

L'AVANCÉE DES TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION MICROACOUSTIQUES DANS LE MONDE DES MICROTECHNIQUES

Jacques ATTAL, Gilles DESPAUX, Franck AUGEREAU

Laboratoire d'Analyse des Interfaces et de Nanophysique - UPRESA CNRS 5011

Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc

Place Eugène Bataillon - 34095 MONTPELLIER CEDEX 05

Toute technique de caractérisation ou de fabrication s'enrichit de l'apport des sciences et des techniques voisines afin d'explorer ou de fabriquer la matière de manière plus précise et plus contrôlée. L'acoustique a toujours bénéficié avec un certain retard, qui tend à se combler, de cet apport tant dans le domaine de l'acoustique aérienne que de celui de l'imagerie. Trop longtemps disjointes, nous assistons à un regain d'intérêt des chercheurs impliqués dans l'imagerie acoustique pour une approche plus large et ce, depuis le développement des microscopies à effet tunnel et à forces atomiques. Ces techniques ultimes ont réveillé les notions pourtant connues de champ lointain et de champ proche, solutions d'équations différentielles à longue et à courte distance comparée à la longueur d'onde. Paradoxalement, l'acoustique dans son ensemble illustre parfaitement sans difficulté expérimentale ces différents comportements qui sont remis au goût du jour et adaptés au monde des microtechniques en train de naître.

L'exposé qui va suivre nous montrera l'évolution des techniques d'imagerie acoustiques fines en champ lointain à travers la microscopie acoustique puis abordera le champ proche acoustique sous différents aspects notamment par un regard différent sur l'imagerie qui n'obéit plus au sacro-saint critère de Rayleigh.

1. Champ lointain et champ proche

L'exemple qui va être décrit tout au long de cette présentation pourra servir comme élément de réflexion à l'évolution de l'enseignement de la physique en étroite collaboration avec la recherche actuelle et ses développements. Tout bon physicien interrogé sur ses connaissances en optique par exemple, répondra que l'enseignement qu'il a reçu et celui qu'éventuellement il dispense comporte deux volets : l'optique géométrique et l'optique physique. Cette différenciation peut déjà laisser sous-entendre que les concepts sous-jacents ne sont pas toujours clairement identifiés. Parmi les plus initiés à l'optique physique, appelée également optique ondulatoire ou optique de Fourier, peu de personnes intègrent le fait qu'elle met en jeu les solutions asymptotiques ou plus exactement à longue distance des équations régissant le champ électromagnétique. Le critère d'appréciation est la distance d'observation de l'objet éclairé par rapport à la longueur d'onde de la radiation émise par la source qui peut être supposée ponctuelle ou étendue, cohérente ou incohérente. Avec des longueurs d'onde de la fraction de micron, les distances d'observation et les tailles de source ont été jusqu'alors toujours très supérieures à ces valeurs et sauf curiosité de laboratoire on n'a jamais eu à se préoccuper des solutions à courte distance. Un autre univers pourtant nous y attend : celui des ondes évanescentes qui évoluent sur une fraction de longueur d'onde au voisinage de l'objet.

Quelles ont été les motivations profondes pour s'y intéresser à présent : maîtriser la matière à son niveau le plus fin c'est-à-dire moléculaire, proposition qui peut se résumer en un seul mot : **nanotechnologie**. C'est le défi du troisième millénaire ou plus modestement du vingt et unième siècle qui a commencé avec l'avènement au début des années 1980 de la Microscopie

à effet Tunnel. Observer et fabriquer des nanostructures "intelligentes" pour une plus grande intégration et une fonctionnalité accrue en réduisant les masses et les coûts, manipuler les agrégats d'atomes, de structures ou de cellules en imaginant et en redoutant les retombées potentielles de toute sorte. C'est un univers pluridisciplinaire où se rejoignent physique, chimie et sciences de la vie.

On comprend combien l'enseignement doit évoluer pour former des personnes capables de créer ces richesses nouvelles dans un monde toujours plus compétitif. Nous n'en sommes qu'aux balbutiements mais poussés par la compétition, nous ne devons plus attendre que d'autres aient saisi le "marché".

L'observation de l'infiniment petit a été la première source de motivation des chercheurs. L'avènement de la microscopie électronique dans les années soixante a permis une avancée considérable dans le domaine des sciences avec malheureusement ses contraintes incontournables et son environnement très complexe.

Cette voie qui avait été choisie pour augmenter la résolution n'avait cependant pas franchi la barrière culturelle du critère de Rayleigh qui prévoit une limite impérative de la résolution à une fraction de la longueur d'onde de la source d'irradiation. Peu de voix se sont élevées contre ce critère lié à la diffraction jusqu'au début des années quatre-vingts. Pourtant l'existence de sources de radiation à très grandes longueurs d'onde comme en acoustique aérienne aurait dû nous amener à penser à une alternative en matière d'imagerie. En effet, il est bien connu que la cartographie des sources de bruit peut se faire quelle que soit leur longueur d'onde par un examen de proximité. Une image ultrasonore en champ proche est donc envisageable de la même manière que procède à un examen stéthoscopique le médecin. Les structures les plus fines détectées, se perdent avec la distance. On reconnaît donc la caractéristique du champ proche : proximité de la source, de l'objet, du détecteur, résolution indépendante de la longueur d'onde, mais fonction de la distance objet-détecteur et de la taille du détecteur. Les limitations physiques existantes ont alors complètement disparu, seule la technologie de réalisation d'émetteurs et surtout de récepteurs avec leur asservissement de position fixe pour un temps cette résolution, ce qui permet toute spéculation dans l'ère des nanotechnologies.

Dans la suite de la présentation nous allons nous intéresser à deux exemples concrets d'acoustique touchant à la microscopie acoustique qui illustrent cette dualité champ lointain/champ proche et dévoilent en parfaite harmonie, chacune des techniques avec ses propres avantages et surtout ses applications spécifiques.

2. La microscopie acoustique en champ lointain

2.1 Historique

Optique, électronique et maintenant acoustique sont les trois domaines exploités par la microscopie. L'utilisation des ultrasons en microscopie remonte aux années soixante-dix, suite notamment aux travaux des équipes de recherche de l'université de Stanford (Californie) [Lemons & Quate 73]. Depuis, plusieurs prototypes de microscopes acoustiques ont été mis au point à travers le monde et cet instrument est apparu sur le marché depuis une dizaine d'années.

Le microscope acoustique, par la nature des ondes utilisées, présente les avantages habituels des ultrasons : rayonnement non ionisant, donc sans danger pour les applications biomédicales, et non destructif lorsqu'il s'agit d'observer les solides au voisinage de leur surface ou en profondeur. La résolution de cet instrument, qui conditionne le grandissement maximum, est comparable à celui des meilleurs appareils optiques.

En outre, l'opacité acoustique différente de celle de l'optique explique que chaque type de microscope peut fournir des informations complémentaires sur un même échantillon. C'est ainsi que le verre et le plexiglas, aussi transparents l'un que l'autre, ne donnent qu'un faible contraste optique ; mais le verre est beaucoup plus réfléchissant aux ultrasons que le plexiglas et donne un contraste acoustique plus fort. En revanche, l'aluminium et le verre ont des caractéristiques acoustiques similaires, alors qu'en optique, ils sont très nettement différenciés.

2.2 Principe général

Dans son principe de base [Briggs 92] (fig.1), le microscope acoustique comprend un générateur d'ultrasons, constitué par un transducteur piézoélectrique, qui convertit un signal électrique incident en signal acoustique au moyen d'une couche mince d'oxyde de zinc de quelques micromètres d'épaisseur environ et dont l'orientation cristallographique est parfaitement contrôlée. Cette couche piézoélectrique est déposée sur l'une des faces planes et polies d'un petit barreau de saphir synthétique préalablement métallisé.

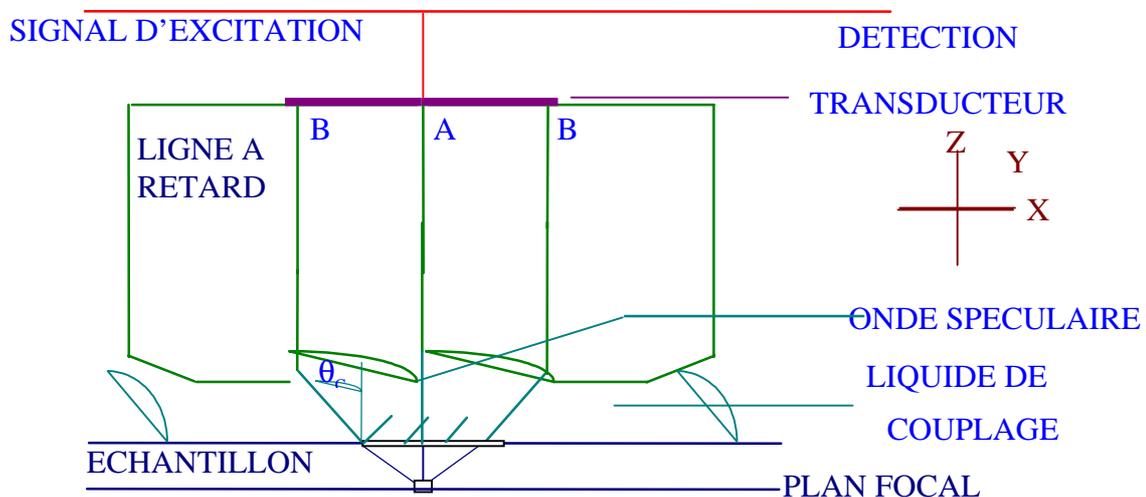


Figure 1 : Principe du microscope acoustique avec parcours des principaux rayons à l'intérieur de la lentille acoustique.

Les fréquences utilisées en acoustique (autour de 1 GHz) correspondent à des longueurs d'onde λ de l'ordre du micromètre, compte tenu de la vitesse v des ultrasons, de l'ordre de plusieurs milliers de mètres par seconde. Il s'ensuit que la résolution spatiale maximale atteinte, du fait de la limitation par la diffraction, est de l'ordre d'une fraction de longueur d'onde. Cette résolution s'obtient en interposant entre la source d'ultrasons et l'objet une lentille acoustique de focalisation qui agit comme en optique grâce à un dioptré sphérique séparant deux milieux d'indices (c'est-à-dire de rapport de vitesses de propagation d'ondes acoustiques différents). Un barreau de saphir constitue le premier milieu (le plus rapide) et comporte, sur la face plane opposée à celle du transducteur, un petit dioptré sphérique creusé et poli d'un diamètre de l'ordre d'une centaine de micromètres. Le deuxième milieu sera liquide, afin d'assurer le couplage acoustique avec l'objet et de permettre son déplacement, qui est ici mécanique.

Le rôle de ce liquide de transmission est capital : de lui dépendent la résolution, la pénétration et la nature des objets qui pourront être observés. L'eau est généralement utilisée avec comme principal inconvénient sa forte absorption moins élevée cependant que la quasi-totalité des autres liquides. Cette absorption est proportionnelle au carré de la fréquence, avec typiquement 200 dB par millimètre d'épaisseur traversée à 1 GHz.

Il est possible de visualiser l'objet par réflexion ou par transmission en recueillant respectivement les faisceaux réfléchis ou transmis.

L'image acoustique s'obtient dans un plan parallèle à sa surface par balayage mécanique de l'échantillon par rapport au capteur (ou le contraire) suivant deux directions perpendiculaires X, Y dans le plan focal de la lentille. Les informations reçues à la sortie des transducteurs sont numérisées puis stockées dans une mémoire en correspondance avec les déplacements de l'objet, et l'image finale est visualisée sur un moniteur classique avec des grossissements atteints, allant de quelques unités à 2 000 environ.

2.3 Images et Signatures acoustiques locales $V(z)$

Ces deux notions complémentaires sont apparues au fil du développement de l'instrument, copiant un peu l'évolution des techniques de microscopie électronique [Quate & al 79].

L'imagerie en mode C, c'est à dire par plans parallèles à la surface, a été la première développée mais rapidement, la nature plutôt qualitative des observations a cédé le pas à une analyse quantitative. Analysons la complexité des phénomènes. Le capteur focalisé génère un faisceau acoustique fortement convergent qui va frapper la surface de l'objet. Tout comme en optique, on assiste à une conversion de modes, les plus classiques étant les modes réfléchis et transmis, mais il en existe en acoustique bien d'autres, connus sous l'appellation de modes de surface et d'interface. Tous ces modes vont avoir un comportement et une interaction différentes avec le matériau à observer.

C'est un peu ce que traduit la figure 1 en montrant la génération et la détection de tels modes de surface sous une incidence θ_R . Ces ondes de surface (qui sont généralement des ondes de Rayleigh) sont évanescentes et une part de leur énergie est réémise sous forme d'ondes de volume dans le liquide tout au cours de leur propagation.

D'un point de vue physique, l'image acoustique de surface obtenue avec un microscope acoustique est une imagerie interférentielle entre deux types d'ondes issues du faisceau incident provenant de deux trajets différents : les ondes paraxiales réfléchies spéculairement (c'est-à-dire en incidence normale) par l'objet, notées A sur la figure 1 et les ondes de surface se propageant à la surface du matériau, générées par une autre partie du faisceau incident (notée B). La superposition de ces deux ondes s'effectue au niveau du transducteur après sélection des faisceaux de retour par la lentille acoustique.

Leur différence de marche due à des trajets assez différents va donner lieu à une interférence appelée signature acoustique $V(z)$ (fig. 2), composée d'une succession de maximums et de minimums lorsque l'objet est déplacé vers la lentille selon son axe z [Bertoni 84].

La périodicité de ces interférences Δz donne une information sur les chemins acoustiques des deux faisceaux, c'est-à-dire sur la vitesse de l'onde de surface v_R qui se propage sur le matériau. Son expression est la suivante :

$$v_R = \frac{v_0}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{v_0}{2f\Delta z}\right)^2}}$$

v_0 étant la vitesse dans le couplant et f la fréquence.

La connaissance des vitesses de propagation dans le matériau permet sous certaines conditions l'obtention des constantes d'élasticité comme le module d'Young E [Da Fonseca & al 93].

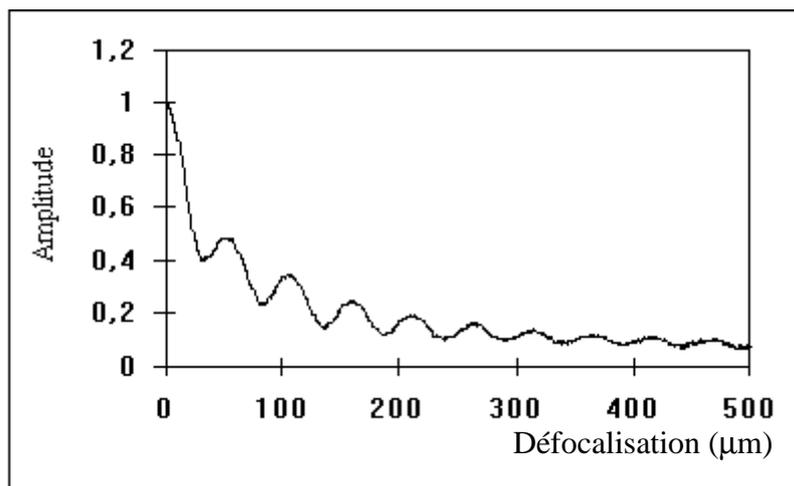


Figure 2 : exemple d'une signature acoustique expérimentale à 600MHz.

2.4 Les applications

Elles sont nombreuses et variées dans le secteur du contrôle non destructif des matériaux au sens large nécessitant une résolution du micron au millimètre environ. Selon la demande formulée, l'analyse en microscopie acoustique se fera de manière qualitative (images le plus généralement) ou quantitative (signature acoustique). Les moyens mis en œuvre pour répondre aux problèmes posés seront adaptés pour une utilisation très flexible (fréquence variable, capteurs de différentes ouvertures et focales, traitement spécifique des signaux, etc.). La présentation des différentes applications sera donc faite en fonction du domaine d'appartenance du spécimen examiné.

- La microélectronique

Riche en structures géométriques, c'est un domaine particulièrement adapté à l'imagerie de surface et de profondeur, les défauts étant le plus souvent liés à une couche ou une structure défaillante située dans un empilement. Il est possible ainsi de contrôler l'adhérence de couche, le claquage et l'électromigration dans des structures soumises à forte densité de courant ou de champ électrique. Autour des technologies de la microélectronique gravitent toutes les techniques de connectique, d'assemblage et d'encapsulation. Ici encore la microscopie acoustique par sa pénétration dans les matériaux opaques permet de révéler toute sorte de défaillance nuisible à la fiabilité du composant. Déjà un grand nombre d'industriels utilisent en routine ces appareillages, pour contrôler notamment d'encapsulation qui occasionne des problèmes de corrosion ou de dissipation thermique trop élevée [Despaux & al. 91].

- La métallurgie

C'est un domaine de prédilection pour le test non destructif et notamment l'acoustique. Ici aussi, on distingue deux grands types d'applications qui vont concerner la profondeur et la surface : la profondeur avec toujours les problèmes de soudures, fractures, décollement, structures profondes et la surface avec les revêtements, le traitement des surfaces, la fatigue, l'usure, le frottement...

Le microscope acoustique assisté de robots manipulateurs placé en environnement hostile a permis de diagnostiquer l'état d'endommagement de certains matériaux (aciers) sous l'effet des irradiations d'origine nucléaire.

La détermination des propriétés mécaniques des couches minces en vue d'obtenir des informations sur leur état d'adhérence préoccupe bien des secteurs de l'industrie

métallurgique. La caractérisation acoustique par la méthode de la signature $V(z)$ fait apparaître des modes de surface plus complexes appelés modes de Lamb [Ramdani & al 96], véritable guidage de l'onde dans la couche, particulièrement sensibles aux conditions aux limites, c'est-à-dire à l'adhérence sur leur substrat. Ces modes de Lamb sont très dispersifs en fonction de la fréquence et de l'épaisseur de la couche, dispersion dont on se sert pour trouver les propriétés élastiques de la couche et du substrat.

- Les polymères

Quelques études préliminaires ont été réalisées sur la photoréticulation c'est-à-dire le passage monomère/polymère sous l'effet d'un rayonnement UV [Augereau & al 97]. Le changement des propriétés élastiques dû à un changement d'état est relativement important et peut se contrôler pratiquement en temps réel durant l'illumination UV. Parallèlement à ce type d'expérience, le vieillissement des plastiques très affectés par les UV est aussi un domaine facilement observable par ces techniques qui transversalement touchent aussi les conditions d'environnement.

- Les matériaux poreux : un domaine en pleine extension

Ce domaine est très vaste puisqu'il concerne autant les matériaux poreux naturels (pierre, sol, sable, sédiments, etc.) que synthétiques (semi-conducteurs poreux, verre et métaux frittés, aérogels, ciments, mortiers, béton, brique, etc.). Il existe au moins trois grands domaines d'intérêt pour les tests non destructifs sur ces matériaux : la fabrication et leur contrôle pour des applications mécaniques, les capteurs à base de matériaux poreux, la protection de ces matériaux.

Rappelons que, par essence, les milieux poreux sont des agrégats d'éléments solides (grains, matrice, etc.) entre lesquels les vides forment l'espace poreux proprement dit. Ce sont ces vides qui induisent de grandes différences de comportement physique surtout en présence de fluide dans les pores qui accroît la complexité du comportement mécanique de l'ensemble. On assiste à une très forte variation de vitesse en fonction de l'état de porosité qui peut varier du simple au double [Da Fonseca & al 95]. Il est aussi possible de suivre l'état de dégradation en fonction du temps de bien des matériaux soumis à des contraintes d'environnement.

- Le biomédical et l'agro-alimentaire

La grande variété de fréquences utilisables (du MHz au GHz) permet de grandes possibilités d'exploration avec des résolutions certes dégressives avec la fréquence. Par ailleurs, l'un des intérêts est l'observation sans coloration de structures tissulaires fixées ou fraîches, voire vivantes sans en altérer leur développement. Il est regrettable qu'il soit si difficile par les techniques de microscopie acoustique classique de franchir notablement la barrière des 2 GHz assurant ainsi une résolution supérieure à l'optique classique. Les applications médicales haute fréquence les plus significatives se situent dans la gamme des moyennes fréquences (5 à 30 MHz) et concernent le plus souvent la morphologie de structures submillimétriques telles qu'elles apparaissent par exemple en dermatologie ou en ophtalmologie. L'instrumentation acoustique la plus adaptée est le microéchographe qui permet une analyse directe en profondeur des échos réfléchis par des structures de sous surface. A ces fréquences, la pénétration est de l'ordre de quelques millimètres suffisantes pour analyser une irrigation sanguine sous cutanée par exemple.

Dans le domaine agro-alimentaire, nous retrouvons un peu les mêmes contraintes que pour le biomédical avec cependant une notion de contrôle qualité des produits plus adaptés à l'acoustique. Différentes techniques de contrôle, de conservation, de congélation et de décongélation, de stockage et d'altération de produits frais sont en train d'être mises au point

en vue d'en améliorer la durée et la qualité. Dans le même ordre d'idée la torréfaction des grains de café ou de chocolat bien que mise au point depuis des siècles connaît une approche plus systématique pour établir des méthodes complémentaires de repérage des paramètres à contrôler.

Beaucoup de progrès restent à faire et d'imagination à déployer dans ces domaines où la complexité doit pouvoir trouver une réponse scientifique, technique et de plus en plus économique et sociale ce qui implique la collaboration de chercheurs de diverses disciplines qui doivent accorder leur sensibilité respective.

3. Le champ proche acoustique

3.1 *Avantage de la technique*

D'origine beaucoup plus récente bien que de concept ancien, cette nouvelle technique se caractérise essentiellement par la non dépendance fréquentielle vis à vis de la résolution, ce qui signifie que bien des matériaux présentant de fortes absorptions aux hautes fréquences vont pouvoir sous certaines conditions être imagés à des fréquences plus basses avec des résolutions bien supérieures à celles que prévoit le critère de Rayleigh. On peut déjà constater la parfaite complémentarité entre les deux techniques qui permettent pour l'une de visualiser les objets élastiques et pour l'autre des matériaux absorbants d'origine viscoélastique tels que liquides et solides mous.

3.2 *Principe général*

Plusieurs concepts de système champ proche acoustique ont vu le jour selon les finalités et les résolutions plus ou moins ultimes recherchées. Ils utilisent tous, un système résonnant qui a l'avantage d'être émetteur-récepteur sensible aux conditions aux limites d'approche du capteur par rapport au matériau à analyser.

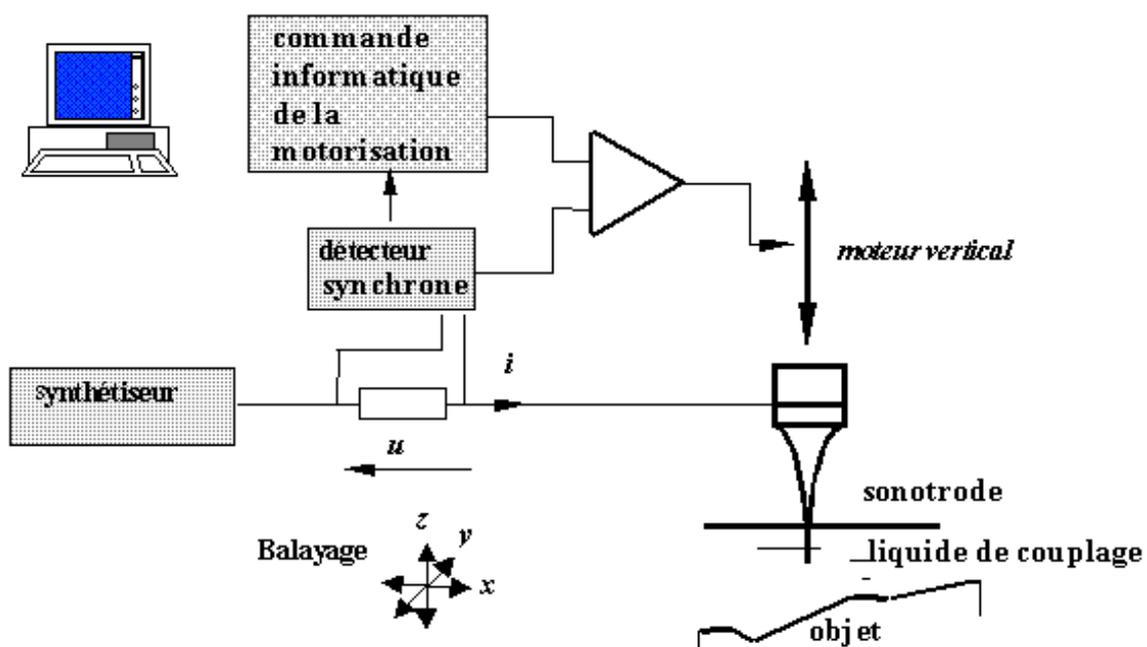


Figure 3 : Microscope acoustique à champ proche : principe de base

Dans le cas présent [Kulik & Attal 92], le système résonnant est une sonotrode qui n'est autre qu'un pavillon inversé de formes diverses (exponentiel, conique ou étagé), l'extrémité la plus large comprenant le transducteur piézoélectrique dont l'énergie se trouve ainsi confinée à

l'autre extrémité en forme de pointe. L'information sur la charge acoustique transite par le pavillon puis le piézo dont la fréquence de résonance et l'amplitude à la résonance sont modifiées. La taille de la pointe qui fixe la résolution doit être soigneusement modélisée pour optimiser la sensibilité du système. Une valeur de $\lambda/20$ à $\lambda/100$ est tout à fait typique. Équipée d'un système de balayage tridimensionnel, d'acquisition et de traitement d'image, cette technique mène à l'imagerie acoustique de topographie et de paramètres acoustiques du matériau en surface et subsurface (fig. 3).

3.3 Résonance des pavillons chargés

Plusieurs paramètres sont pertinents dans l'étude des pavillons. Le rapport des sections terminales conditionne la transformation d'impédance acoustique de l'objet qui sera par la suite convertie en variation d'impédance électrique au niveau du capteur. Cette transformation d'impédance peut induire une amplification de la vitesse mécanique ou de la force disponible à la pointe en fonction des conditions de réglage du pavillon, l'amplification d'une grandeur étant au détriment de l'autre. Le cas de l'accroissement de la force à l'extrémité correspond à un outil de microusinage utilisé en microgravure donc à des fins "destructives" ; par contre dans le cas d'une amplification de vitesse, une faible force est recherchée en bout de pointe et dans ce dernier cas, la résonance du pavillon est fortement influencée par la charge ce qui permet sa détermination de manière non destructive. Le pavillon étagé présente à cet égard l'une des plus grandes amplifications en vitesse, donc une excellente sensibilité à la charge et devra être utilisé à ces fins. Il est constitué de deux ou plusieurs cylindres de diamètre décroissant tous portés par un même axe. L'analyse physique du fonctionnement en résonance porte sur deux ou plusieurs oscillateurs couplés qui donnent un maximum d'efficacité et de sensibilité lorsque leurs dimensions respectives avoisinent $\lambda/4$, la principale difficulté étant l'ajustement parfait des sections permettant de répondre à ces critères.

3.4 Impédance acoustique en champ proche

L'impédance acoustique demeure toujours l'un des paramètres essentiels du matériau à mesurer ou à imager. Ce sont ses variations de place en place qui permettent l'imagerie d'un objet. Le passage champ lointain-champ proche dans les équations consiste à spéculer sur la dimension de la pointe, "a", devant la longueur d'onde λ (ou son inverse $k = 2\pi/\lambda$) [Prugne & al].

- Cas d'un matériau élastique

En champ lointain $ka \gg 1$, l'impédance d'un matériau purement élastique s'écrit :

$$Z_{\text{charge}} = \rho c \quad \rho \text{ et } c \text{ étant respectivement la densité et la vitesse de propagation.}$$

En champ proche ($ka < 1$), nous aboutissons à l'expression suivante :

$$Z_{\text{charge}} = \rho c \left[\frac{k^2 a^2}{2} + j \frac{8ka}{3\pi} \right].$$

Son expression est complexe : la partie réelle, qui correspond à la propagation de l'onde acoustique dans le matériau, tend vers zéro plus vite que la partie imaginaire qui est un terme de confinement de l'onde au voisinage de la pointe.

Dès que $ka = 10^{-1}$, il n'y a plus de rayonnement et nous sommes en présence d'ondes évanescentes qui est l'une des caractéristiques du champ proche. Le développement dans ces conditions de la formule ci-dessus montre que l'impédance de charge croît linéairement avec

la fréquence mais surtout avec la densité. On découvre ainsi l'une des applications de la technique qui consiste à mesurer les densités locales d'un objet au voisinage de la pointe.

Expérimentalement, il est facile de vérifier ce comportement qui se traduit par un glissement de la fréquence de résonance du capteur dans le cas d'un milieu liquide à faible viscosité.

- *Cas d'un matériau viscoélastique*

Dans le cas d'un matériau visqueux essentiellement de type liquide, l'analyse précédente est incomplète. Il existe une vitesse transverse du fait de la viscosité qui s'écrit :

$$V_T = \sqrt{\frac{2\omega\mu}{\rho}} \quad \text{où } \mu \text{ est la viscosité du liquide et } \omega \text{ la pulsation.}$$

Même si l'amplitude de cette onde décroît de manière drastique, les effets de la viscosité sont sensibles latéralement sur une hauteur h immergée ainsi qu'à l'extrémité de la pointe.

Dans le cas où $ka < 10^{-1}$, une partie réelle réapparaît dans l'expression de l'impédance de charge qui prend la forme suivante :

$$z_{\text{charge}} = \sqrt{2\omega\rho\mu \frac{h}{a}} + j \left[\omega\rho a + \sqrt{2\omega\rho\mu \frac{h}{a}} \right]$$

Cette partie réelle ne représente plus un terme de propagation mais un amortissement c'est-à-dire dans tous les cas une valeur dissipative. La partie imaginaire comporte pour sa part deux termes, l'un purement lié à la densité, le second à la viscosité.

Expérimentalement, on assiste pour des liquides visqueux, à un glissement de fréquence de résonance de la sonotrode due à l'existence de cette partie imaginaire de la charge. Dans le cas d'un liquide à propriété viscoélastique évolutive, il est possible de découpler ces deux termes contenus dans la partie imaginaire qui ne varient pas simultanément de la même façon.

3.5 Applications

Un très grand nombre d'applications dans des secteurs très différenciés sont potentiellement envisagées. Les liquides et les matériaux viscoélastiques abondent dans la nature et touchent des secteurs clés de l'industrie, de l'agro-alimentaire, du biomédical. L'aspect imagerie champ proche a pour l'instant été érudé au profit du développement de la connaissance de l'information traduite par le capteur.

Des études sont en cours sur la modélisation des liquides diphasiques, émulsion, suspension, etc. ainsi que les transitions liquide-solide (prise de colle, de mortier ...) qui impliquent, rappelons-le la coexistence de deux phases visqueuses et élastiques évoluant. Cette transition intéresse au plus haut point une large communauté de scientifiques et d'industriels qui ne peuvent, avec les instruments existants, la contrôler pour accéder à la connaissance et au contrôle d'un procédé.

4. Conclusion générale

Les deux techniques présentées semblent étrangères l'une à l'autre tant au niveau concept qu'applications. Elles émanent pourtant de l'acoustique montrant ainsi la richesse des solutions à courte et longue distances et de leurs interactions avec les grandeurs physiques de l'objet. Un exposé analogue aurait pu être fait en optique classique ou électronique à travers la dualité microscopie électronique de type champ lointain et la microscopie à effet Tunnel de type champ proche. Les informations contenues à proximité de l'objet sont d'une finesse sans

rapport avec la longueur d'onde, informations qui malheureusement se perdent lorsqu'on s'en éloigne pour être régentées par le critère de Rayleigh. On réalise ainsi les contraintes des deux techniques et les sacrifices à consentir pour améliorer la résolution. La marche inéluctable des technologies nous entraîne pourtant dans cet univers à découvrir et à maîtriser, la fabrication de structures à l'échelle submicrométrique ne pouvant aller sans observation fiable à cette échelle.

Bibliographie

Lemons R.A., Quate C.F., Acoustic microscope-scanning version, *Appl. Phys. Lett.*, 24, 1973, 163-166.

Briggs A., *Acoustic Microscopy*, Ed. Clarendon Press, Oxford, 1992.

Quate C.F., Atalar A., Wackramasinghe H.K., Acoustic microscopy with mechanical scanning. *A review IEEE*, 87, 1979, 1092-1114.

Bertoni H.L., Ray optical evaluation of $V(z)$ in the reflection acoustic microscope, *IEEE Trans. Son, Ultras SU*, 31, 1984, 105-116.

Da Fonseca R.J.M., Ferdj-Allah L., Despaux G., Boudour A., Robert L. Attal J., Scanning acoustic microscopy - recent applications in material science, *Adv. Mat.* 5, 1993, 508-519.

Despaux G., Robert L., Attal J., Girard P., Hadjoub Z., Doghmane A., Scanning acoustic microscopy : reliability in processing high power semiconductor devices, *ISTFA'91, Proc. of the 17th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, Los Angeles, 1991, 119-124.

Ramdani A., Augereau F. Despaux G., Étude de l'efficacité des modes de Lamb dans la signature acoustique $V(z)$, *J. Phys. III, France* 6, 1996, 571-595.

Augereau F., Cros B., Marco J.P., Surface study of cross linking gradients in photopolymers by acoustic microscopy, *Appl. Surf. Sci.*, 32, 1997, 2665-2660.

Da Fonseca R., Saurel J.M., Foucaran A., Camassel J., Massone, Talierco, Boumaiza, Acoustic investigation of porous silicon layers, *J. Materials Science*, 30, 1995, 35-39.

Kulik A. and Attal J., Near Field Scanning Acoustic Microscopy, *Acoustical Imaging*, 20, 1992,.

Prugne C., Van Est J. Cros B., Leveque G., Attal J., Measurement of the viscosity of liquids by acoustic nearfield, *Meas. Sc. & Tech.* (en cours de publication) 1998.