétés disponibles, l'ingénieur doit, en liaison avec eux, opérer des choix. Pour un produit donné, quels matériaux utiliser ? Au cœur de toutes les contraintes industrielles, son rôle est toujours, pour chaque objet, de trouver un optimum entre les qualités mécaniques recherchées en fonction de l'utilisation et un certain nombre de nécessités, notamment la plus ou moins grande facilité d'usinage et d'assemblage (deux matériaux choisis doivent pouvoir être soudés ou collés l'un à l'autre, et éventuellement se déformer à la chaleur de manière compatible). Quant à la variable essentielle du prix de revient, elle doit être considérée en parallèle avec le coût d'usage et de remplacement (longévité de la pièce, arrêt éventuel d'un appareil pour effectuer une maintenance, etc.) Enfin, l'on tient compte désormais de l'aptitude au recyclage final ; puisque tout produit est d'abord matériau, ce matériau est à considérer tout au long de la vie du produit, de sa conception à sa récupération en passant par sa fabrication et son utilisation en service.

Une recherche pluri

Les matériaux ne connaissent pas de problèmes généraux. Les laboratoires sont extrêmement spécialisés, et travaillent en liaison

L'universalité des matériaux en fait un domaine de recherches ouvert sur toutes les industries. Les objets les plus anodins n'échappent pas à la nécessité de trouver un optimum, d'arbitrer entre différentes propriétés. Des portemanteaux dans le couloir d'une école peuvent être en bois, en métal ou en plastique. Mais finalement, compte tenu de l'esthétique, de la solidité demandée, du prix de revient, du coût d'installation et de remplacement, quelle solution choisir ? On assure que la question peut passionner des ingénieurs, de même qu'ils se pencheraient volontiers sur le cas d'une boîte de trombones. Dans le domaine des matériaux, c'est le bâtiment –béton, ciment, plâtre– qui représente les plus gros tonnages ; mais par l'ensemble des contraintes qu'ils conjuguent, l'industrie pétrolière, le nucléaire, l'armement, le secteur médical, l'aéronautique et l'automobile comptent parmi les domaines de recherches les plus "pointus".

Chaque industrie, en tout cas, a des besoins particuliers, qui se démultiplient en son sein en de très nombreuses demandes parti-

culières. Une voiture, par exemple, utilise quantité de matériaux : acier, aluminium, polymères, composites et même céramiques. Mais pour s'en tenir au seul acier, les différences sont déjà considérables d'un endroit à l'autre de la carrosserie, et a fortiori entre celui de la carrosserie et celui des carcasses de pneus.

Affiner la demande

En amont, chez les fournisseurs, les équipes recherche, marketing, production sont distinctes. Les métiers, les connaissances scientifiques de base, en physique et en mécanique, sont les mêmes, et ce sont pourtant des mondes différents ; passer de l'un à l'autre oblige à un important effort d'adaptation et à une exploitation nouvelle de ses connaissances. Dans le domaine des matériaux, il n'y a pas de problèmes généraux.

Aussi la recherche est-elle extrêmement spécialisée et fragmentée. La recherche fondamentale comme la recherche industrielle, en liaison avec les entreprises. La chaîne du fournisseur au client est toujours compliquée car le client

Testez vos

1. Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?

- A. Un métal particulier
- B. Un matériau dont la conductivité électrique varie suivant certains paramètres
- C. Un mélange de matériaux conducteurs et isolants

2. Classer ces métaux selon l'ordre croissant de leur température de fusion :

- A. Or

- B. Fer
- C. Tungstène
- D. Aluminium

3. Quelle maladie grave peut-on attraper si la teneur en plomb dans l'eau est trop élevée ?

- A. La maladie d'Alzheimer
- B. Un cancer de la peau
- C. Le saturnisme

4. La fonte est un alliage composé...

- A. De carbone et de cuivre
- B. D'aluminium et de silicium
- C. De fer et de carbone

5. Quel élément permet de rendre un acier inoxydable ?

- A. Le chrome
- B. L'aluminium
- C. Le zinc

6. De quel polymère sont

constitués les tuyaux d'arrosage et certaines gouttières ?

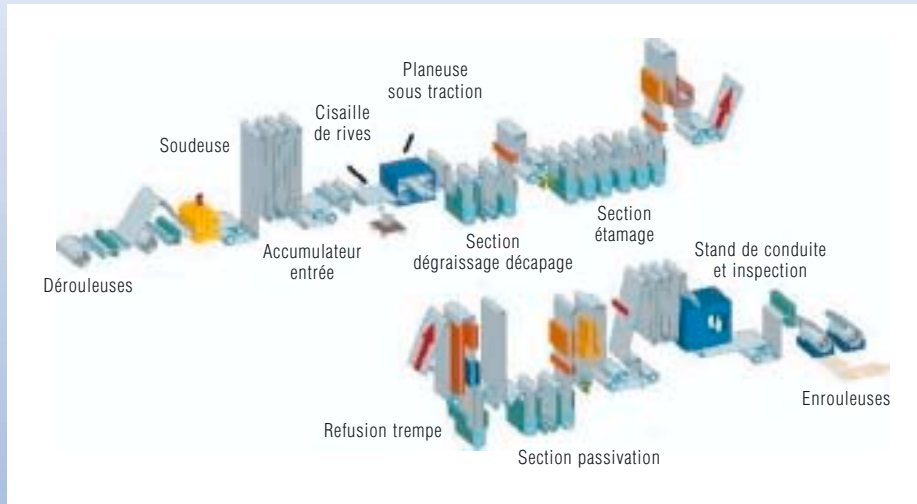
- A. Polycarbonate
- B. PVC
- C. Polystyrène

7. Parmi les mots suivants, lesquels désignent des métaux ?

- A. L'aluminium
- B. L'hélium
- C. Le pélagonium

UN EXEMPLE DE TRAITEMENT DE SURFACE

Le procédé US Steel d'étamage



L'étamage de l'acier, c'est-à-dire la pose d'un revêtement d'étain à sa surface, comprend une dizaine d'étapes au long desquelles le métal défile à environ 5 mètres/seconde. A la sortie de l'écrouissage, les rouleaux sont d'abord débobinés puis accolés les uns aux autres dans un poste de soudure (d'où la présence de l'accumulateur, pour maintenir la vitesse constante). Les rives, c'est-à-dire les bords, présentent une épaisseur légèrement moindre ; pour livrer un produit parfaitement plan, il faut donc les cisailer, avant de passer le rouleau à la planeuse qui corrige bosses et parties gondolées. L'acier, qui à ce stade est toujours huilé, doit passer par un bain de dégraissage avant l'étamage proprement dit, qui consiste à déposer par électrolyse une couche d'étain. La refusion permet de rendre le dépôt d'étain liquide et son refroidissement rapide ou trempe (dans un bac ou par pulvérisation) conduit à une structure amorphe de l'étain une fois solidifié. A l'étape suivante, la passivation rend la bande résistante à l'oxydation. Puis elle est à nouveau lubrifiée pour faciliter son emploi par le client, que la livraison ait lieu en bobines ou en feuilles. Enfin, une double inspection, visuelle et automatique, assure la qualité du produit avant l'enroulement.

(Doc. Arcelor Packaging)

elle

ratoires se répartissent des étroite avec l'industrie.

exprime des besoins relatifs au produit fini, mais dont la traduction n'apparaît pas tout de suite en termes de matériaux. C'est pourquoi le cahier des charges est le plus souvent élaboré en commun. Les expériences en laboratoire servent à affiner la demande, mais aussi les conséquences de ses choix sur le futur process de fabrication. D'où des allers-retours permanents entre le laboratoire et l'industrie.

Les recherches sur la résistance, par exemple les tests de fatigue, sur des échantillons ou en numérique, sont confirmés par d'autres, en vraie grandeur ; d'où des validations successives, au fil desquelles on se rapproche petit à petit du produit final. Dans de nombreux cas, le cahier des charges doit en outre intégrer les exigences d'organismes de normalisation, de contraintes réglementaires, nationales ou européennes.

connaissances...

D. Le plutonium
E. Le rhodium

8. Quel matériau sera généralement très dur et très fragile ?

A. Le métal

B. Le plastique
C. La céramique

9. Qu'est que la CVD ?

A. La "chemical vacuum deposition"
B. La "chemical vapour deposition"

sition"
C. Le successeur du DVD

10. Qu'est-ce que la galvanisation ?

A. Un dépôt de zinc sur une pièce métallique

B. Une application de courants galvaniques à des structures vivantes à des fins diagnostiques ou thérapeutiques
C. La transmission d'une énergie passagère

Réponses:

1 : B (La résistivité électrique varie fortement, en fonction de la température et de la teneur en éléments dopants) ; 2 : D (660°C) ; A (1064°C), B (1535°C), C (3410°C) ; 3 : C (du nom saturne, donné au plomb par les alchimistes) ; 4 : C (comme l'acier, mais la fonte est plus chargée en carbone) ; 5 : A, grâce à la couche d'oxyde protectrice que forme le chrome avec l'oxygène ; 6 : B (abréviation de polychlorure de vinyle) ; 7 : A, D et E (l'hélium est un gaz, le pétargonium une plante, autre nom du géranium) ; 8 : B ; 9 : B ; 10 : A, B et C.

Un pôle d'excellence

Au cœur d'une région d'ancienne tradition métallurgique, l'Ecole des Mines de Saint-Etienne dispose, dans quelques domaines très spécialisés, des recherches de pointe.

La recherche sur les matériaux n'est pas devenue par hasard l'un des pôles d'excellence de l'Ecole des mines de Saint-Etienne. Si Louis XVIII a décidé de la créer à cet endroit en 1816, c'est sans doute un peu pour l'éloigner des frontières, mais surtout parce que, au seuil de la révolution industrielle, elle devait servir le développement de la mine au cœur du bassin houiller de la Loire. Très vite, son activité s'est donc trouvée unie, non seulement au charbon, mais à toute une tradition métallurgique à laquelle son existence est liée. On sait quelle place les armes, le cycle, la machine-outil et plus généralement la mécanique occupent depuis longtemps dans la région stéphanoise. C'est au cœur de cette activité métallurgique reposant pour l'essentiel sur l'acier que l'Ecole a été amenée à pousser ses recherches sur les matériaux.

Aujourd'hui encore, toute cette culture industrielle et mécanicienne reste vive, alimentée par l'esprit inventif des Stéphanois. L'ancien laminoir Creusot-Loire de Rive-de-Gier poursuit son activité au sein d'Industeel (groupe Arcelor) tandis qu'Aubert et Duval (groupe Eramet) possède une forge à Firminy. Les applications liées aux métaux et à la mécanique, qu'elles débouchent directement sur des produits finis ou fassent vivre la sous-traitance, représentent encore 40 000 emplois dans la Loire, plus de la moitié de ceux du département. Ceci sans parler du bassin lyonnais, riche lui aussi en industries mécaniques.

Issu de cette tradition ancienne mais à la pointe des recherches les plus actuelles, le centre SMS (Sciences des Matériaux et des Structures) est aujourd'hui l'un des cinq centres de l'Ecole. Et l'un des plus importants de cette spécialité

en France, avec celui de l'Ecole des Mines de Paris (et Sophia-Antipolis), axé sur d'autres thématiques de recherche.

Rayonnement scientifique

Le centre SMS, lui, fait essentiellement de la recherche sur contrat industriel, et ceci bien que les quatre cinquièmes de ses quelque 115 collaborateurs appartiennent à une unité mixte de recherche du CNRS (l'UMR CNRS 5146). Il mène parfois des études en amont de la mise au point du matériau, par exemple sur des problèmes de corrosion, mais c'est encore de la recherche appliquée. Créé en 1993, il a fédéré à cette date un grand nombre d'activités du domaine des matériaux, dont certaines étaient conduites depuis 1965. En raison de l'hyperspécialisation de la

recherche sur les matériaux, les six laboratoires qui le constituent ne s'intéressent qu'à des domaines très spécifiques.

Installé sur les trois étages du bâtiment historique de l'Ecole, cours Fauriel, le centre SMS dispose à cette fin de moyens importants : quatre microscopes électroniques, des analyseurs de surface, plusieurs installations utilisant les rayons X, des machines d'essais mécaniques pour les études de déformation, d'autres pour les essais de corrosion et d'autres encore, pour les problèmes de déformation et de corrosion simultanées ; toute la partie relevant de la modélisation et de la simulation numérique s'appuie sur un parc de deux cents ordinateurs.

Le rayonnement scientifique et la reconnaissance internationale du centre SMS ne sont plus à démontrer. Les six équipes publient régulièrement dans les revues spécialisées qui font autorité, comme *Materials Science and Engineering*, *International Journal of Plasticity* ou *Acta Materiala*. En 2002, les enseignants chercheurs du centre ont ainsi publié deux livres et 107 articles dans des revues à comité de lecture ou dans des colloques avec actes.

Le design aussi

Ce nombre serait bien plus élevé encore si les contrats industriels n'imposaient pas bien souvent la confidentialité. Leur montant, autre indicateur de vitalité scientifique, frôlait 1,5 million d'euros en 2002, dont les deux tiers avec des entreprises, productrices ou utilisatrices de matériaux. Tous les grands secteurs industriels sont concernés : énergie, microélectronique, mécanique, transports, armement, et bien sûr santé. Ces recherches sont souvent menées

Les six départements

Le centre SMS est organisé en six départements de formation et de recherche :

- Métaux et alliages haute pureté, qui réalise de petites productions très spécifiques pour ses recherches et fournit d'autres laboratoires ; il ne possède qu'un équivalent au monde, à l'université japonaise Tohoku de Sendai ;
- Microstructures et mise en forme ;
- Mécanique physique et interfaces, avec ses applications aux biomatériaux ;
- Céramiques spéciales ;
- Traitements de surface ;
- Mécanique et Matériaux, qui conduit des recherches sur les composites.

lence de l'École

nt-Étienne a su se mettre au service de son environnement industriel pour conduire, recherches désormais reconnues au plan international.



Cet appareil de microscopie électronique à balayage à émission de champ, de nouvelle génération, permet d'observer des échantillons de nature diverse (métal, céramique, etc.) avec une résolution de 1,5 à 2 nanomètres et des grossissements allant jusqu'à 150 000 fois. Équipé d'appareillages complémentaires, il permet aussi d'obtenir des informations précieuses sur la micro composition chimique, les défauts éventuels et la microstructure cristalline. DR

pour de grands groupes industriels comme Alcoa, Arcelor, le CEA, Framatome, Michelin, Pechiney ou Thales. Un certain nombre de ces projets sont conduits à travers des réseaux de partenaires régionaux et internationaux. En outre, le centre SMS a réalisé en 2002 pour 171 000 euros de contrats

dans le cadre de projets européens.

Il est également très présent dans le CEM, Cercle d'Etudes des Métaux, créé au milieu des années trente et dont le président n'est autre que Régis Blondeau, le directeur du centre SMS. Il organise deux colloques annuels suivis par les industriels et des journées thé-

matiques axées sur les transferts de technologies. Cette association répond également à des demandes d'expertise et de formation. Quant à la SF2M, Société Française de Métallurgie et de Matériaux, c'est une société savante qui existe depuis 1945 ; une enseignante de SMS, Anna Fraczkiwicz, préside la section régionale sud-est. Saint-Étienne possède quatre pôles technologiques (qui sont autant d'associations de 1901) consacrés à l'eau, l'optique et la vision, la mécanique et les technologies médicales ; le centre SMS se situe à la croisée des trois derniers.

Enfin, celui-ci est fortement impliqué dans le design, dont Saint-Étienne est la capitale internationale. Les designers doivent utiliser au mieux les propriétés des matériaux pour donner à leurs produits un aspect attrayant dont ils espèrent un avantage concurrentiel. Ils sont donc concernés au premier chef par toutes les avancées scientifiques dans le domaine des matériaux.

Les activités de formation

Les enseignants chercheurs du centre SMS se consacrent naturellement à la formation, et assurent notamment l'ensemble des enseignements " Mécanique et Matériaux " pour les futurs Ingénieurs Civils des Mines : le " Pôle physique " en première année, quatre axes en deuxième année (matériaux, éléments finis et structures, élaboration et transformation des matériaux, mécanique des matériaux et des structures) et bien sûr l'option Matériaux de troisième année.

Le centre intervient en outre dans deux DEA (" Sciences et Génie des Matériaux " et " Génie Mécanique et Génie Civil "). En 2002, 9 DEA et 13 doctorats ont été soutenus.

Ses membres interviennent dans diverses autres formations, dans la région et au-delà, du DUT au DEA et même dans la formation des professeurs de classes préparatoires.

Enfin, le Centre réalise chaque année deux ou trois stages spécifiques de formation continue.

Biomatériaux : des

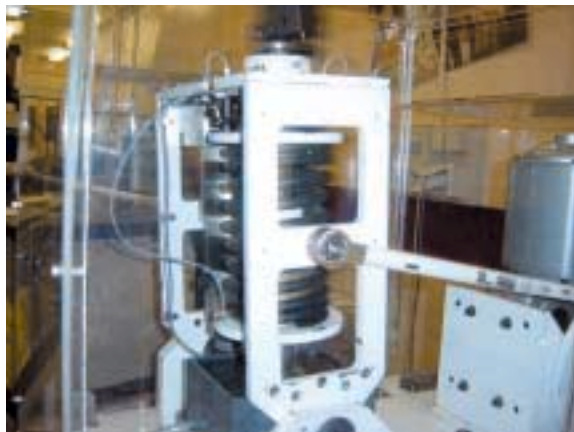
Au sein du centre SMS, une équipe se consacre à une catégorie de matériaux confrontés à des
Si la solution idéale n'existe pas,

L'un des six départements du centre SMS s'intitule " Mécanique Physique et Interfaces ". Cette appellation un peu obscure pour le profane recouvre l'étude de la tenue en service des matériaux en fonction des contraintes qui leur sont appliquées et de l'environnement. C'est en son sein qu'une petite équipe se consacre plus spécialement aux biomatériaux, c'est-à-dire aux matériaux en contact avec le corps humain. Le domaine serait encore trop vaste pour éviter la dispersion, puisqu'il va des montures de lunettes au sparadrap, des lentilles oculaires aux valves cardiaques en passant par les fils de suture. Aussi cette équipe de recherche du département SMS se consacre-t-elle exclusivement aux matériaux utilisés pour la fabrication des prothèses articulaires : hanche, genou, cheville, épaule, coude, doigt, ou même colonne vertébrale.

Pourquoi et comment ces biomatériaux se dégradent-ils dans le corps humain, et comment y remédier pour donner aux prothèses une durée de vie au moins égale à l'espérance de vie des patients ? Telle est la finalité de ces recherches. L'équipe s'intéresse également aux matériaux entrant dans la fabrication des outils que le chirurgien utilise pour intervenir, et qui doivent en particulier ne subir aucune corrosion.

5 millions de pas par an

L'implantation de prothèses articulaires est plus courante qu'on ne croit : en dix ans, plus de 1,5% de la population française reçoit une prothèse de la hanche, moitié moins pour le genou. Or, en l'état actuel de la technologie, 10% des patients s'étant fait implanter une prothèse de hanche doivent être



Machine de frottement-corrosion permettant de simuler le frottement en milieu physiologique de l'articulation d'une prothèse de hanche, de genou, etc.

DR

réopérés dans les dix ans ; cette proportion est naturellement une moyenne et croît de façon exponentielle avec l'ancienneté de la prothèse : il est très rare qu'elle " tienne " trente ou quarante ans. Les matériaux choisis n'expliquent pas tout : avec deux prothèses identiques, les résultats varient en fonction du geste du chirurgien, de l'état de santé général du patient, de son poids, ses os, ses muscles, sa démarche, son comportement pendant la rééducation. Une chose est

sûre, malheureusement : la seconde opération est toujours plus délicate que la première.

Les chirurgiens attendent donc beaucoup de nouveaux progrès dans le domaine des biomatériaux. La recherche les associe, bien sûr, de même qu'elle s'appuie sur les compétences des biologistes pour déterminer le comportement des cellules autour de la prothèse, notamment pour prévenir tout phénomène de rejet. Des cultures cellulaires sont nécessaires pour

Priorité à la région

L'équipe des biomatériaux, qui privilégie l'assise régionale, travaille régulièrement avec des fabricants de prothèses (qui possèdent souvent leurs propres équipes de recherche-développement) et des entreprises de services associés : SERF (Société d'Etudes, de Recherches et de Fabrications), dans le Rhône, qui travaille aussi dans le domaine des prothèses dentaires ; Evolutis, près de Roanne, qui réalise des prototypes et des produits sur mesure ; ou encore Coating Industries et Nitruvid pour les traitements de surface.

Au total, une quinzaine d'entreprises industrielles, liées à l'Ecole par des contrats ou en association via le Pôle des Technologies Médicales, basé à Saint-Etienne, et son Cercle Prothèses. Ces contrats prévoient des recherches, des prestations de services, l'intervention de stagiaires ou de doctorants en contrats CIFRE.

Les enseignants chercheurs sont également sollicités pour des expertises judiciaires qui doivent trancher des conflits entre le corps médical, les patients et les compagnies d'assurances.

progrès à petits pas

**contraintes très spécifiques : ceux qui entrent dans la fabrication des prothèses articulaires.
la recherche marque des points.**

déterminer les matériaux biocompatibles ; la recherche va même bien au-delà, puisqu'elle s'applique à mettre au point des matériaux capables de faire réagir l'organisme dans le sens souhaité.

Où en sont ces recherches ? On sait que pour être biocompatibles, les matériaux doivent notamment résister à la corrosion engendrée par l'eau salée du corps humain ; ils doivent de plus supporter les contraintes mécaniques égales, pour une personne qui marche, à trois ou quatre fois son poids. Un patient jeune fait en moyenne cinq millions de pas par an ; si l'on veut que la prothèse dure vingt ans, elle doit donc résister à cent millions de mouvements, et à l'usure qui s'ensuit. Le risque majeur, on le sait, tient aux débris (de 0,1 à quelques microns) qui en se dispersant provoquent par réactions cellulaires une attaque de l'os. C'est la première cause de réintervention. Par ailleurs, des machines ont été mises au point pour tester la résistance à la fatigue ou au choc en milieu corrosif, dans des conditions aussi proches que possible des sollicitations mesurées au cours de l'activité humaine.

Sept couples de matériaux

Dans le choix des matériaux, on sait depuis longtemps qu'il faut écarter l'aluminium, qui n'offre pas les qualités requises. Restent les aciers inoxydables, les alliages de titane (métal également très prisé par l'industrie aéronautique pour sa faible densité) et les alliages cobalt-chrome. Dans une prothèse de hanche, le couple de frottement le plus utilisé est la tête métallique (cobalt-chrome ou acier inoxydable) avec une cupule en polyéthylène. Pour la tête, la céramique pro-

voque moins de débris mais se révèle plus fragile (dans un cas sur dix mille, il y a fracture). On trouve aussi, mais assez peu utilisé, le couple tout en céramique (tête en alumine sur cupule en alumine). Enfin, on connaît aussi la prothèse exclu-

d'être atteintes. La recherche porte donc aussi sur des méthodes nouvelles qui évitent ces inconvénients, comme la stérilisation par irradiation sous atmosphère contrôlée ou sous vide.

“ Les chercheurs proposent des



Prothèse totale (dite “ tricompartmentale ”) du genou fabriquée par Implants Industrie. Cette entreprise spécialisée dans la conception et la fabrication d'implants orthopédiques est installée à La Fouillouse, près de Saint-Étienne, depuis sa création en 1990. Sur cette photo, on distingue le condyle double en alliage de chrome, cobalt et molybdène ; la rotule en polyéthylène haute densité ; l'embase de plateau tibial et la quille, tous deux en titane spécial médical ; enfin l'insert de plateau tibial en polyéthylène haute densité. Tous ces matériaux sont bien sûr biocompatibles et testés dans des laboratoires agréés.

Doc. Implants Industrie

sivement en métal (cobalt-chrome). Au total, sept couples de matériaux sont plus ou moins couramment utilisés.

La mise au point d'une prothèse doit également prendre en compte les contraintes de la stérilisation, la pièce étant garantie stérile pendant cinq ans. Or certaines méthodes attaquent les propriétés des matériaux : la stérilisation à la vapeur d'eau, par exemple, ramollit le polyéthylène ; avec les rayons gamma, ce sont les propriétés anti-usure qui risquent

améliorations, mais ensuite il faut encore convaincre le chirurgien et son patient de les tester in vivo, explique Bernard Forest, responsable du centre Mécanique Physique et Interfaces. On comprend qu'un saut qualitatif puisse les faire hésiter. La recherche progresse donc à petits pas. ” Existe-t-il aujourd'hui une solution plus avancée, plus satisfaisante que les autres ? “ Pour l'instant, nous sommes bien incapables de définir une prothèse idéale, répond-il. Si je devais prendre une décision pour moi-même, j'avoue que je serais bien embêté... ”

Pr. Michel-Henri Fessy : “ Des technologies sophistiquées, mais bien maîtri

Pour le chef du Centre d'Orthopédie Traumatologie de l'hôpital Bellevue à Saint-Etienne, utilisés dans les prothèses constitue un objet de recherches essentiel.

• **On évoque désormais les prothèses de la hanche de façon courante. Est-ce donc quelque chose de si banal ?**

Sans être anodine, leur implantation dans le corps humain est désormais bien rodée. Et plus ancienne qu'on ne croit, puisque la première a été réalisée en 1962, par un Anglais nommé John Charnley ; il a même été anobli par la Reine pour cela. La chirurgie orthopédique –qui étymologiquement est l'art de "mettre droits les enfants"– a une tendance à l'hyperspécialisation : certains s'intéressent à la hanche, d'autres au genou, d'autres encore à l'épaule. Et c'est la hanche qui donne lieu au plus grand nombre d'interventions : en France, environ 100 000 par an. Moi-même, j'opère 300 à 400 patients chaque année, que le problème à traiter soit d'origine malformative, dégénérative, traumatique, tumorale ou inflammatoire. Normalement, le patient marche sans canne au bout de trois mois et a oublié l'opération au bout de six mois.

• **Comment le chirurgien aborde-t-il la question des matériaux utilisés ?**

Les problèmes de fixation sont maintenant résolus. Il reste celui de la tribologie, c'est-à-dire de frottements et d'usure. Dans 10% des cas, du fait de la dispersion de débris microscopiques, il faut réopérer dans les dix ans. Or ce risque dépend de deux variables : l'âge du patient –plus il est jeune, plus grande sera son activité physique– et les matériaux utilisés. Sur ce dernier point cependant, il existe des standards reconnus par la communauté internationale. La tige en titane avec traitement de surface donne



Né à Lyon, où il a fait ses études, le professeur Michel-Henri Fessy a été nommé en 1998 –à 39 ans– chef du Centre d'Orthopédie Traumatologie de l'hôpital Bellevue à Saint-Etienne, un service de 70 lits qui assure quelque 15 000 consultations par an. Spécialiste de la hanche, praticien, enseignant et chercheur, il fait également partie d'une équipe de l'INSERM qui se consacre à l'adaptation de l'os à la contrainte mécanique. Naturellement, la question des matériaux utilisés dans les prothèses est pour lui essentielle.

DR

satisfaction. Pour la tête de la hanche et le cotyle en contact avec elle, il y a la solution métal-métal, avec des alliages de cobalt et de chrome, et la solution alumine-alumine.

• **Le choix est-il vaste ?**

Pour la hanche, oui, car le nombre d'opérations permet aux fabricants d'amortir les coûts. On trouve donc plusieurs centaines de modèles en différentes tailles. La manufacture a réalisé de gros progrès : elle fait appel à des technologies très sophistiquées, mais bien maîtrisées. Les entreprises –dont quelques-unes dans le bassin stéphanois– s'appuient sur un système qualité très rigoureux. Cela dit, le principe du TIPS, tarif interministériel des professions de santé, subordonne un nouveau remboursement à la preuve d'un service sup-

plémentaire. Or, puisque le but est d'améliorer la longévité des prothèses, il faut du recul, des années, pour fournir cette preuve. D'où des investissements qui font hésiter, ce qui freine l'innovation.

• **Comment se diffuse cette innovation ?**

Naturellement, elle n'arrive pas tout se suite sur le marché. Elle passe d'abord par l'étape de bureaux d'études ou de laboratoires comme celui de l'Ecole des Mines de Saint-Étienne. Si le nouveau modèle est disponible, c'est qu'il est déjà validé. Aujourd'hui par exemple, on réfléchit à l'emploi du carbone diamant comme éléments du couple de frottement. Mais on n'en est qu'au stade de la recherche appliquée, et l'on ne peut dire quand cette solution se développera.

gies très sées ”

Le Pôle des Technologies Médicales...

la question des matériaux

• Comment se passent les achats ?

Les fabricants de prothèses disposent d'un réseau de distribution, avec des représentants, comme pour n'importe quel produit. Les achats, gérés par le pôle DMS (dispositifs médicaux stériles) de la pharmacie centrale de l'hôpital, suivent la procédure des marchés publics. Nous élaborons un cahier des charges très strict et, parmi ceux qui y satisfont, le moins-disant est retenu ; les prix, d'ailleurs, varient dans une fourchette étroite de quelques pour cent. Aussitôt qu'une prothèse a été implantée, l'hôpital est à nouveau livré. Il est important de souligner la traçabilité de ces prothèses : en cas de problème –comme celui que nous avons connu à l'été 2002 où, à la suite d'une erreur dans un process industriel, un grand nombre de têtes en zircone ont cassé–, nous pouvons désormais dire précisément quel patient a reçu quelle prothèse et à quelle date. L'information sur les incidents est aussitôt transmise et centralisée ; la vigilance sur les matériaux fait partie de la veille sanitaire.

Le Pôle des Technologies Médicales est, avec ceux consacrés à l'eau, l'optique-vision et la mécanique, l'un des quatre pôles technologiques de la région stéphanoise. Créé en 1993 sous la forme d'une association loi de 1901, il se définit comme un réseau de compétences associant tous les professionnels du biomédical, qu'ils soient chercheurs, enseignants, formateurs, industriels ou praticiens.

Son but : fédérer, promouvoir et développer le tissu industriel et scientifique du secteur des technologies médicales dans le département de la Loire. On sait en effet qu'au sein de la région Rhône-Alpes, elle-même en pointe dans le domaine de la santé, le département accueille la première concentration européenne d'entreprises du textile santé et se situe au premier rang national pour la recherche clinique ; il regroupe enfin 30% du secteur des technologies médicales de la région.

Interface entre les différents acteurs concernés, le pôle regroupe ainsi quelque 300 chercheurs, des enseignants en médecine de l'université Jean Monnet et 60 entreprises employant 1 680 salariés pour un chiffre d'affaires de 230 millions d'euros ; le CHU de Saint-Étienne, qui compte 2 100 lits, est

intéressé à travers 18 laboratoires. Le Pôle travaille également en liaison avec des centres techniques et a noué des partenariats avec des institutionnels et d'autres pôles dédiés à la santé.

Pour ses adhérents, le Pôle réalise une veille technologique, tient à jour l'information et la documentation sur l'ensemble des activités concernées : textile médical, équipement hospitalier, implants, etc. Il y parvient grâce à sa présence dans de nombreuses rencontres nationales et internationales ; lui-même organise chaque année en juin la " journée implants " en région Rhône-Alpes. Les autres missions clés du Pôle sont le développement technologique, le développement international, enfin l'ingénierie et l'accompagnement de projets innovants.

... et le Cercle Prothèses

C'est à son initiative qu'a été créé en 1998 le Cercle Prothèses, qui regroupe plus spécialement les principaux acteurs départementaux dans le domaine des implants orthopédiques. Lieu d'échanges et de réflexion, le Cercle Prothèses permet de décupler les moyens et d'engager ainsi des actions collectives dans le domaine de la recherche-développement comme de la stratégie commerciale, et ceci d'autant plus qu'il s'est ouvert à des PME d'autres départements de Rhône-Alpes.

En son sein fonctionne un club de veille qui collecte des informations ciblées, organise des réunions thématiques animées par des experts et diffuse un bulletin trimestriel contenant les informations les plus pertinentes. Il mène aussi des travaux de recherche spécifiques à la demande de ses adhérents : études, état de l'art, etc.



L'équipe du Pôle des Technologies Médicales : la directrice Isabelle Vérilhac (assise), Agnès Chavand (à dr.), chargée de projets, et Roselyne Rousset, assistante.

Doc. Mairie de Saint-Etienne

“ Faire avancer la métallurgie ”

Diplômé de l'Ecole il y a quatre ans, Ludovic a déjà vu ses missions s'étoffer au sein du groupe Arcelor. Mais s'occuper de process, de satisfaction clients, discuter avec les commerciaux et les laboratoires, c'est toujours garder au cœur de ses préoccupations la qualité des matériaux.

“ Il y a des secteurs comme l'informatique, où l'on est très tôt expert, mais parfois très vite dépassé. Dans la métallurgie, c'est le contraire : l'ingénieur construit à long terme une connaissance scientifique qu'il valorise ; peu à peu, il est reconnu comme indispensable... ” Celui qui livre cette analyse sait de quoi il parle : sorti de l'Ecole des Mines de Saint-Étienne en 1999, Ludovic Boldu a déjà accumulé une expérience variée d'ingénieur spécialiste en matériaux, expérience qui lui donne une vue de plus en plus large sur les aspects techniques, mais aussi commerciaux et managériaux de son métier.

A l'Ecole, il choisit en troisième année l'option Matériaux, et parallèlement s'inscrit en DEA. Son stage l'amène chez Hydromécanique et Frottements, une grosse PME de la Loire spécialisée dans le traitement de surface où il s'occupe de caractériser par rayons X la résistance à l'oxydation à haute température de couches minces (quelques dizaines de microns) ultra dures déposées sous vide (PVD). Sa mission débouche sur une comparaison de différents revêtements appelés à servir principalement pour des pièces en frottement devant résister à l'usage en température : forets, engrenages, etc.

Dès sa sortie de l'Ecole, il est tout de suite recruté par le groupe sidérurgique Arcelor. Au laboratoire de Sollac Lorraine, le LEDEPP, dédié aux produits plats, la mission de Ludovic s'élargit puisqu'il doit désormais développer des nouveaux produits, mais également optimiser des “ routes métallurgiques ”, c'est-à-dire les filières de

fabrication complexes allant de l'aciérie jusqu'au produit final.

“ Encore beaucoup à apprendre ”

Depuis septembre, ce Lyonnais est installé dans la région nantaise et travaille sur un autre site d'Arcelor, celui de Basse-Indre, spécialisé dans les aciers destinés à l'emballage (boîtes embouties, fonds classiques, “ ouverture

ché au service “ Satisfaction Clients ”. En effet, garante des modes de fabrication de l'usine et des moyens de contrôle de la qualité, cette activité s'oriente naturellement vers les préoccupations du client. Ces relations permettent aussi d'orienter les évolutions de procédés et des produits dans un rôle plutôt préventif que curatif.

Si ses activités sont donc de plus en plus transversales, Ludovic n'oublie pas les connaissances



Ludovic Boldu. Un souci permanent : la qualité.

DR

facile ”, etc.) Ses compétences se sont encore accrues puisqu'il aborde la fabrication des produits sous l'angle de la qualité. “ Du fournisseur au client en passant par les différents engins de l'usine, chacun cherche à atteindre ses propres objectifs, explique-t-il. Ma mission est de rendre tout cela cohérent pour améliorer la performance globale du point de vue de la qualité. ”

Ce métier d'interface est ratta-

scientifiques qui en forment le socle. “ Une entreprise qui souhaite rester au premier rang doit savoir innover et renouveler son offre. C'est toujours au scientifique que revient la charge du progrès en rupture... ” Mais le jeune ingénieur ne prétend pas pour autant détenir toutes les “ clés ” nécessaires : “ J'ai encore beaucoup à apprendre, avoue-t-il avec modestie, en particulier sur le revêtement... ”