

## Manifeste pour une BioIngénierie Mécanique

*Résumé.* Dans ce tract, je présente quelques arguments qui prétendent montrer que la mécanique des milieux continus peut être utile dans la pratique médicale, et je brosse un état des lieux rapide à l'heure actuelle. Le but est de faire prendre conscience à la communauté scientifique française aux niveaux locaux, régionaux et nationaux de l'urgence de soutenir la BioIngénierie Mécanique. Ce manifeste et d'autres documents en relation sont disponibles sur mes sites web <http://geo.hmg.inpg.fr/loret/lorethp.html> et [http://geo.hmg.inpg.fr/loret/loret\\_bioing.html](http://geo.hmg.inpg.fr/loret/loret_bioing.html).

La pratique médicale et les sciences de la vie bénéficient des progrès spectaculaires des sciences dures, et de leurs applications dans les disciplines de l'ingénierie. L'Ingénierie Biomédicale regroupe l'ensemble des efforts des diverses branches de l'Ingénierie, de la Biologie et de la Médecine en vue de faire progresser la clinique et les traitements médicaux.

### Biologie, Médecine et Ingénierie

Les termes d'*Ingénierie BioMédicale* et de *BioIngénierie* recouvrent, en particulier, l'Imagerie Médicale, les BioIngénieries Mécanique, Electronique et Chimique. Il s'agit d'ingénierie, même si les interactions avec les disciplines médicales et de la santé, physiologie, orthopédie, ophtalmologie, etc ..., et les sciences de la vie, biologie, biochimie, ..., sont cruciales. Mais la contraction d'Ingénierie BioMédicale en BioIngénierie est plus celle qui de Tanganyka et Zanzibar réunis donne naissance à la Tanzanie. Pour oser une comparaison plus mathématique, on pourrait dire que le mariage de la biologie et de l'ingénierie groupant deux espaces de dimension  $M$  et  $N$  engendre un espace infiniment plus riche de dimension  $M \times N$ .

Les diverses branches de la BioIngénierie visent à acquérir des connaissances dans le domaine du vivant en utilisant leurs techniques propres, aussi bien expérimentales que de modélisation et de simulation. Cette étape demande bien sûr une connaissance de base spécifique des milieux vivants telle que l'enseignement la biologie et la biochimie. Mais il ne s'agit pas que de cela. Une fois ces connaissances acquises, l'ingénierie doit développer des outils spécifiques pour aider à la pratique médicale quotidienne.

Certaines techniques de chirurgie orthopédique et de chirurgie vasculaire sont purement empiriques. Encore peuvent-elles être améliorées par une approche plus globale et construite qui, par exemple pour l'angioplastie, prenne en compte les interactions entre la rigidité naturelle des vaisseaux, celle des stents, et l'écoulement du fluide visqueux sanguin.

Mariage de la Mécanique et de la Médecine. L'exemple de la chirurgie assistée par ordinateur illustrera qu'il est nécessaire de recruter plusieurs disciplines pour espérer apporter de réelles innovations. Il s'agit d'aider le chirurgien à rendre les actes opératoires le moins invasifs possible, et d'éviter de trop grandes, et inutiles ou dommageables, perturbations des organes à traiter. Sont concernées non seulement la chirurgie viscérale, l'arthroscopie mais aussi la chirurgie oculaire réfractive par exemple. Les progrès spectaculaires de la miniaturisation des systèmes de vision

sont ici un élément de base. On découvre maintenant que la mécanique, et même la chimio-mécanique des tissus biologiques, ont un rôle essentiel à jouer pour le succès de l'entreprise. Or, ces aspects sont encore peu connus, et c'est donc le moment adéquat pour aborder le sujet. Comment, et pourquoi la mécanique des tissus intervient-elle dans l'acte chirurgical? Pour pouvoir remplir leurs fonctions, les tissus doivent s'adapter à la modification de leur géométrie naturelle due à l'excision quasi-instantanée. Cette adaptation n'est, elle, pas instantanée. Concrètement, par exemple, la cornée va évoluer après l'intervention du chirurgien. Celui-ci ne peut donc évaluer la qualité de son intervention d'après la géométrie cornéenne qu'il laisse à la fin d'un Lasik, mais doit prévoir la réponse à long terme, due à un comportement mécanique différé. Les images colorées de la chirurgie assistée par ordinateur ont peut être l'heur de plaire au public, mais elles ne sont que billevesées si elles ne prennent en compte le comportement réel des tissus: c'est là un des nombreux exemples où la mécanique intervient.

La révolution des années 90. Les années 90 ont vu une véritable révolution s'opérer dans certains pays, surtout les Etats-Unis et certains pays d'Europe. Jusque là, chaque département universitaire a enseigné la partie de génie biomédical comprise dans son segment d'activités. Appareils d'acquisition de données numériques et imagerie médicale pour les ingénieurs électriciens. Applications en orthopédie, biomatériaux et circulation vasculaire pour les ingénieurs civils et hydrauliciens. Ces activités traditionnelles ont été amplifiées au cours des années 90 par une volonté de plus en plus affirmée de développer des substituts artificiels à chaque organe humain. Il ne s'agit plus seulement de redresser une colonne vertébrale mais de fabriquer des disques vertébraux, des muscles, des tendons ... La montée en puissance de cette volonté a propulsé la BioIngénierie au niveau des autres disciplines de génie, génie civil, mécanique etc ..., et a donné naissance à des départements de BioIngénierie. Mon impression personnelle est qu'aux Etats-Unis les ressources, financières et donc en matérielles et humaines, de la BioIngénierie, au sens large, ont connu une croissance bien plus importante que celles des autres disciplines d'ingénierie.

Mon propos est de montrer à l'aide d'exemples que la mécanique a un rôle à jouer dans cette saga. Et par mécanique j'entends les aspects traditionnels de la résistance des matériaux, de l'hydraulique, de l'élasticité mais aussi la mécanique des milieux continus, des milieux hétérogènes, des milieux poreux multiphasiques et *déformables* qui sont le siège de phénomènes couplés incluant des réactions chimiques, des transports et des transferts de masse, des interactions électriques dues à la présence d'ions et de macromolécules chargées. Il s'agit d'une perspective dans laquelle les outils de la modélisation et les outils de simulations numériques ne demandent qu'à se développer et qu'à montrer toutes leurs richesses. On trouvera dans les références [3] et [4] des mises en oeuvre de cette démarche, allant du phénomène physique à la modélisation et à la simulation de cas particuliers simplifiés.

De la Biomécanique à la BioIngénierie. L'expérience montre que les tissus humains mous (peau, cartilage, disque intervertébral, muscle) s'adaptent aux sollicitations

purement mécaniques en modifiant leur structure et leur forme. La biomécanique classique s'est attachée à modéliser les effets sur ces tissus et sur le squelette des chargements quotidiens, exceptionnels dûs à une pratique sportive, ou traumatiques. Elle a donc été amenée à proposer des solutions lors de fonctionnements anormaux (scoliose) ou accidentels. Mais comprendre, modéliser et simuler le comportement du cartilage, ou de la peau, fait appel à plus que la mécanique des milieux solides: le cartilage est un milieu poreux saturé par un électrolyte qui gonfle, ou se rétracte, sous les effets combinés de charges mécaniques et son comportement, très semblable à celui des argiles chimiquement sensibles, résulte d'interactions électro-chimio-mécaniques.

Les dysfonctionnements du système musculo-squeletal peuvent avoir des origines autres que traumatiques, par exemple génétiques, hormonales, ou une inadéquate transmission des forces pour l'arthrose, ou simplement être dûs à l'âge. Quelle que soit la cause de l'endommagement, il est parfois nécessaire d'extraire la zone endommagée. Par quoi la remplacer? Une solution consiste à fabriquer des tissus, ou des parties de tissus.

On pourrait penser que la mécanique est exclue de ces processus de fabrication, qui seraient réservés au biochimiste, au génie chimique et au chirurgien. On s'est rendu compte dans la dernière décennie qu'il n'en est rien. En effet, les sollicitations mécaniques, d'intensité modérée, sont nécessaires pour la différenciation cellulaire et la prolifération des tissus. Trop violentes, elles peuvent endommager les tissus et inhiber leur développement ou renouvellement.

Le terme **mécanobiologie** a été forgé pour bien mettre en évidence le fait qu'un certain nombre de processus biologiques, à différentes échelles, sont sensibles aux contraintes mécaniques ou aux déformations. La mécanobiologie est une réalité par exemple en orthopédie lors la croissance osseuse, mais aussi en cardiologie au travers des transports ioniques dans les myocytes.

## Les aspects industriels

Les résultats de la BioIngénierie affectent la pratique médicale et ont pour but d'améliorer la qualité de vie des patients. Par exemple, la BioIngénierie Electrique a créé le stimulateur cardiaque: depuis les années 60, cet appareil n'a cessé de perfectionner son adaptabilité et sa réactivité au rythme naturel du coeur, son inocuité vis-à-vis du corps humain et sa miniaturisation. A une échelle nettement plus petite, certains ont conçu des usines médicales nanoscopiques, comme les respiocytes (globules rouges artificiels), transporteurs de l'oxygène et de dioxyde de carbone. Mais revenons aux aspects mécaniques.

La mécanique cardiaque. L'espoir de fabriquer des appareils destinés à la cardiologie (défibrillateurs, valves) et des coeurs artificiels a conduit à s'intéresser aux aspects mécaniques du muscle cardiaque, ce formidable moteur qui fait fonctionner le système cardiovasculaire. Quoique doué d'une certaine automie par le pacemaker naturel qu'est le noeud sinusal, le coeur subit cependant les injonctions du système nerveux central. La diffusion spatio-temporelle du signal électrique donne lieu à la

contraction musculaire optimisée par une structure fibreuse dont la subtile conformation n'est cependant pas encore bien comprise: la morphogénèse des tissus, à ma connaissance, en est à ses balbutiements.

Le couplage électro-mécanique est en fait médié par la chimie, et à long terme, par le métabolisme. Mais le couplage inverse, dit réaction mécano-électrique, existe aussi comme le montrent, ou tendent à le montrer, l'existence de canaux ioniques sensibles à la déformation, et le commotio cordis qui, chez les sujets jeunes, peut se traduire par un arrêt cardiaque sans dommage musculaire apparent. L'arrêt cardiaque par hypoxie ou anoxie entraîne au contraire un endommagement local du muscle, qui est quelquefois fatal: on tente actuellement de remplacer les tissus lésés grâce au génie tissulaire.

Le génie tissulaire. Les tissus adultes ne se régénèrent pas spontanément. La cicatrisation n'est jamais qu'un pis-aller: elle s'accompagne d'une contraction qui probablement empêche la régénération. Le principe général de la fabrication de tissus artificiels est le suivant. Des cellules mésenchymales, ou prises à un stade peu avancé de différenciation, sont prélevées sur un individu. Elles sont disposées sur un support polymérique poreux tridimensionnel et cultivées dans un bioréacteur dans lequel les paramètres physico-chimiques (teneur en oxygène etc ...) et les sollicitations mécaniques sont contrôlés. Une fois le tissu arrivé à maturité, il est implanté.

La fabrication de tissus biologiques artificiels, tels que peau, vaisseau, cartilage, os, tendon, muscle cardiaque, suscite de grands espoirs de succès pour les prochaines décennies. La Biomedical Engineering Society prévoit un chiffre d'affaires annuel de l'ordre 80 milliards \$US pour la première décennie 2000. Cette fabrication nécessite la collaboration de biologistes, biochimistes, d'ingénieurs chimistes et mécaniciens. Pour chaque tissu existe un grand nombre de méthodes potentielles, avec de nombreuses variantes. On a ainsi remarqué que la quantité de tissu fournie par les cultures in vitro est plus importante pour des supports polymériques tridimensionnels ouverts que pour des cultures monocouches. De plus, les cellules de base (chondrocytes pour le cartilage) ont une différenciation sensible aux contraintes mécaniques. En effet, bien que les recherches en soient encore aux tâtonnements, il semble que la qualité mécanique du cartilage obtenu dépende de l'intensité, de l'amplitude et de la fréquence de sollicitations mécaniques. Cela est naturel dans la mesure où l'on sait bien qu'une immobilisation prolongée (absence de sollicitations mécaniques d'intensité physiologique) fragilise le cartilage, les os et les muscles et s'accompagne d'une diminution de leur masse. Une raison pourrait être que les déformations induites modifient des organelles qui interviennent dans le processus de reproduction (appareil de Golgi) et en conséquence leur activité mitotique. Une autre possibilité serait que les sollicitations mécaniques induisent le transport du fluide électrolytique synovial riche en facteurs de croissance. Au contraire, l'absence de sollicitations mécaniques diminuerait l'intensité de ce transport et priverait donc les chondrocytes de facteurs de croissance. Le cartilage est en effet un milieu poreux hautement déformable, sujet à gonflement car contenant des charges négatives fixes, imbibé par

un fluide électrolytique qui transporte également des macromolécules: un challenge pour le mécanicien!

Le problème de cultures *in vitro* comporte donc de multiples facettes: génétique dans le choix des cellules initiales (cellules mésenchymales ou différenciées), biochimique (choix du support polymérique, composition du milieu, contrôle en oxygène), et mécaniques (amplitude et fréquence des sollicitations mécaniques, transport des divers composants). A quoi s'ajoutent des considérations pratiques comme l'optimisation de la taille et de la forme des pièces obtenues: taille et forme doivent en effet permettre la circulation du milieu physiologique en tout point lors de la croissance: deux challenges supplémentaires pour la simulation numérique puisqu'il s'agit d'un problème avec contraintes résiduelles et à frontières libres.

Les bioréacteurs doivent donc être capables de contrôler l'état mécanique de contrainte et déformation des cultures.

Les difficultés ne sont pas terminées même lorsque l'on a obtenu un cartilage de bonne qualité. Encore faut-il le substituer au tissu endommagé et assurer une bonne adhésion avec le cartilage sain.

Les muscles artificiels. Le génie chimique est capable de produire des matériaux polymériques électroactifs. Le mécanicien utilise ces matériaux pour former des systèmes micro-électro-mécaniques, des structures intelligentes et des muscles artificiels. Les japonais commencent à commercialiser ces produits.

Le principe de fonctionnement est le suivant. Une plaque constituée par un polymère ionique, chargé négativement et neutralisé par des cations mobiles, est couverte de sels métalliques nobles sur ses deux faces. Soumise à un champ électrique suivant son épaisseur, ou hydratée, la plaque fléchit. Réciproquement, une différence de potentiel est créée par une flexion. Contrairement aux matériaux traditionnels, la diffusion ionique et les effets de l'hydratation jouent des rôles essentiels dans les propriétés biomécaniques et biomimétiques de ces polymères ioniques, qui sont en quelque sorte capables de convertir de l'énergie chimique en énergie mécanique.

Les applications vont des domaines industriels classiques où ils seront utilisés comme senseurs et capteurs, à la robotique médicale où des projets les utilisent comme doigts d'une main artificielle. Des améliorations sont nécessaires en vue d'accélérer leur temps de réponse (1-10 s) qui est encore bien supérieur à celui des muscles squeletaux (0.001-0.01 s).

Les biomatériaux: l'exemple de l'arthroplastie de la hanche. Le remplacement total de la hanche est un exemple dans lequel plusieurs disciplines de l'ingénieur, la mécanique, la tribologie et le génie des matériaux, s'allient au service de la médecine. Il exige une technique opératoire aseptique, une lubrification optimale de la tête de prothèse et une fixation de la prothèse dans l'os. Cette procédure chirurgicale ne cesse de se répandre au vu du vieillissement de la population. Aux Etats-Unis, elle est pratiquée sur plusieurs centaines de milliers de personnes chaque année. L'opération consiste à remplacer la tête du fémur et le logement du pelvis par une prothèse en deux parties emboîtées. La forme de la tête de prothèse influe con-

sidérablement sur les contraintes engendrées et elle est d'une importance capitale pour le confort du patient et la pérennité de l'opération. Seule une étude mécanique, couplée à une analyse par éléments finis tridimensionnels, est à même d'optimiser cette forme et de s'assurer que les concentrations de contraintes auxquelles elle est soumise n'entraîne pas sa rupture, lorsqu'elle est en céramique. Minimiser les frottements articulaires a mené à remplacer les surfaces en Téflon par des polyéthylènes capables de résister à l'érosion du cotyle. D'autres problèmes d'interface se posent pour sceller la prothèse fémorale à l'os: ils demandent des efforts conjoints de la mécanique pour homogénéiser au mieux les efforts, et pour utiliser les subtilités du comportement des matériaux vivants en vue d'assurer une fixation pérenne.

Un chiffre pour montrer le dynamisme de la recherche dans le domaine des biomatériaux: 2000 papiers seront présentés au 7ième Congrès Mondial Biomateriaux qui doit avoir lieu en 2004 à Sydney.

Les polymères pour distribuer les médicaments. La prise de médicaments s'accompagne fréquemment d'une brusque activation d'une forte toxicité: cette façon de faire est non seulement peu efficace mais elle peut également être dangereuse. L'industrie pharmaceutique ne travaille donc pas seulement sur la molécule elle-même, mais également sur la façon de la distribuer. Le problème est de doser en temps et de cibler dans le corps la concentration des médicaments. L'idée est d'emballer la substance active dans un réseau polymérique de gel déhydraté. Tout corps vivant contient une forte proportion d'eau, dans laquelle sont dissous divers ions. Une fois ingéré, le gel doit s'hydrater et gonfler. Le médicament est libéré lorsque le réseau polymérique devient suffisamment lâche. Une bonne distribution du médicament doit donc contrôler sa diffusion dans le corps et le gonflement du polymère d'enrobage. Une possibilité consiste à activer l'hydratation par stimuli extérieurs localisés, par exemple avec des polymères thermosensibles.

Le gonflement des gels biologiques suit le principe osmotique présent dans la plupart des exemples donnés jusqu'à présent, mais chaque cas correspond à des conditions électriques (nature des charges, valences des ions, champ électrique, ...), chimiques (type d'ions, concentrations, pH) et mécaniques (déformations, contraintes, pressions) particulières. Les glycosaminoglycanes hydrophiles sont les moteurs du gonflement, ou de la contraction. La nature du réseau polymérique intervient aussi. Les fibres de collagène du cartilage articulaire sont fortement interconnectées pour éviter un gonflement excessif, alors que, dans la cornée, les interconnexions sont plus faibles de façon à permettre une transparence optimale.

## Un état des lieux contrasté

Les universités américaines ont créé des postes d'enseignants-chercheurs en Bio-Ingénierie Mécanique dès le début des années 1990. Ces postes étaient, et sont encore, répartis entre les départements *Mechanical Engineering* et *BioEngineering*. J'ai en tête deux universités, University of California San Diego et University of Washing-

ton, Seattle, dans chacune desquelles j'ai passé les mois de juillet et août 2001 et 2002.

Les activités biomécaniques de UC San Diego ont vu le jour dès 1965 sous l'impulsion de Y.C. Fung, et ce à l'intérieur du département Applied Mechanics and Engineering Science. Ces activités se sont diversifiées, et embrassent de nombreux aspects de la BioIngénierie telle que je l'ai décrite. Avec 13 professeurs (domaines d'activité: mécanique et métabolisme cardiaque, génie tissulaire, ... ), le groupe vient maintenant de former un département indépendant. Ses locaux ont été financés pour 26 M\$US par deux fondations, et l'université était, lors de la visite en 2001, à la recherche de 7 M\$US supplémentaires pour le meubler et l'équiper. Les liens directs du département sont forts avec la BioChimie, mais plus ténus avec la Médecine. La création de ce département de BioIngénierie n'empêche pas les activités à visée médicale plus ou moins directe de se développer dans le département de Mechanical Engineering (muscles artificiels, écoulements vasculaires).

La collaboration entre les sciences du vivant, l'ingénierie et la clinique est une tradition déjà ancienne à l'University of Washington, Seattle. Le centre est impressionnant par la taille et la compétence de ses personnels (plusieurs prix Nobel). La personne que j'ai visitée est un professeur dans le département et a une formation initiale de médecin radiologiste. Il travaille sur le système cardiovasculaire et le métabolisme du muscle cardiaque. Le département de BioIngénierie qui compte trente professeurs va s'installer dans ses propres locaux financés par la Whitaker Foundation et la Gates Foundation pour 70 M\$US. Les ressources de ce département, comme de tous les départements universitaires que j'ai visités aux US, sont à 90% publics ou dûs à des fondations, National Institute of Health, NSF au travers du programme *Mechanics of the physical-biological interface*, US Army, US AirForce ... Pour l'University of Washington Seattle, se reporter à <http://depts.washington.edu/bioe/factsheet.shtml>. La présence en un seul lieu de spécialistes de nombreux aspects de BioIngénierie intéresse la NASA qui, dans l'optique des futurs voyages sur Mars, doit avoir des réponses à la question suivante: quels exercices physiques pourront maintenir en condition les systèmes musculo-squelettal (muscles striés, os, cartilage) et cardiovasculaire mis en hibernation par l'absence prolongée de pesanteur?

Certainement, une source de financement privée des plus notables pour la BioIngénierie est depuis 1991 la Whitaker Foundation. Elle a distribué des subventions de recherche individuelles, ainsi que pour des programmes d'enseignement, et des conférences. La taille typique des subventions par accordées aux chercheurs est 250 000 US\$. De 1991 to 2002, la Fondation a distribué 700 millions US\$ pour la recherche et l'éducation en Ingénierie BioMécanique, ce qui a permis de lancer sur le marché plus 200 produits et de créer, ou contribuer à créer 38 nouveaux départements d'Ingénierie BioMécanique. D'autres fondations, Burroughs Wellcome Fund, Howard Hughes Medical Institute, W.M. Keck Foundation, subventionnent plutôt des programmes éducatifs et des universités que des chercheurs individuellement.

La National Science Foundation (NSF) subventionne des "centres de recherche de génie", dont en particulier le VaNTH Engineering Research Center constitué d'universitaires et d'industriels dont le but est d'aider à la réflexion sur les méthodes, les thèmes, et les moyens d'enseignement en *bioengineering*. Le VaNTH regroupe en particulier des chercheurs des universités VanderBilt, Northwestern, Texas Austin et du programme Sciences de la Santé et Technologie commun à Harvard et au MIT.

Plus récemment, le Canada a beaucoup investi dans les biotechnologies au sens large. La recherche universitaire en génie tissulaire en particulier en a bénéficié.

En Europe, la BioIngénierie Mécanique est présente et bénéficie de ressources publiques conséquentes surtout dans les pays du Nord. Dans mes domaines d'intérêt, je peux citer les Pays-Bas (Universités d'Eindhoven, Twente ...), le Royaume Uni (Oxford, Cardiff ...), l'Irlande (Dublin), la Suisse (Lausanne ...), mais aussi l'Autriche (Graz). L'Italie a une également une tradition de BioIngénierie avec des centres actifs à Milano (Politecnico), Firenze, Ferrara. L'Espagne et le Portugal ont, semble-t-il, passé le pas. L'Instituto Superior Tecnico de Lisbonne propose, depuis deux ans, une série de cours communs à ses ingénieurs et aux étudiants en médecine.

Il existe en France quelques centres spécialisés en BioMécanique, orthopédie à l'Ensam Paris, à dominante mécanique des fluides à l'université de Technologie de Compiègne. L'activité est extrêmement restreinte dans mes domaines d'intérêt. Sur les quelques 500 articles de journaux que j'ai référencés sur les aspects couplages chimie-mécanique sur le cartilage et le muscle cardiaque, moins de 10 sont dûs à des auteurs français, et encore sont ils le fait, non de biomécaniciens, mais de biochimistes ou de biophysiciens.

## De la Chimio-Mécanique à la Mécano-Biologie

*Phénomènes Couplés.* On aura compris, à partir des exemples mentionnés ci-dessus, que les couplages électro-chimio-mécaniques jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement de nombreux phénomènes, de nombreux matériaux, organes et systèmes, comme le muscle cardiaque. Il est intéressant de noter que certains de ces phénomènes sont observés presque aux mêmes échelles dans les argiles. Cependant, le vivant possède une faculté essentielle, qui est de réagir activement aux sollicitations de tous types: le transport *actif* est possible grâce à l'ATP produit par le métabolisme. Il n'est donc pas étonnant que transformer une énergie chimique en une énergie mécanique soit un des objectifs assignés aux polymères électroactifs, ou aux milieux distributeurs de médicaments.

La BioIngénierie cherche également à comprendre, modéliser et contrôler les couplages inverses, de la mécanique vers la chimie, souvent via l'électricité. Ces couplages inverses sont à l'oeuvre dans le développement de nombreux tissus (os, cartilage) mais sont plus difficiles à caractériser. Ils sont l'objet d'efforts

d'expérimentation et de modélisation, et ils représentent l'une des voies par laquelle la mécanique agit sur le monde du vivant.

*De nouveaux territoires.* L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) présente de nombreux avantages par rapport à des techniques antérieures de diagnostics de tumeurs. Au contraire de la tomographie qui utilise les rayons X, l'IRM est basée sur des ondes radio qui sont sans danger pour les tissus biologiques. Elle délivre des informations sur le contenu en eau, et par là distingue tissus sains et tumeurs. Les développements récents des aimants ont permis d'améliorer la caractéristion de certaines propriétés physiques des tissus. Couplée à des vibrations mécaniques, l'IRM devrait également pouvoir être utilisée pour mesurer des propriétés visco-élastiques in vivo. Les premières applications visent à compléter les diagnostics par palpation (cancer du sein), des propriétés visco-élastiques anormales étant associés a priori à des lésions malignes. D'autres applications concernent l'orthopédie dans laquelle le fonctionnement des articulations doit pouvoir être visualisé charges mécaniques incluses (instabilité de la cheville). Au-delà des aspects oncologiques et orthopédiques, des mesures non-invasives in vivo des propriétés mécaniques permettraient de qualifier la pertinence des mesures in vitro, et d'améliorer les protocoles de collecte et de conservation des tissus, deux points fondamentaux dans une approche rationnelle de la modélisation du comportement des milieux biologiques.

## Un embryon de programme

Pour pouvoir démarrer, cette activité BioIngénierie Mécanique doit obtenir les soutiens locaux: Laboratoire Sols Solides Structures, Institut National Polytechnique de Grenoble, Université Joseph Fourier, puis régionaux (Région Rhône-Alpes) et national Ministère de la Recherche et CNRS.

Les financements initiaux doivent d'abord être dévolus à la recherche. Avec deux volets. L'un concernant des actions de recherche, sans lesquelles le reste n'est que du vent. L'autre concernant des initiatives locales pour organiser des séminaires et des mini-conférences dans des cadres déjà établis, de façon à faire un recensement des activités existantes, à en favoriser la divulgation et catalyser les contacts entre chercheurs des diverses disciplines qui interviennent en BioIngénierie.

Les projets d'enseignement peuvent être envisagés sous deux formes. Par inclusions dans des masters existants. Ou par échanges d'étudiants médecine/biologie/mécanique. Cela semble un casse-tête mais la chose n'est pas nouvelle et elle se pratique dans certains pays européens. Un tel enseignement serait certainement bénéfique pour tous. Actuellement, les notions de mécanique et de génie des matériaux enseignées à la faculté de médecine sont extrêmement ténues, et, à ma connaissance, se limitent grossièrement à la définition du module d'Young. C'est bien dommage, et très insuffisant, pour un grand nombre de spécialités médicales, chirurgicales et dentaires.

## References

- [1] Friedman M.H. (2001). Traditional Engineering in the Biological Century: The Biotraditional Engineer. J. of Biomechanical Engineering. Transactions of the ASME, **123**, 525-527.
- [2] Klenerman L. (2002). The evolution of orthopaedic surgery. The Royal Society of Medicine Press Ltd., London.
- [3] Chemo-Mechanical Couplings in Porous Media - Geomechanics and BioMechanics. Springer Verlag, B. Loret and J.M. Huyghe eds., sous presse.
- [4] Mechanics of Materials. Special Issue on Chemo-Mechanical Coupling Phenomena, **36**(5-6), 2004, B. Loret ed.
- [5] Site web consacré aux polymères électro-actifs:  
<http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/EAP-web.htm>
- [6] Site web de la Whitaker Foundation <http://www.whitaker.org>

## Quelques revues scientifiques de BioIngénierie Mécanique

(Le symbole indique une revue dans laquelle le thème a une importance majeure)

Annual Review of Biomedical Engineering\*  
 Annals of Biomedical Engineering\*  
 Annals of Rheumatic Diseases  
 Arthritis and Rheumatism  
 Biochimica et Biophysica Acta  
 Biotechnology and Bioengineering\*  
 Biomaterials\*  
 Biophysical Chemistry  
 Biophysical J.  
 Biopolymers  
 Biorheology\*  
 Biotechnology Techniques  
 Biomechanics and Modeling in Mechanobiology\*  
 Connecting Tissue Research  
 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering  
 Circulation Research  
 International J. of Solids and Structures  
 J. of Biomechanical Engineering. Transactions of the ASME\*  
 J. of Biomechanics\*  
 J. of Bone and Joint Surgery  
 J. of Muscle Research and Cell Motility  
 J. of Orthopaedic Research\*  
 Mechanics of Materials  
 Osteoarthritis and Cartilage  
 Progress in Biophysics and Molecular Biology  
 Physiological Reviews

---

Benjamin LORET, Professeur  
 Laboratoire Sols, Solides, Structures  
 Domaine Universitaire  
 BP. 53X , 38041 Grenoble Cedex, France

Tél : 04 76 82 52 98 / 96 Int'l: 33 4 76 82 52 98  
 Fax : 04 76 82 70 00 Int'l: 33 4 76 82 70 00  
 E-mail : Benjamin.Loret@hmg.inpg.fr  
<http://geo.hmg.inpg.fr/loret/lorethp.html>

---