

Les paradoxes du couple céramique d'alumine sur céramique d'alumine des prothèses totales de hanche : Frottement, vibrations, fracture, squeaking et problèmes biomécaniques. Plaidoyer pour une analyse scientifique pluridisciplinaire

Ceramic on Ceramic Bearings in Total Hip Arthroplasty Paradoxes: Friction, Vibrations, Squeaking, Fracture

Patrick Chaboche

Ancien chef de service de chirurgie orthopédique de l'Hôpital de Cornouaille 29000 Quimper.

Résumé

Introduction : le but de cette analyse est d'apporter des explications plausibles les deux complications majeures, fracture et squeaking de ces couples et d'en comprendre la signification exacte.

Matériel et méthodes : nous avons comparés les résultats cliniques et données expérimentales, déjà connues dans notre domaine chirurgical et en industries, aux sciences physiques et mécaniques pour expliquer le comportement au niveau macro, micro et nanoscopique ainsi que leurs paradoxes.

Résultats : les instabilités mécaniques sont le facteur le plus pertinent pour comprendre les faits rencontrés. Dans notre domaine elles correspondent macroscopiquement à un choc au contact du à des excentrations macroscopiques mécaniques et dynamiques déjà bien connues. Au sens large (en sciences physiques) un choc mécanique à également lieu lorsqu'une force, une position, une vitesse ou une accélération est brusquement modifiée. Au niveau microscopique la reprise de contact normal se fait sur une très faible surface où la lubrification chassée est donc absente d'où des contraintes très élevées. L'impact au contact est suivi de frottement de type adhérence -glissement (stick-slip). C'est ce phénomène de stick-slip qui est responsable parfois de squeaking. En analyse thermodynamique et de diffusion d'énergie, lorsqu'un système reçoit plus d'énergie qu'il ne peut en diffuser localement, il devient instable. Au niveau nanoscopique et de l'atome, de l'énergie thermique apparaît (premier et deuxième principe). Cette énergie se diffuse vers la surface des composants céramiques qui ne déforment pas et crée des bandes d'usure où une partie de l'énergie peut s'accumuler puis conduire à la fracture. Une autre partie se diffuse sous forme d'une onde de vibration auto entretenue qui se poursuit vers les connexions et les parties métalliques. Ces vibrations issues du couple principal s'associent aux contraintes et instabilités elles-mêmes issues au niveau des cols modulaires ou de la jonction col tête. Un fretting peut apparaître avec une usure puis une fracture de la céramique ou de la connexion (col modulaire). Ces connexions sont autant de couples mécaniques « accessoires » qui peuvent compromettent le couple principal. Au niveau fémoral la fréquence propre de vibration du métal peut correspondre à la fréquence de cette onde. Le squeaking est alors cette onde extériorisée du couplage de deux ondes auto entretenues qui diffusent probablement suivant un phénomène non linéaire.

Discussion : cette analyse a permis de coordonner les différents niveaux d'échelle dans une vision globale qui seule peut permettre une complète compréhension face au contact et au frottement.

Conclusion : les qualités actuelles des céramiques d'alumine quasi pure ou renforcées et l'excellente qualité de fabrication ont permis de vaincre en grande partie le seuil de rupture sous réserve de connexions associées parfaites. Par contre le squeaking peut persister car il est dû à des instabilités mécaniques favorisées notamment par les excentrations dynamiques. La compréhension totale dépendra de notre analyse à tous les niveaux d'échelle et de celle des phénomènes non linéaires.

Mots clés

- ◆ Couple de frottement céramique sur céramique
- ◆ Prothèse totale de hanche
- ◆ Friction vibration
- ◆ Craquement
- ◆ Biotribologie
- ◆ Diffusion énergétique
- ◆ Phénomène non-équilibré et non-linéaire

Abstract

Ceramic on ceramic bearing in Total Hip Arthroplasty (THA) is a favored choice in younger and active patients. Squeaking and fracture are speculated to be related to material properties. How to understand this phenomenon? Firstly we analyze the chemical molecule then the biomechanical and thermo dynamical behavior.

Alumina molecule is Al_2O_3 pure or Alumina toughened Zirconia. It explains the tribology: hardness and perfect polishing, no chemical and biological reaction, no ion emission, excellent thermal conductivity and lubrication. Adverse effect is: poor ductility and no deformation with friction-vibration, stick-slip phenomenon, squeaking and fracture. Tribology qualities are in balance with fragility and instability: It is the first paradox.

Friction induced vibration system (coupling mode) and wear are limited in standard conditions, meaning concentric sliding with lubrication and a close equilibrium system. But THA is not a steady state mechanical system. Eccentric loading can occur randomly because microseparation between head and insert, impingement, edge loading and tensile stress. Consequences are 40 to 80 higher mechanical stresses than in standard conditions. This mechanical unstable system creates strip wear and vibrations into the new small area contact without lubrication, because shock then stick-slip phenomenon before a concentric loading again. A thermo dynamical analysis focuses on the fluctuation-diffusion phenomenon and the balance between kinetic energy and the opposite energy generated by friction. Here friction is entropy and is to diffuse into the system. When this system is unstable and far from disequilibrium (eccentric loading), wear and vibrations are the larger ways to diffuse. Wear is a surface change then energy could be stocked in the fissures as a stored energy then crack propagation. Whereas vibrations and lock- in frequencies fusion could be diffuse outside and sometimes as squeaking and exteriorized energy like a nonlinear system. This duality between stripe wear as stored energy and vibrations as exteriorized energy is the second paradox.

THA is a global mechanical system with metal connexions between ceramic head and taper of the femoral stem and sometimes an intermediate neck. Ceramic insert is linked into a metal cup. From ceramic on ceramic loading friction far from disequilibrium, vibrations and waves spread to metal connexions and mix themselves with mechanical stress created by movement and realize a fretting-corrosion and crevice -corrosion with metal debris and biological reactions. Stem femoral vibrations can create a squeaking when frequencies are similar to metal frequency vibrations. Thus ceramic on ceramic bearing and friction moment can be compromised by the metal links and their locking mechanisms: it is the third paradox.

Moreover that mechanical system interacts with the biological system, patient activity and behavior. The surgeon operation (positioning and choice) and manufacturing companies are another concern. Finally this complex system should be analyzed in totality.

Keywords

- ◆ Ceramics bearings in total hip arthroplasty
- ◆ Friction vibration
- ◆ Squeaking
- ◆ Fracture
- ◆ Biotribology
- ◆ Energy diffusion
- ◆ Non equilibrium and nonlinear phenomenon

Les couples de frottement céramique sur céramique des prothèses totales de hanche sont un choix privilégié chez les patients jeunes et actifs. Leurs fortes tolérances biologiques et leur qualité tribologique ont permis des résultats très satisfaisants à long terme. A contrario ils peuvent induire très rarement un squeaking et surtout une rupture dramatique de la tête ou de l'insert. Comment analyser ces phénomènes ? La céramique d'alumine est constituée de liaisons chimiques covalentes et ioniques entre les atomes qui sont beaucoup plus fortes que dans le métal. Ceci explique les propriétés de dureté, de forte résistance à la compression, la quasi-absence de réactions chimiques ou biologiques et d'émission d'ions métalliques. L'absence d'électrons libres conditionne aussi l'excellente conductivité de la chaleur et de l'électricité vers les composants au contact (métal). Par contre ces mêmes liaisons expliquent l'absence de déformation (ductilité) et la très faible résistance en tension.

La particularité des couples céramique sur céramique est également d'extérioriser une onde parfois audible sous forme de squeaking au cours de frottement (1 à 10 % des cas). Ce son audible par l'oreille humaine est comme tous les sons, une vibration dans les fréquences entre 20 et 20 000 Hz. En fait pratiquement tout frottement peut entraîner une vibration et une onde (1). Ceci est connu depuis longtemps en milieu industriel des transports par exemple. L'analyse des vibrations induites par un frottement des couples céramique d'alumine sur céramique d'alumine des prothèses de hanche a déjà été faite expérimentalement par l'équipe de l'Institut de mécanique de l'université de Hambourg : (Weiss, Morlock, Hoffmann) et sont tout à fait comparable aux résultats connus des autres milieux industriels (Y. Berthier INSA Lyon) (2). Au frottement créé au cours du mouvement doit être également associé le mécanisme de choc au contact sous la charge qui peut engendrer une onde de choc. L'association choc-frottement est en fait peu dissociable au cours du mouvement macro et microscopique.

L'analyse de ces phénomènes biomécaniques doit permettre de répondre à plusieurs questions :

- Quelles sont les conséquences possibles pour nos prothèses :
 - majoration du risque de fracture ? (têtes et insert)
 - de fretting-corrosion ?
 - de réactions tissulaires adverses ?
 - d'usure ?
 - quels modes de fabrication, de dessin et de positionnement des prothèses articulaires sont nécessaires ?
- Quelle est l'origine initiale de ces ondes et vibrations ? Nous verrons que le squeaking lui-même et le risque de fracture sont les conséquences thermodynamique et mécanique des phénomènes de fluctuation- diffusion de l'énergie et d'instabilité (au sens auxquels les physiciens l'entendent et non pas seulement de l'instabilité connue des chirurgiens orthopédistes).

Analyse mécanique : l'ensemble des prothèses articulaires doit en fait s'analyser comme un système dynamique global à la fois mécanique et biologique

Un système est un ensemble de paramètres et de phénomènes qui sont liés les uns aux autres et constituent un réseau d'actions mutuelles. Ce système est dynamique car évolutif au cours du temps à court terme comme à long terme. L'analyse *in vivo* est difficile en raison du grand nombre de variables, de leurs interdépendances et de la survenue possible de phénomènes aléatoires. Bergmann et son équipe nous ont apporté des éléments importants notamment sur les contraintes subies et l'augmentation de température au frottement [8]. Néanmoins l'interdépendance et les phénomènes aléatoires ne sont pas pris en compte sur un grand nombre de cas et sur un temps long de plus de dix ans. Il faut donc faire une analyse en appliquant les données connues en science mécanique à partir des résultats obtenus des équipes étudiant la tribologie et l'usure de nos prothèses en laboratoire mais aussi en milieu industriel. La confrontation de toutes ces données et nos résultats cliniques permettent d'avancer des hypothèses plausibles du fonctionnement des couples céramiques d'alumine sur céramique d'alumine. Cette analyse mécanique est d'autant plus importante concernant ces couples qu'il n'y a pas ou très peu de réactions électrochimiques et biologiques significatives cliniquement. Les échecs, si l'on ne tient compte que du couple principal céramique sur céramique d'alumine, sont donc essentiellement des échecs de type mécanique.

Le mode de frottement d'une hanche prothétique est un glissement. Ce glissement entre tête et cotyle peut être régulier, stable, bien centré avec peu de frottement et donc peu d'usure. Par contre un régime de frottement et de choc irrégulier peut créer des phénomènes d'instabilité survenant dans des circonstances particulières et de façon aléatoire au cours de cycles de fonctionnement très long (3) :

- Micro séparation (2 à 3mm voir plus) en phase de non appui avec une excentration de la tête dans le cotyle. A la reprise de l'appui la tête revient au contact du cotyle sur une petite surface avant le recentrage ;
- L'effet de came, une subluxation ou luxation puis réduction sont également des excentrations et reprise de contact.

Après ce mécanisme de choc ou d'impact au contact, le frottement associera une phase de frottement statique (la force tangentielle est appliquée mais sans création de mouvement macroscopique) puis dynamique avec un glissement et un déplacement. Il est très probable que la lubrification se modifie également, d'un type élastohydrodynamique à un frottement pratiquement sec. Le frottement local au contact devient alors très important. Expérimentalement on a pu montrer qu'une micro séparation de deux millimètres par exemple peut créer une force d'impact quarante à quatre-vingt fois supérieure à un frottement régulier et continu (4). La répétition de ce phénomène crée un phénomène d'adhérence-glissement (stick-slip) voir d'adhérence-glissement-séparation (de l'ordre du micron) générant des phénomènes vibratoires majeurs et une onde qui peut parfois créer un squeaking si elle est dans les fréquences audibles.

Ces mécanismes sont bien connus et facilement compréhensibles, mais la notion de choc et d'instabilité en science mécanique correspond non seulement à une perte (ou une absence) puis une reprise de contact direct; mais aussi à une force, une position, une vitesse ou une accélération lorsqu'elle est brusquement modifiée. Ceci est souvent le cas d'un sujet actif où l'activité peut-être cinq fois plus élevée qu'un sujet âgé. Si l'on rajoute à ceci la rapidité du mouvement, son amplitude, le changement de position, de direction ou la prise de charge, il va se créer des régimes de glissement transitoires instables et très irréguliers. Un mauvais positionnement des implants ou inadapté au patient peut évidemment majorer ces phénomènes (5).

À noter que ces glissements-frottements irréguliers et ces instabilités vont s'aggraver avec le temps par une modification de la surface de contact : les bandes d'usure constatées sur les têtes fémorales retirées en sont le témoignage. Rappelons, qu'il n'y a pratiquement pas de rodage des surfaces en céramique d'alumine sur céramique d'alumine. Ce matériau est très dur,

pratiquement pas déformable (au niveau macro et microscopique). Il n'y aura donc pas de possibilité de réorienter les forces au contact vers l'élasticité du matériau. A contrario, il n'y aura pas d'« excentration d'usure » (perte de sphéricité) comme avec le polyéthylène classique qui génère une nouvelle instabilité et aggrave cette usure. La réponse aux contraintes, que ce soit du au choc au contact ou au frottement après excentration, sera fortement vibratoire et sous forme d'usure très particulière en bandes qui ne modifie pratiquement pas la sphéricité de la tête ou la concavité de l'insert. La lubrification ou son absence, par contre joue un rôle important, or la céramique d'alumine a une grande adsorption (mouillabilité) d'ou un frottement faible si la lubrification existe. Par contre au cours d'excentration dynamique importante sans lubrification, une partie des ondes ne pourra pas se propager dans l'interface, entre tête et cotyle. La perte ou la modification de cette lubrification associée à la très faible surface d'appui au contact est donc un élément majeur dans la création de ces vibrations importantes et instabilités. L'état de surface (bandes d'usure), l'interface et leurs modifications au cours du temps vont ainsi jouer un rôle clé dans la propagation de l'onde suite à la distribution des contraintes. L'ensemble du système va à son tour émettre une réponse vibratoire qui va interférer avec la nouvelle onde créée au contact suivant, d'où une forme d'auto excitation en feed-back (2). La fusion de ces ondes en une nouvelle onde autoentretenu se diffusera vers l'extérieur sans pratiquement être déformée probablement suivant un phénomène non linéaire. Il peut ainsi se créer une résonance proche de la fréquence propre de vibration des parties métalliques adjacentes : cotyle et son métal back et surtout la tige fémorale (6,7). Très exceptionnellement l'association choc et vibration peut conduire à une fracture lorsque le seuil de résistance face à la propagation de la contrainte de rupture est dépassé. C'est le premier paradoxe : les propriétés mécaniques et physico-chimiques de la céramique d'alumine sont directement responsables des complications spectaculaires connues que sont la fracture et le squeaking. Par contre ces propriétés tribologiques, la quasi absence de réaction chimique et biologique limite considérablement l'usure réactionnelle et l'ostéolyse.

L'analyse doit également tenir compte de l'ensemble du système. La céramique d'alumine est le matériau au contact. C'est le couple de frottement comme nous l'entendons habituellement, mais il existe d'autres couples de frottement possible au sens mécanique : le cotyle a un métal back en titane et la tête est liée au cône morse de la tige fémorale. Une pièce modulaire intermédiaire également en titane ou surtout en alliage de chrome cobalt rajoute parfois une liaison entre tête et prothèse fémorale. Ce cotyle est implanté dans l'os du bassin, alors que la prothèse fémorale est dans le fémur, directement au contact ou par liaison avec le ciment directement ou par l'intermédiaire d'un fluide (tige Exeter). Au cours du temps, dans le cas de prothèses non cimentées, la tige et le métal-back du cotyle sans ciment seront intégrées à l'os qui les colonise en créant une liaison continue os-métal. Les vibrations et les ondes qui naissent au premier contact du couple céramique d'alumine sur céramique vont se propager aux structures métalliques qui vibrent à leur tour. Le métal est un peu déformable en réponse à une sollicitation mécanique et/ou vibratoire (analyse expérimentale). Il peut ainsi vibrer mais aussi légèrement se déformer et ajouter un risque de conflit avec l'insert céramique ou la tête. La déformation dépend en fait du dessin et de l'épaisseur du cotyle. La propagation de l'onde se poursuivra directement à l'os du côté du cotyle ou au ciment, s'il existe ou au film intermédiaire), puis aux structures osseuses. Du côté fémoral, une onde pourra même s'extérioriser à travers les parties molles et parfois être audible réalisant ainsi le squeaking.

C'est donc bien tout le système mécanique et biologique qui intervient dans toute sa complexité d'autant que ses paramètres évoluent avec le temps. Les structures osseuses voir capsuloligamentaires pourront s'adapter si les conditions mécanique et physiologique le permettent. L'os à la périphérie du cotyle pourra ainsi se modifier comme on le voit souvent au cours de la surveillance radiologique. Cette adaptation de l'environnement biologique et notamment de l'os face à l'implantation d'une prothèse permet au système biomécanique de s'adapter à un profond et considérable changement de l'anatomophysiologie habituelle. Inversement, une mauvaise adaptation conduira à un échec.

Par ailleurs, il faut savoir, que si un mouvement comme la marche ou tout mouvement rapide et répété dans certaines conditions d'amplitude peut engendrer une onde, l'inverse est possible: une onde peut générer un mouvement au niveau des liaisons mécaniques (les connexions) sur une très courte distance (quelques microns) et générer un fretting-corrosion et des modifications physico chimiques locales complexes. Ce fretting-corrosion (et les réactions locales associées) peut créer les conditions mécaniques et physico chimiques qui conduisent à l'usure et libération de particules métalliques voir à la rupture de matériel métallique, de façon isolée ou associée aux autres contraintes aux mouvements. Ceci pourrait expliquer les ruptures des inserts en céramique à partir de fissures et déformation des parties métalliques (parfois vu uniquement au cours de reprise chirurgicale) ou les ruptures de têtes sur des cônes remaniés (9). Ce fretting (terme générique pris au sens large car les phénomènes sont complexes) peut également expliquer en partie les ruptures de certaines pièces intermédiaires modulaires ou des prothèses fémorales dans leur partie haute et les réactions adverses aux particules d'usures métalliques. La technique de fabrication, le type de matériau choisi et l'assemblage seront donc essentiels que ce soit la fabrication de la céramique d'alumine, les liaisons entre l'insert et le cotyle métallique (notamment l'angle du cône et le dessin) ou du côté fémoral la liaison entre le cône et la tête ou des pièces intermédiaires modulaires (10,11). Au couple classique tête-cotyle doit donc être associé tous les autres couples correspondant à toutes les liaisons mécaniques et biomécaniques ainsi que leur comportement mécanique, physico-chimique et biologique au cours de l'évolution. Par ailleurs puisque la jonction taille de la tête fémorale et taille du cône peut être une source de frottement, leurs diamètres respectifs est important. Une tête de grande taille (supérieur à 36 mm) sur un cône créé aussi pour une tête de 28 ou 32 mm va créer un couple mécanique et des contraintes plus importantes.

L'analyse des fréquences d'ondes émises par le système va ainsi varier en fonction du type de frottement. Le classique, mais rare squeaking correspond par exemple aux fréquences de vibration de certains métaux, mais il peut également être légèrement amorti (ou amplifié) par les tissus environnants ou même le ciment s'il existe et donc être inaudible. Ceci explique la légère différence entre les fréquences enregistrées en laboratoires au cours d'expérimentations et *in vivo* de l'ordre de 2500 Hz (7). L'analyse de ces fréquences de ce son émis montre néanmoins qu'il est proche de la fréquence de vibration du métal, notamment côté fémoral. La fréquence propre de vibration du titane est d'environ 1500 Hz alors que celle de la céramique d'alumine est de l'ordre de 20 KHz ou plus (12).

Le mode d'analyse mécanique va également varié. Un frottement relativement régulier, en milieu lubrifié et qui reste proche de cet équilibre sera plus facilement de type linéaire. Les instabilités majeures loin de l'équilibre seront probablement non linéaires, d'où une modélisation beaucoup plus difficile. La notion de seuil de déséquilibre et de déstabilisation sera ainsi un élément majeur à analyser et rechercher. Nous avons vu la complexité de la réponse du système face aux sollicitations extérieurs surtout chez les actifs où l'activité parfois en sur contraintes est plus aléatoire que prévisible et évolutive avec le temps. Il existe également des ondes induites par le choc au contact. Celles-ci diffusent plus localement que les ondes dues au frottement. Ces différents types d'ondes interfèrent entre elles. Cette fusion d'ondes est possible d'autant que les deux corps en frottement : céramique sur céramique sont identiques. Le mode d'analyse des fréquences sera, également souvent non linéaire du fait de ces instabilités. Par ailleurs le nombre très important de paramètres impliqués rendent le système (mécanique et biologique) complexe à analyser surtout sur une longue durée

puisque ces paramètres sont eux-mêmes variables dans le temps et l'espace (usure et état de surface). La modélisation sera ainsi très difficile à envisager en raison de la variabilité de ces paramètres et du comportement aléatoire de chaque patient dont l'anatomophysiologie évolue également. Enfin nous avons vu que le procédé de fabrication des implants et des connexions, leur dessin ou leur position sont des facteurs majeurs. Ceci explique la nécessité d'avoir tous ces éléments pour juger et comparer deux types de couple céramique d'alumine sur alumine :

- deux types de fabrication de matrice d'alumine sur un même type de prothèse auront un comportement mécanique différent. Par exemple une céramique d'alumine quasi pure et une alumine associant de la zircone ;
- un même couple d'alumine du même fabricant avec la même prothèse chez deux patients à activité différente ou avec des implants posés différemment pourront avoir une évolution différente ;
- un même couple d'alumine sur des implants différents, notamment avec des liaisons et connexions différentes évoluera également différemment. Le comportement sera également différent en fonction de la taille de la tête et de son excentration par rapport au cotyle, comme avec des têtes de diamètre supérieure à 36 mm d'où une épaisseur de la céramique de l'insert cotyloïdien relativement faible. Le couple mécanique entre la taille de la tête et la taille du cône peut également être augmenté et devenir conflictuel.

De telles conséquences vont imposer aux chirurgiens et aux fabricants des critères d'exigences :

- le mode de fabrication des céramiques d'alumine est capital. De cette qualité dépendra nos résultats. La nouvelle génération d'alumine à matrice composite notamment mais aussi d'alumine quasi pure à petits grains (0,5 à 1 μm) a pratiquement diminué par dix le risque de fracture des premières générations. Le positionnement des pièces prothétiques devra diminuer au maximum les instabilités mécaniques qui majoraient considérablement les contraintes et les forces tangentielles (4) ;
- les implants choisis, leur dessin, le choix du métal et leur mode de connexion sont aussi importants. Que ce soit au niveau du cône de la partie fémorale mais aussi du cône entre insert et cupule métallique. La façon de les assembler au cours de l'intervention doit-être particulièrement soignée sur un cône sec et nettoyé de toute souillure. Les cols modulaires sont également un sujet de débat. Leur propre connexion à la prothèse fémorale et le risque de fretting (au sens large), de choc au cours des vibrations et de contraintes au cours du mouvement pourront compromettre tout le système alors que leur concept vise à améliorer le positionnement des prothèses.

Analyse thermodynamique : fluctuation et diffusion de l'énergie

Au repos, le système est en quasi équilibre énergétique. Toute contrainte ou fluctuation comme la reprise de la marche ou une modification d'activité qui va agir sur le système va le déséquilibrer jusqu'au seuil où l'état thermodynamique sera de nouveau en équilibre global (13). L'équilibre thermique est celui des trois corps (les implants et l'interface) qui doivent avoir la même température. L'équilibre mécanique est l'équilibre des forces et contraintes. L'équilibre chimique correspond au même potentiel électrochimique. Il est peu probable, en fait, que ce système dynamique soit en équilibre longtemps puisque les conditions mécaniques et environnementales varient pratiquement à chaque activité et au cours du temps. Par ailleurs ce système va échanger de l'énergie avec son environnement (capsule, tissu, vascularisation, os ...). Le système est global, ouvert, mécanique et biologique. Il peut s'adapter au cours du temps sans dommage notable d'où la durée de vie longue de nos prothèses. Cette notion de fluctuation- diffusion d'énergie-adaptation est un des éléments clé pour comprendre le fonctionnement des prothèses articulaires. Rappelons qu'un mécanisme de choc précède plus ou moins violemment le glissement-déplacement à la marche ou au changement de position. Une onde locale initiale est ainsi créée. Immédiatement après, le frottement apparait comme une force de résistance qui s'oppose macroscopiquement à ce déplacement dynamique au cours du mouvement. L'énergie n'est pas entièrement créatrice de mouvement apparent (énergie cinétique), elle doit vaincre les irrégularités de surface à l'échelle de l'atome et l'adhérence (forces électrostatiques de Van der Waals) au contact créatrice de vibrations. Cette perte d'énergie due au frottement se transforme en énergie thermique. Bergman et son équipe ont bien montré et prouvé l'augmentation de température au cours du frottement et du fonctionnement des prothèses *in vivo* (8). La relation entre ce transfert d'énergie thermique et les vibrations/oscillations est encore un sujet de recherche de forte actualité. Il faut se rappeler qu'à l'échelle atomique la chaleur est une agitation moléculaire désordonnée. Il s'agit donc aussi d'un mouvement, mais moléculaire et exprimé différemment. A noter qu'on pourrait remplacer, à ce niveau la notion d'énergie par celle de quantité de mouvement avec au cours du fonctionnement de nos prothèses une alternance de mouvement macroscopique ordonné de glissement et un frottement correspondant à une diffusion différente désordonnée de cette quantité de mouvement (14). La céramique d'alumine a une excellente conductivité thermique. Elle diffuse la chaleur et ne se déforme pas. Il n'y a donc pas de diffusion sous forme d'énergie élastique ou plastique. La diffusion d'énergie au cours du frottement va se faire sous forme de vibrations/oscillations et d'usure très limitée. La relation exacte entre chaleur et diffusion sous forme d'onde est encore mal connue. A l'échelle de l'atome cette vibration est une modification de surface très superficielle et transitoire. Une vibration est donc un déplacement de quanta d'énergie, les phonons, sans déplacement de matière (annexes 1 et 2). Mais une sur-contrainte et donc un surcroît d'énergie (excentration par exemple) peut aboutir aussi à une usure comme en témoigne les bandes d'usure et les particules plus volumineuses qu'habituellement retrouvées sur les explants (19, 20).

Si l'on reprend l'analyse au niveau macro et microscopique, une énergie importante au cours d'un mouvement violent et/ou au cours d'une excentration par exemple va créer une onde de choc qui en elle-même peut créer une fissure et une usure sur la céramique directement en surface et/ou sur la partie métallique du cône ou du metal back. Une partie est aussi générée sous forme d'onde d'extension locale au contact (15). Le frottement qui suit sous forme d'adhérence-glissement (stick-slip) crée une diffusion plus étendue et qui interfère avec la précédente. Il y a donc une forme de répartition de cette diffusion d'énergie non créatrice de mouvement et qui correspond à la différence entre l'énergie totale initiée au départ et l'énergie cinétique. Cette répartition se faisant entre création de bandes d'usure ou fissures et onde de vibration. Cette forme de répartition de l'énergie est importante car il n'y pas, dans ce cas, de lubrification qui disparaît probablement au contact. Il n'y a pas non plus de diffusion dans la structure de la céramique qui ne se déforme pas. Ces deux phénomènes, onde et fissures voir rupture en fragmentation sont donc le résultat de cette diffusion d'énergie localement. Ces ondes vont aussi diffusées au-delà vers les parties métalliques et mêmes dans l'environnement biologique et l'extérieur du corps. Ces vibrations et ondes peuvent donc apparaître aussi comme une forme de protection contre la rupture de la céramique d'où la complexité de la dynamique du système. C'est le deuxième paradoxe: le squeaking et la diffusion d'ondes extériorisées peuvent-être une limitation du risque de rupture ! Ces vibrations et ondes par choc et au frottement peuvent à la fois apparaître comme créatrices de fretting-corrosion des connexions (transformations physicochimiques et biologiques locales)

et fissures initiatrices de rupture mais sont aussi comme une diminution de l'énergie locale de rupture grâce à la diffusion de cette énergie vers l'extérieur! Le comportement en surface semble ainsi protéger la structure. Il y a donc une dualité dans cette diffusion d'énergie entre perte de matière par usure et diffusion d'onde. En fait le frottement qui induit des vibrations et l'usure sont les deux phases d'un même phénomène : l'irréversibilité et la diffusion d'énergie. Notons qu'au-delà de la prothèse l'énergie diffuse dans l'os et l'environnement. La cupule métallique et la partie fémorale, si elle est sans ciment, vont être colonisées par cet os qui peut aussi se renforcer. Lorsque la prothèse fémorale est scellée, le ciment peut participer à cette diffusion d'énergie. Ceci explique, peut-être, la quasi absence de squeaking des prothèses cimentées. Le ciment est un polymère de méthyl méthacrylate qui est aussi un matériau cassant proche de la fibre de verre (plexiglas) et sensible au choc et aux vibrations de même que le fluide entourant les tiges cimentées de type Exeter.

Devant un tel système biomécanique à la fois chaotique, complexe, interconnecté et non linéaire, comment peut-on exploiter notre analyse ?

En finalité, nous avons vu que le critère énergétique engendre le comportement dynamique du système, à la fois par le mécanisme de choc au contact et au cours du frottement. Par ailleurs nous savons que dans certaines circonstances de sur-contraintes locales (excentration, mouvement rapide et ample) le système peut devenir instable. En mécanique, un système est en effet d'autant plus instable qu'il reçoit plus d'énergie qu'il ne peut en diffuser localement (16). Lorsque cette instabilité est modérée et son apparition assez lente sans s'écarter de façon trop importante de l'équilibre du système, la diffusion d'énergie dans le système sera « tolérable ». Au-delà de ce seuil et des conditions limites, l'instabilité et le déséquilibre deviennent majeurs (17), le surcroît d'énergie à diffuser augmente les vibrations et l'usure avec apparition des modifications de surface et leurs conséquences. Les plus dramatiques sont la fracture qui correspond à une énergie de liaisons intramoléculaires et des grains de céramique qui est inférieure à l'énergie accumulée au niveau des fissures et zone d'usure ou des défauts de fabrication.

À noter que l'association alumine et zirconium dans la même structure est susceptible en théorie de transformation de phase de cette céramique de zirconium au cours de choc et d'augmentation de chaleur. En fait une bonne répartition des grains et un faible pourcentage de zirconium sera protecteur par augmentation de l'énergie de résistance face à l'énergie de fragmentation. L'énergie de diffusion est également mieux répartie autour des plaquettes de strontium associées (21). Ce type de céramique d'alumine renforcée par des grains de zirconium aura de meilleure caractéristique mécanique face au risque de fracture sous réserve d'une excellente fabrication. Le squeaking sera par contre, probablement inchangé.

Au cours de l'évolution le seuil de tolérance du déséquilibre va donc se modifier et une partie de l'énergie générera de l'usure. A contrario, il faut se rappeler que le système mécanique est « ouvert », associé au système biologique. Celui-ci peut s'adapter, notamment l'os si les conditions physiologiques et mécaniques le permettent. Les particules d'usure céramiques sont très bien tolérées par l'organisme d'autant que leur volume est faible. La réaction régionale est surtout fibreuse et stabilisante, avec peu de modification cellulaire de la synoviale ou d'ostéolyse dans le temps (18). Ceci est un argument capital, puisque l'échec tardif de nos prothèses dépend en grande partie de toutes les réactions biologiques immunologiques, cellulaires et tissulaires et/ou des luxations secondaires par excentration d'usure.

Par contre les débris de métal venant des connexions seront très néfastes et auront des conséquences biologiques et tissulaires. Des fissures et ruptures de matériel métallique ou céramique seront même possibles, mais il faut insister sur le fait que ces échecs par rupture de la céramique sur fissures au niveau des liaisons ou des pièces métalliques sont dus le plus souvent aux problèmes de fabrication, de concept ou de positionnement des implants. Le couple céramique sur céramique de nouvelle génération et leur processus de fabrication actuel sont probablement rarement en cause. C'est le troisième paradoxe. Les connexions et liaisons mécaniques peuvent compromettre le couple céramique sur céramique.

Le squeaking lui-même est très rare, mais désagréable pour le patient. Il ne s'agit que d'un phénomène particulier du au fonctionnement de l'ensemble du système. Il dépend donc de tous les facteurs qui constituent le frottement: propriétés intrinsèques des matériaux, dynamique de fonctionnement, position et dessins des implants. Ce bruit audible par l'oreille humaine est une expression de l'onde de vibration qui existe toujours, mais qui est très rarement entendue. Cette onde ou vibration au frottement est un déplacement d'énergie sans déplacement de matière. Il s'agit d'une forme de diffusion de l'énergie du système mécanique vers le système biologique puis l'extérieur. L'onde se caractérise par une fréquence de vibration qui dépend des caractéristiques de tout le système biomécanique en fonctionnement. On a vu que cette onde est le résultat du phénomène auto entretenu de couplage des ondes émises localement et qui peut rentrer en résonance avec la fréquence propre de vibration du métal, notamment de la partie fémorale en alliage de titane sans ciment. Le squeaking, lorsqu'il existe, est donc la matérialisation en son audible d'une partie de cette diffusion d'énergie au cours du frottement. Pour obtenir de telles fréquences, il est probable qu'il faut une diffusion d'énergie importante qui rend le système plus instable. C'est donc cette instabilité loin de l'équilibre du système qui explique l'importance des phénomènes vibratoires et le squeaking. Ceci correspond à la description clinique et expérimentale du squeaking au cours des effets de bord ou des erreurs de positionnement du cotyle et de l'absence de lubrification. Néanmoins il a été également décrit des squeaking avec des prothèses bien posées. Il peut alors s'agir d'excentration au cours de micro séparation mais aussi probablement de conditions de fonctionnement limites et d'instabilité du système global qui peuvent apparaître chez des patients actifs sans vice de positionnement (19). Enfin, il faut insister sur le fait qu'une absence de squeaking ne signifie pas que le système ne subit pas d'instabilités majeures.

Très curieusement, on remarque qu'il ya ainsi secondairement une recherche de stabilité entre des effets opposés, c'est à dire entre énergie cinétique et frottement qui au départ déséquilibrent le système. Ceci semble rendu possible par une forme de compensation entre les effets dispersifs et la non linéarité. L'onde de propagation créée par le couplage ne se déforme pas alors qu'elle se propage dans des milieux inhomogène contrairement à une onde de propagation dans un système linéaire qui elle, se déforme et s'amortie. La concentration d'énergie à diffuser se concentre localement sous forme d'une onde sans déformation, c'est le phénomène du lock-in (2). L'analyse des propriétés de cette onde, amplitude, longueur d'onde et vitesse serait d'un intérêt majeur (14).

Discussion

Le couple céramique d'alumine sur céramique d'alumine est choisi pour ses qualités de frottement et la quasi absence de réaction biologique réactionnelle. Ces propriétés sont dues aux caractéristiques mécaniques et tribologiques de ces céramiques. Un premier paradoxe est que ces mêmes caractéristiques, notamment la dureté et l'absence de déformation peuvent être, dans certaines circonstances exceptionnelles, responsables de fracture et de phénomènes vibratoires majeurs. Ces phénomènes sont un mode de diffusion de l'énergie au cours de choc au contact et l'hors du frottement de ce type de

couple. Ce mode de diffusion de l'énergie peut-être protecteur apparent et/ou générateur de rupture, d'où le deuxième paradoxe.

Dans un mode de fonctionnement qui restera centré et relativement régulier, l'essentiel de l'énergie à l'impulsion ou à la création du mouvement sera transmise sous forme d'énergie cinétique et de déplacement. L'« énergie de résistance » de faible importance correspondant au frottement sera diffusée probablement dans l'interface et l'environnement proche. Le système est alors probablement linéaire. A contrario dans les cas où il existe un trop grand déséquilibre avec une faible différence entre l'énergie cinétique et celle correspondant au choc et au frottement, l'énergie à diffuser est très importante. Le système devient alors très instable, non linéaire et peut générer non seulement un squeaking, mais également une usure voir une rupture notamment à partir des connexions.

La qualité des céramiques d'alumine de dernière génération se sont beaucoup améliorée. Le seuil de résistance à la fracture s'est élevé et tolère des contraintes (tension et cisaillement) au cours du choc et au frottement majeures. Par contre, il faut encore insister sur la qualité et la fabrication des connexions qui doivent être également considérées comme des couples de frottement. Toutes les liaisons ou contacts mécaniques peuvent être intéressées par les phénomènes vibratoires. Les conséquences sont le risque de fretting et libération de débris métalliques avec toutes les réactions locales mécaniques, physico-chimiques et biologiques. C'est le troisième paradoxe : les couples « accessoires » peuvent compromettre le couple principal.

Toute cette analyse est essentiellement déductive des lois des sciences physique et mécanique (y compris thermodynamique) en tenant compte de l'environnement biologique. Elle est confrontée aux résultats cliniques, à l'analyse des explants et constatations faites en laboratoire.

Pour être toute à fait fiable, il faudrait avoir toutes les données initiales (mécanique, physico-chimique, et biologiques) puis au cours de différentes étapes de la vie et sur un temps très long, ce qui actuellement est irréaliste. Nous avons vu, notamment, que ces données initiales évoluent au cours du temps d'autant que l'ensemble du système biomécanique est parfois chaotique et complexe. Toute analyse partielle sans tenir compte de l'ensemble des données et de leur évolution est donc insuffisante pour une étude scientifique irréprochable. Néanmoins l'analyse des explants et des échecs est une source capitale d'information (19,20). Notre propre analyse par méthode inverse ne propose que des hypothèses théoriques mais qui sont en rapport avec les constatations cliniques et l'analyse des explants. Il serait très intéressant d'y associer l'intelligence artificielle (deep learning, machine learning, convolutional neural network) (23) pour exploiter nos grands nombres de données (résultats cliniques et registres nationaux) et leurs interactions pour comprendre le fonctionnement le plus précisément possible.

Conclusion

Les couples de frottement en céramique d'alumine sur céramique d'alumine donnent d'excellents résultats. Ils sont les seuls à n'entraîner par eux-mêmes aucune réaction ostéolytique et biologiques. Ces résultats sont dus à leurs propriétés physico-chimiques et leur quasi, parfaite tolérance biologique. L'amélioration de leur procédé de fabrication a permis de repousser la limite du seuil de rupture qui était leur point faible. Parallèlement à ces qualités intrinsèques, il faut être aussi exigeant au niveau de toutes les liaisons mécaniques et si possible les limiter au strict nécessaire. Cette qualité de fabrication doit s'associer à une technique de pose des implants qui devra éviter au maximum les grandes instabilités et notamment les excentrations. Le squeaking n'est que l'expression audible de phénomènes thermodynamiques complexes en grande partie expliqués par la diffusion de l'énergie au contact et au cours du frottement.

NDLR

Craquement, crissement, grincement et squeaking sont le même terme correspondant à un bruit audible émis par le couple céramique sur céramique au cours du mouvement.

Discussion en séance

Questions d'H Coudane

1-Est-ce que les craquements protègent ?

Réponse

Ils correspondent à une partie de la diffusion extériorisée de l'énergie du frottement et donc limitent ainsi en partie l'accumulation d'énergie vers l'autre voie de diffusion que sont les fissures de la céramique et la propagation de la fracture alors qu'il n'existe plus de lubrification. Mais il faut insister sur le fait qu'ils traduisent une excentration, une instabilité mécanique forte et donc des contraintes au contact très importantes et sont donc aussi un « signal d'alarme » d'un dysfonctionnement de la prothèse. Le craquement n'est donc pas un phénomène anecdotique mais traduit une surcharge mécanique au contact.

2-Quelle est l'explication de leur disparition après un an alors qu'ils sont présents dans les suites immédiates ?

Réponse

En fait à ma connaissance, ils disparaissent rarement. Si c'est le cas on peut imaginer que c'est le patient qui a changé la façon d'utiliser sa prothèse en évitant les mouvements qui les déclenchaient. L'autre hypothèse est la modification progressive de l'os autour de la tige fémorale ou de l'environnement tissulaire du cotyle qui change le mode de diffusion de l'énergie ou l'instabilité (cicatrisation fibreuse stabilisatrice ?). Rappelons que ces craquements ne sont jamais douloureux. S'ils le deviennent c'est qu'il existe un autre problème qui peut-être une fracture de l'insert parfois difficilement visible sur les radios standards. Par ailleurs l'absence de crissement audible ne signifie pas une absence d'instabilité mécanique.

Questions de G Casanova

1-Que penser des attaques en justice pour « grincement » ?

Réponse

Le grincement peut-être la traduction d'une malposition ou d'un dessin des implants exposant à une excentration mais il existe aussi des grincements sans problème apparent notable. S'agit-il de micro séparation après relâchement musculaire

dans la phase de non appui puis au re contact ? Ou de position ou mouvement extrême du patient ? Le contact exact au cours du mouvement dynamique est difficile à objectiver.

2-Y a-t-il des ré interventions motivées par le bruit ?

Réponse

Oui, s'il existe une malposition évidente ou un grincement qui survient pour des activités banales de la vie de tous les jours comme la marche par exemple. Enfin parfois simplement parce que le patient ne supporte plus (ou son entourage) ce bruit ou s'il est ou devient douloureux.

Question de P Marre

Est-ce qu'un fabricant peut-être mis en cause ?

Réponse

La céramique est un matériau difficile à fabriquer et ne supporte aucun défaut. La céramique doit être sans porosité et répartie de façon homogène y compris lorsqu'on associe de la zircone ou d'autres composants. Il est très difficile de savoir si cette fabrication a été parfaite. Si par contre dans un même lot ou un même dessin de prothèse, il est noté un taux anormalement élevé de fracture ou grincement, on peut s'interroger. Enfin ces complications ne se rencontrent essentiellement qu'avec la céramique d'alumine (AL₂O₃) car ceci est inhérent à ses propriétés mécaniques (premier paradoxe de la présentation). On doit donc peser les très faibles risques face au bénéfice de la qualité du frottement et la quasi absence de réaction biologique et électrochimique.

Question de R Villet

Quelle est la fréquence des fractures de prothèses ?

Réponse

Il y a eu une décroissance du nombre de fracture. Nous sommes à la quatrième génération de céramique.

Taux de fracture: tête fémorale 0,004 % (4 pour 100 000) et 0,022 % pour l'insert car on compte également les écaillages des bords (chipping).

Le taux de grincement est de l'ordre de 5% mais dépens des pays car il n'est pas toujours déclaré.

Question de G Morvan

Est-ce qu'une rétroversion du bassin entraînée par une lombarthrose augmente le risque de grincement et de fracture ?

Réponse

Oui en théorie, mais on doit en tenir compte dans la position des implants et ainsi éviter ces risques mais ça peut être difficile. Il serait alors peut-être souhaitable de choisir un autre type de prothèse, double mobilité par exemple car la courbure lombaire peut évoluer avec l'arthrose au cours du temps et s'inverser. À noter que dans de tel cas l'activité du patient diminue souvent et ceci compense en partie les instabilités.

Question d'A Boudaz

Peut-on comparer avec les prothèses dentaires ?

Réponse

Oui mais très partiellement car s'il s'agit de matériau quasi équivalent, les contraintes sont souvent différentes. Le frottement vrai dent contre dent est très rare (excepté pour quelques maladies neuropsychiatriques ou troubles comportementaux). Les prothèses dentaires sont surtout soumises aux contraintes en compression par l'intermédiaire des aliments. Le problème mécanique sera probablement plutôt un déchaussement des implants.

Question de D Franco

Quelle sera la prochaine innovation dans le matériel des prothèses ?

Réponse

Les français ont été particulièrement innovateurs dans les cinquante dernières années alors que les compagnies fabricant de taille mondiale sont américaines.

Il me paraît souhaitable maintenant après ces innovateurs d'essayer de comprendre le fonctionnement réel de nos prothèses in vivo. Les nouveaux matériaux peuvent être une piste mais une autre voie sera peut-être le « tissu engineering » à condition d'avoir également compris le processus biomécanique de destruction d'une articulation !

Références

1. Weiss C, Hothan A, Morlock M and Hoffmann N. Friction- Induced Vibration of artificial Hip Joints. *GAMM. Mitt.* 2009;32:193-204.
2. Massi F, Berthier Y, Baillet L. Contact surface topography and systems dynamics of break squeal. *Wear* 2008;265:1784-92.
3. Dennis DA, Komistek RD, Northent EJ et al. In Vivo determination of Hip Joint Separation and the forces generated due to implant loading conditions. *J Biomech* 2001;34:623-629.
4. Hausselle J, Stolarz J, Dursapt M, Forest B. Shock induced damage on hip prostheses. *Proceeding of the 20th European conference of Biomaterials. Nantes 27 September- 1er October*
5. Schmalzried TP. Patient Activity and Hip Wear. *Seminars in Arthroplasty.* 2012;23:193-9.
6. Walter WL et al. Resonance of the Metallic Components generates the sound in Squeaking ceramic-on ceramic Hip Replacements. An Acoustic and Finite Element Analysis. *J Bone Joint Surg Br* volume 92B, Issue SUPP 1, 104.
7. Glaser D, Komistek RD, Cater HE, Mahfouz MR. A non invasive acoustic and vibration analysis technique for evaluation of hip joint conditions. *Doi: 10.1016/J.Biomech.2009.10.005*
8. Bergmann G, Graichen F et al. Frictional heating of total hip implants; *Journal of Biomechanics* 2001;34, Part 1:421-428. Part 2: 429-435
9. Pandorf T. The importance of Clean Taper Conditions Using Ceramic Hip Implants pp 97-102 In *Modern Trends in THA Bearings. Material and Clinical Performance.* Cobb (Ed.) Springer
10. Ascencio G, Essig J, Nourissat C. Réaction tissulaire anormale après PTH avec modularité fémorale en chrome cobalt. *RCOT* 2011;97 suppl n°7:08.227. *doi.10.1016/j.rcot.2011.08.227*
11. Collier JP. The tradeoffs associated with modular hip prostheses. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 1995;311:91-101.
12. William L. Walter, Tim S. Waters, Mark Gillies, Shane Donohoo, Steven M. Kurtz, Amar S. Ranawat, William J. Squeaking Hips. *J Bone Joint Surg Am* 2008;90:102-111.
13. Vilar JMG, and Rubi JM. Thermodynamic "beyond" local equilibrium. *PNAS* 2001;98:11081-4.

14. Balian R. Du microscopique au macroscopique. Cours de physique statistique de l'école polytechnique. Tome1, école polytechnique. Ellipses 1992.
15. Levy S, Molinari JF. Dynamics fragmentation of ceramics, signature of defects and scaling of fragments sizes. Doi: 10.1016/j.mps.2009.09.002
16. Meziane A, Baillet L, Laulagnet B, Godeau C, Berthier Y. Instabilités de contact : analyse temporelle, aux valeurs propres et validation expérimentale. Mécanique & industries 2007;597-607. Doi: 10. 1051/meca: 2007083
17. Shi Z, Ben-Zion Y, Needleman A. Properties of dynamic rupture and energy partition in a solid with a frictional interface. Journal of Mechanics and Physics of Solids 2008;5:24
18. Hernigou P, Flouzat-Lacharriette C, Poignard A. Ceramic-ceramic bearing decreases the cumulative long term risk of dislocation. A 30 Year story versus Ceramic-PE. Efort. Berlin 2012
19. Steward TD, Tipper JL, Insley G, Streicher RM, Ingham E, Fisher J. Long term wear of ceramic composite materials for hip prostheses under severe swing phase Microseparation. J Biomed Mater Res B Appl Biomater. 2003;66:567-73.
20. Nevelos JE, Prudhommeaux F, Hamadouche M, Doyle C et al. Comparative analysis of two different types of alumina-alumina hip prosthesis retrieved for aseptic loosening. J Bone Joint Surg 2001;83B:598-603.
21. Masson B. Cahiers d'enseignement de la SOFCOT N°90 Prothèse totale de hanche. Les Choix. 2005;63-82.
22. Dauxois T, Peyrard M. and Ruffo S. The Fermi-Pasta-Ulam numerical experiment: history and pedagogical perspectives. European Journal of Physics 2005;26:S3-S11.
23. Le Cun Y, Kavukcuoglu K and Farabet Cl. Computer Science Department, Courant Institute of Mathematical Sciences, New York University. Convolutional Networks and Applications in Vision.

Annexes

Annexe 1

Un solide est un objet quantique macroscopique. Les noyaux occupent des emplacements à peu près fixes en réseau régulier (pour les solides cristallins). La forme des solides en cristaux reflète celle du réseau à l'échelle macroscopique comme s'il s'agissait d'une molécule géante : l'énergie de liaison d'un atome ou d'une molécule est remplacée par l'énergie de cohésion du solide. Les atomes du solide peuvent vibrer autour de leurs positions d'équilibre situées aux nœuds du réseau cristallin. Ces oscillations sont ainsi régies par la mécanique quantique. Les ondes acoustiques dans les solides ont un double caractère ondulatoire et corpusculaire. L'énergie correspondant à ces oscillations est donc quantifiée (varie par quanta ou valeurs discrètes). Les quantas d'énergie qui s'appellent les phonons se comportent comme des particules et se propagent à la vitesse du son. Une élévation de la température excite des ondes acoustiques. Elle crée des phonons et ainsi augmente l'énergie en absorbant de la chaleur. Remarquons également que la dilation des métaux ou leur élasticité correspond à des phénomènes macroscopiques quantiques. La taille des mailles cristallines augmente lorsqu'une élévation de température amplifie les vibrations des atomes, ou que les forces écartent ces mailles de leur forme d'équilibre. (Références : R. Balian. Du microscopique au macroscopique. Cours de physique statistique de l'école polytechnique. Tome1, école polytechnique. Ellipses 1992.)

Annexe 2

L'expérimentation à ce niveau est très difficile sans interférer avec les propriétés physiques et chimiques des atomes, néanmoins on remarque une similitude très forte entre le niveau atomique et donc la mécanique quantique et le niveau macroscopique au cours de phénomènes non linéaires tels que les instabilités de Faraday dont la longueur d'onde est une analogie de l'onde de Louis De Broglie et dépend du module de Young du matériau [1,2]. En fait, les propriétés de chaque élément constitutif des implants : rigidité, dureté, élasticité, résistance, fréquence de vibration, masse volumique, conduction thermique ou électromagnétique etc. sont issues des interactions entre les nombreuses particules dont ils sont composées. D'où peut-être dans le futur, en théorie, l'introduction de la mécanique quantique et de la « dualité » onde-particule. Des particules de matière animée par la même quantité de mouvement peuvent se comporter aussi comme une onde [3]. Sachons pour mémoire que l'étude théorique de la mécanique quantique avec son principe d'indétermination oblige à étudier les phénomènes physiques par probabilité. En terme thermodynamique ce niveau serait celui des particules élémentaires, il faudrait donc raisonner avec un système multi particules, mais avec un nombre de variables trop importantes et une indétermination pour une analyse mathématique classique, d'où une approche nécessaire de type statistique pour décrire les mouvements et échanges dans un volume à un moment donné. (L Boltzmann [4]). En physique statistique l'équipartition de l'énergie totale d'un système à l'équilibre thermodynamique est répartie en parts égales en moyenne entre ses différents composants (Roger Balian). Par contre les systèmes non linéaires peuvent avoir un comportement différent [5].

Références de l'annexe 2

1. Bush J W M. Quantum mechanics writ large. PNAS October 12, 2010 vol.107 N°41 17455-17456. Doi : 10.1073/pnas.1012399107
 2. Eddi A, Fort E, Moisy F, Couder Y. Unpredictable tunneling of a classical wave particle association. Phys. Rev. Lett, 102; p240. 2009.
 3. Feynmann RP, Leighton RB, Sands M. The Feynmann Lectures on Physics (Addison Wesley, New-York, vol 3, Chap7 (1963).
 4. Desvillettes L, Villani C. On the trend to global equilibrium for spatially inhomogeneous kinetic systems: The Boltzmann equation. Invent. Math. 159, 2(2005), 245-316.
 5. Dauxois T., Peyrard M. and Ruffo S. (2005b), The Fermi-Pasta-Ulam numerical experiment: history and pedagogical perspectives. European Journal of Physics 26:S3-S11
- The most incomprehensible thing about the universe is that it is comprehensible" (Albert Einstein) from "Physics and Reality"(1936), in Ideas and Opinions, trans. Sonja Bargmann (New York: Bonanza, 1954), p292.*
If you want to find the secret of the universe, think in terms of energy, frequency and vibration. (Nikola Tesla).

Correspondance

Patrick Chaboche

Ancien chef de service de chirurgie orthopédique de l'Hôpital de Cornouaille - 29107 Quimper.

E-mail : patrick.chaboche@wanadoo.fr

