

Dix ans d'acoustique musicale

Xavier Boutillon

Laboratoire de Mécanique des Solides (CNRS UMR 7649)
Département de mécanique
École Polytechnique
91128 Palaiseau CEDEX

Joël Gilbert

LAUM (CNRS UMR 6613)
Avenue Olivier Messiaen
72085 Le Mans CEDEX 9

Christophe Vergez

Laboratoire de mécanique et d'acoustique (CNRS UPR 7051)
31, chemin Joseph-Aiguier
13402 Marseille CEDEX 20

Cet article présente quelques avancées effectuées ces dix dernières années en acoustique musicale, essentiellement dans le domaine de la physique des instruments de musique. Trois thèmes sont abordés :

- l'expérimentation et la simulation, marquées par l'étude directe du musicien, la montée en puissance de l'observation et de la simulation dans le domaine temporel, la finesse des phénomènes pris en compte par la simulation,
- la modélisation physique où des progrès considérables ont été faits dans la compréhension des systèmes d'excitation et du couplage entre les différents champs vibratoires d'un instrument, y compris le champ externe (rayonnement acoustique),
- les transferts technologiques, particulièrement la simulation en temps réel des phénomènes physiques dans des synthétiseurs commerciaux et également l'apparition de systèmes d'aide à la facture.

Retracer 10 ans de recherche d'un domaine scientifique donné est un exercice difficile. Comment analyser toutes les publications relatives au domaine de ces 10 dernières années ? Une solution était de comparer les actes d'un colloque d'aujourd'hui à ceux de son édition d'il y a dix ans : le congrès "Stockholm Music Acoustics Conference", avec sa périodicité de 10 ans (1983, 1993 et 2003) nous a inspiré pour cet article, en particulier par ses deux dernières éditions [1]. Une autre source a été trouvée dans les ouvrages généraux édités ou réédités récemment [2] et dans les articles de synthèse [3].

Les sujets évoqués ici ne couvrent pas l'ensemble des nouveautés en acoustique musicale au cours des dix dernières années mais se concentre sur la physique des instruments de musique. De même, les références bibliographiques ne sont pas exhaustives sur chaque sujet évoqué mais visent plutôt à proposer une illustration ou à donner une voie d'entrée au lecteur.

L'article est construit en trois parties. Dans un premier temps, l'accent est mis sur les outils expérimentaux et d'analyse développés ou remis au goût du jour durant les dix dernières années. Quelques avancées marquantes en termes de modélisation des instruments de musique sont présentées ensuite. Nous terminons avec les transferts de travaux de recherche en acoustique musicale vers le milieu de la facture instrumentale et vers le grand public.

Observations, analyses et simulations

Comme ailleurs, certaines avancées de la recherche en acoustique musicale sont liées aux progrès des outils

expérimentaux et des méthodes d'analyse tandis que d'autres résultats importants ont été obtenus par les techniques éprouvées d'analyse modale, de mesures d'impédance, de calcul et de mesure de rayonnement, d'équilibrage harmonique, etc. L'objectif de cette première partie est de mettre en exergue les moyens expérimentaux, numériques et analytiques récemment développés ou utilisés en acoustique musicale.

Pour fixer les idées, rappelons qu'un instrument de musique dans son environnement peut être représenté par une boucle double (voir figure 1). La boucle intérieure correspond à l'instrument de musique et la boucle extérieure intègre le rayonnement, l'écoute et le jeu de l'instrumentiste.

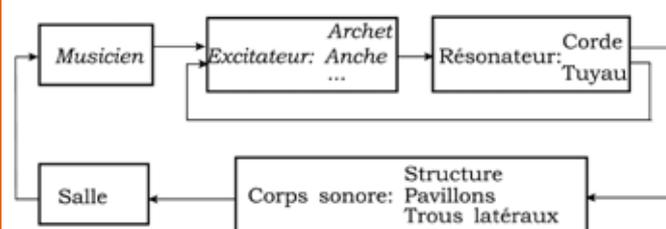


Fig. 1 : Schéma générique d'instrument de musique dans son environnement

Observation et émulation du musicien

Les dernières années sont marquées par la floraison des études de l'interaction (non-linéaire) entre le musicien et l'instrument. Sur le plan expérimental, cela s'est traduit par l'observation directe de l'instrumentiste ou du chanteur en situation de jeu et par la mise au point de dispositifs émulant le musicien.

Avant de passer aux études physiques à proprement parler, il est important de mentionner les études perceptives portant sur le musicien ou sur l'auditeur. D'une part, il est évidemment crucial pour le physicien de savoir si le phénomène auquel il s'intéresse est pertinent ou non pour les acteurs du jeu musical, d'autre part, ces études (nombreuses) ont un intérêt prononcé pour la mise au point des méthodes de synthèse sonore. Pour rester dans le cadre de cet article, l'acoustique des instruments de musique, mentionnons la clarification des effets perceptifs de la modulation de la tension des cordes de guitare [4], la perception des caractéristiques du flux glottique [5] et l'activité de longue date du laboratoire d'acoustique musicale du KTH de Stockholm dans ce domaine [6] : publications récentes sur la sonorité des cordes graves du piano [7] [8], la durée acceptable des transitoires de violon [9], la respiration des chanteurs [10].

Dans la suite des mesures pionnières sur le violon [11], les mesures sur les instrumentistes en situation de jeu ont permis de nous renseigner précisément sur le pincé de la guitare [12], la raideur de l'anche de saxophone [13], les caractéristiques du mouvement des cordes vocales des chanteurs [14], l'impédance acoustique du conduit vocal durant la phonation [15] appliquée au placement des formants chez les chanteuses soprano [16] [17] le mouvement et le contrôle des lèvres des trombonistes, tubistes, etc. [18] [19] [20] [21]. Les caméras rapides (~1000 images par seconde) permettent une observation détaillée de régimes transitoires. L'attention portée au musicien va de pair avec l'observation plus fine de ces

régimes [22], soit par des moyens traditionnels [23], soit par des méthodes spécifiques de traitement du signal : « constant-Q transform » [24], analyses temps-fréquence de type Wigner-Ville, ou autres [25] [26].

L'observation du musicien *in vivo* pose cependant des problèmes évidents pour l'expérimentation physique, problèmes en partie résolus dans le domaine des instruments à vent par la mise au point de bouches artificielles (voir Figure 2) : lèvres pour les cuivres [27] [28], anches simples de clarinette [29], anches doubles de hautbois [30], effet de la cavité buccale [31] qui donnent au physicien des dispositifs à la fois maîtrisables et réalistes. Une retombée possible de ce type de dispositif est leur adaptation en banc d'essai pour la facture instrumentale [32].

Sur le plan conceptuel, l'étude de l'excitation de l'instrument de musique a accentué le recours aux outils de la dynamique des systèmes non-linéaires appliqués aux instruments de musique. Ces outils et concepts ont permis de progresser dans la caractérisation de certains régimes de jeu [33] [34] [35], l'analyse de leur stabilité, l'observation de régimes mal compris jusqu'ici dans un contexte musical [36] [37] et la modélisation des passages entre régimes (voir plus loin).

Observation temporelle de champs physiques complets

L'observation du champ acoustique transitoire ou permanent autour d'un instrument de musique a été rendue possible grâce à des techniques optiques [38]. Par ailleurs, la strioscopie a été largement utilisée par la visualisation de l'écoulement au voisinage du biseau des instruments à embouchure de flûte [39] [40] [41]. Plus récemment, la vélocimétrie particulaire (PIV) a permis de mesurer le champ de vitesse (voir Figure 3) : écoulement à l'embouchure de la flûte [42] et effets acoustiques non-linéaires au niveau de trous ouverts [43].

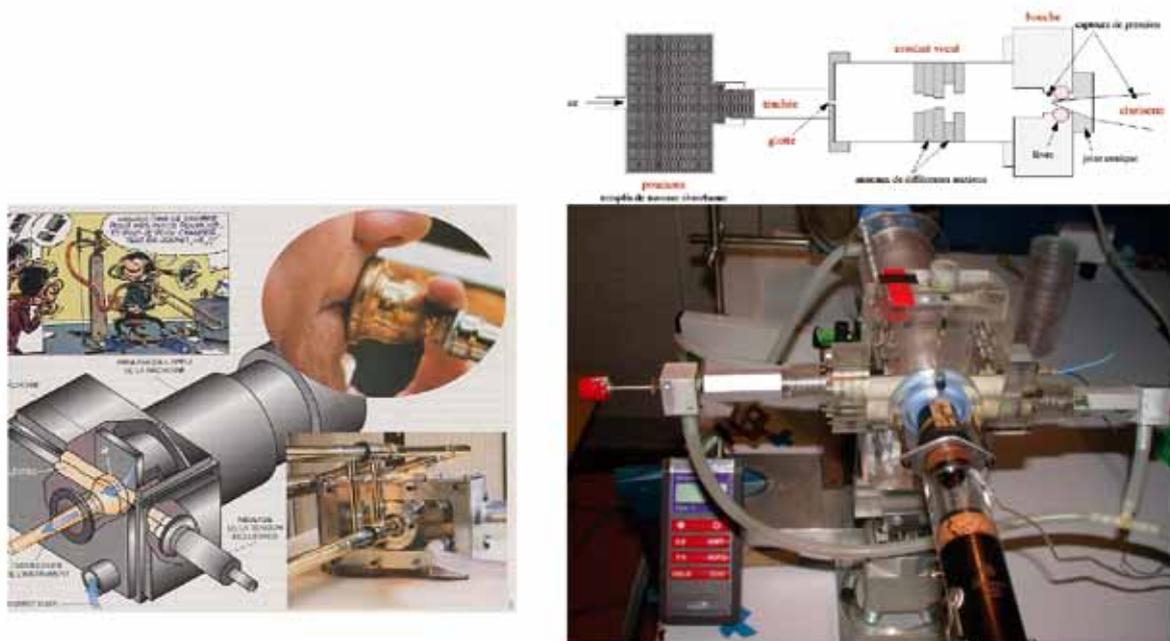


Fig. 2 : Lèvres artificielles pour cuivres d'après [27], et bouche artificielle pour clarinette, d'après [31].

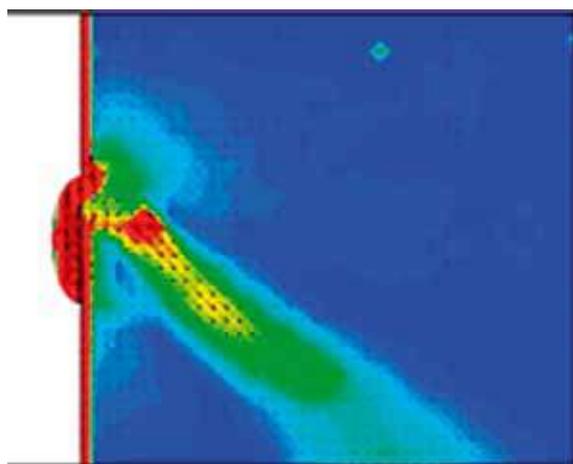


Fig. 3 : Visualisation des champs de vitesse et de vorticité au voisinage d'un trou latéral obtenus expérimentalement par vélocimétrie particulaire (PIV), d'après [43]

Simulation numérique

À la marge de l'acoustique musicale et de l'informatique musicale, la synthèse de sons instrumentaux fondée sur le fonctionnement physique des instruments de musique permet de tester des modèles de fonctionnement. Cette utilisation de la synthèse sonore passe par une comparaison entre un son synthétisé et le son produit directement par l'instrument. Dans le continuum entre la

résolution numérique des équations du fonctionnement et la synthèse sonore orientée vers la production musicale, l'accent est mis sur la rigueur de la résolution pour la première tandis que la deuxième doit avant tout proposer à l'utilisateur des modes d'interaction et de gestion conviviaux (voir plus loin).

Approches par résolution d'équations locales

La modélisation en éléments finis de marimba [44], xylophones [45] convient particulièrement à ces instruments à son non-entretenu, dont la dynamique s'écrit directement à partir de l'analyse modale. Outre une grande finesse de description, la simulation temporelle de la vibration et du champ rayonné de xylophone [46] [47], guitare [48] (voir Figure 4), timbale [49] fait appel à des techniques numériques variées, chaque fois adaptées à leur objet (plaque, champ acoustique, corde) et qu'il faut intégrer dans un même ensemble ; ces simulations offrent de grandes possibilités à la synthèse de sons réalistes au prix d'un coût de calcul important.

Restreintes à la vibration de la corde mais appliquées au traitement détaillé de la non-linéarité d'interaction corde-archet, les études effectuées à Cambridge ont permis de considérables progrès dans la compréhension du jeu du violon [50].

Approches par résolution d'équations globales

Suivant la voie initiée dans [51] il y a plus de 30 ans, on peut analyser l'instrument de musique sous forme de sous-

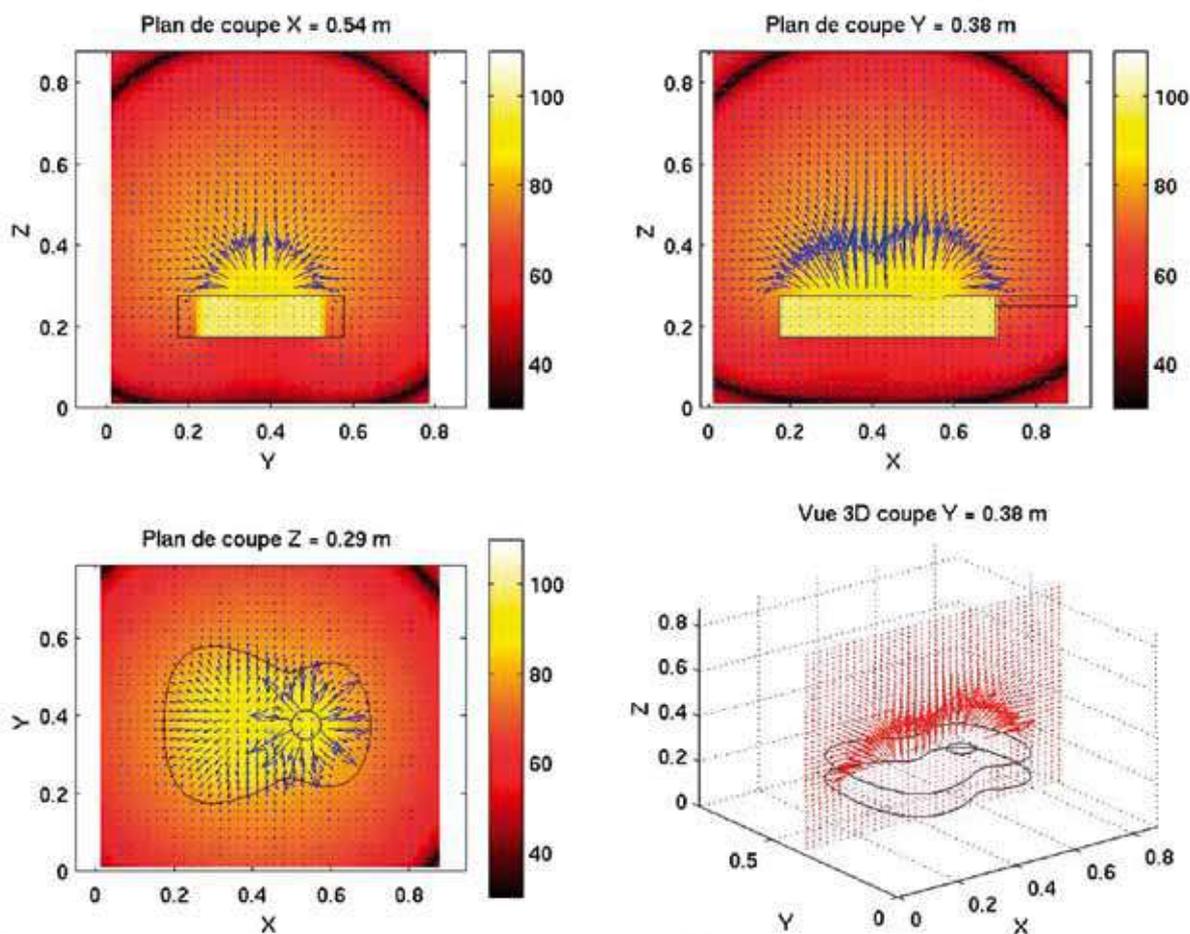


Fig. 4 : Simulation numérique de l'intensité du son rayonné par une guitare à 200 Hz dans trois plans de coupe de l'instrument et en 3D, d'après [48]

parties couplées (corde, table, etc.) représentées par leurs modes ou les ondes qui s'y propagent. Cette approche, qualifiée de « by first principles » ou « *ab initio* » permet de faire varier *ad libitum* les valeurs des paramètres de jeu et tester à l'écoute la pertinence des modèles physiques : modélisations fines du piano [52] et de la guitare [53] [54]. En ce qui concerne les cordes ou les instruments à vent, il est intéressant de tirer parti d'une approximation mono-dimensionnelle pour aboutir à un système à retard [55]. Cette approche est à la base de beaucoup d'études : modélisation de la flûte à bec [56], de la trompette [57], instruments à anche simple [58]. Des études récentes généralisent et étendent ces formalismes [59] [60].

de réflexion, d'en déduire leur perce ; cette technique de « réflectométrie impulsionnelle » [67] [68] a été utilisée pour estimer et comparer les perces de nombreux cuivres de différentes époques [69].

Modélisation

Les moyens expérimentaux développés ces dernières années ont permis des avancées significatives dans la modélisation physique des instruments de musique. Si les instruments à cordes ont été historiquement les premiers appréhendés (voir par exemple les travaux des illustres physiciens Helmholtz [70] et Raman [71]), les instruments à vent sont aujourd'hui les plus étudiés. Cette tendance date sans doute des années 1970-80 (voir par exemple [72] [73]). Par ailleurs, ces dix dernières années voient un net regain d'activité autour des instruments de percussion peu étudiés jusqu'alors.

Instruments à vent

Les approches de la physique non-linéaire ont permis des avancées importantes dans la modélisation des instruments à vent et à cordes frottées dès le début des années 80 [51], permettant une meilleure compréhension de la dynamique de ces oscillateurs auto-entretenus. Un parallèle explicite entre ces deux familles d'instruments a été mis en évidence plus récemment [37] en s'appuyant sur l'étude des oscillations dites de Helmholtz et qui résultent de la présence d'une non-

linéarité localisée au niveau de la source d'excitation sonore : écoulement sous l'anche de clarinette, friction de l'archet sur la corde.

Des phénomènes non-linéaires très spectaculaires ont été mis en évidence dans les résonateurs acoustiques des cuivres : les sons dits « cuivrés », obtenus aux nuances *fortissimo*, résultent d'une forte distorsion de l'onde acoustique dans l'instrument, conséquence d'un phénomène de propagation non-linéaire [74] [75]. S'il était connu [76] que des discontinuités sur le résonateur (changement de section, extrémité ouverte de tube) sont le siège de phénomènes non-linéaires localisés, on a récemment mis en évidence que le décollement de couches limites aux discontinuités entraînent des pertes acoustiques ayant des conséquences en particulier sur la plage de jeu [77]. Pour limiter ces pertes supplémentaires, une solution : arrondir les angles ! La physique linéaire appliquée aux résonateurs acoustiques n'a pas encore dit

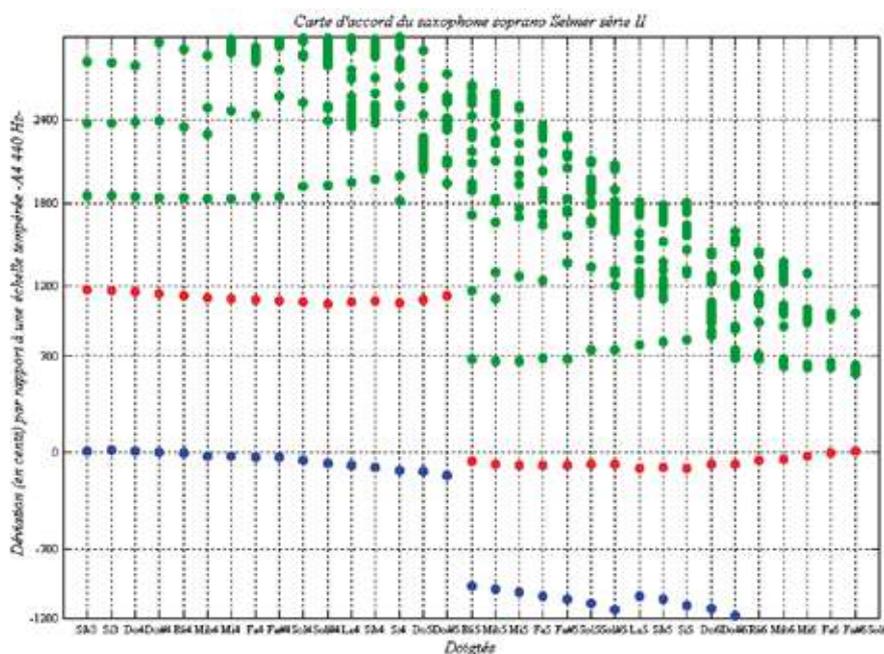


Fig. 5 : Résonances d'un saxophone soprano Selmer Série II pour l'ensemble des doigtés. En abscisses les doigtés en notes écrites, en ordonnées la différence (en cents) entre la fréquence des résonances et une référence tempérée de la note réelle émise (LA4, 440Hz). La première résonance (points en bleu) est proche de la référence, la seconde (points en rouge) est proche de l'octave (i.e. 1200 cents), etc. On constate l'inharmonicité des résonances du premier registre (entre Sib et Do#), le passage du premier registre au second (rejet loin de la ligne de zéro de la première résonance et alignement de la seconde résonance sur cette ligne).

Études d'ensembles

Le traitement modal des instruments (analyse modale, impédance d'entrée des tuyaux, mobilité mécanique des structures) a été considérablement facilité au cours des dix dernières années par l'augmentation des capacités et des vitesses de calcul et le développement d'une instrumentation moins onéreuse. Ces progrès ont permis de changer l'échelle des études réalisées avec ces moyens, passant de l'investigation de quelques doigtés d'un instrument à vent ou de quelques spécimens d'instrument à corde à des études d'ensemble : tessiture complète de la flûte [61] et de la flûte baroque [62], du saxophone (voir Figure 5), de clarinettes [63] [64] ainsi que l'analyse modale systématique ou l'observation modale d'un nombre respectable de violons [65] [66]. La caractérisation des résonateurs acoustiques dans le domaine temporel permet, par la mesure de fonctions

son dernier mot : analyse modale et qualité d'une anche de clarinette [78], couplage de la colonne d'air avec l'anche [79] ou avec la coque qui l'entoure [80] [81] [82], question directement reliée à l'espoir d'élucider en partie le rôle du matériau dans la qualité d'un instrument à vent.

Le développement des bouches artificielles pour instruments à vent (voir plus haut) a permis d'appréhender expérimentalement avec un œil neuf le problème difficile de la modélisation des anches simples [29], des anches doubles [30], des lèvres vibrantes [28], qui sont toutes des sources acoustiques de type aéroélastique par effet valve. À côté des travaux de modélisation physique sur les instruments à anche, dans [83] il a été regroupé une quantité importante de données expérimentales renseignant sur la "soufflerie" de l'instrumentiste.

Concernant la modélisation des instruments à embouchure de flûte, les avancées les plus significatives ont été effectuées au début des années 90, une liste exhaustive des travaux récents est donnée dans [84]. Ces dernières années, les chercheurs se sont attachés à analyser des parties spécifiques de l'instrument : l'instabilité du jet [85], le profil de jet, l'influence du profil du canal guidant l'air vers le biseau de la flûte à bec [41] [42].

Instruments à cordes

La vibration et le rayonnement de la structure de la guitare ont été analysés en détail [86] et modélisés numériquement [48] tandis que d'autres études sont en cours sur des instruments de la même famille comme la harpe [87]. Une partie des études sur le violon se rapporte à la même problématique de transduction de la vibration mécanique de la corde en champ acoustique : propriétés du chevalet et de la caisse à l'origine de la bosse de résonance au chevalet, considérée comme favorable à la sonorité [88], régime de directivité suivant la tessiture et la zone spectrale [89], liens entre amortissements modaux et qualité de l'instrument [66].

Les modèles de vibration de la corde sont de plus en plus détaillés [90] et le mécanisme friction-glissement de l'archet sur la corde, à la base du fonctionnement des instruments à cordes frottées (violon, violoncelle, ...), est de mieux en mieux élucidé : modèles thermiques de l'interface constituée par la colophane [91] [92] [93], incidences de la largeur finie du contact archet-corde sur le jeu [50].

Instruments de percussion

Les instruments à percussion, peu modélisés avant les années 90, ont été l'objet de nombreuses études ces dix dernières années. Pour les instruments à clavier (xylophone, marimba, etc.), les modélisations physiques et numériques ont permis de définir les profils d'accord des lames et le dimensionnement des résonateurs [94]. En s'appuyant sur les connaissances générales de l'élastodynamique, les modèles de contact mailloche-lame ont été développés par une utilisation originale de la théorie de Hertz [46]. Sur les membranophones (timbales, tom-toms, etc.), les apports principaux ont trait à la généralisation des modèles de chocs.

Pour les deux familles d'instruments, la modélisation fine du couplage fluide-structure entre membrane ou lame d'une part, champ acoustique interne à la cavité ou au tube et champ acoustique externe d'autre part, a permis d'élucider les questions d'accord et de rayonnement [49] [47]. Les métallogones constituent la base de nouveaux champs de recherche : analyse et modélisation des «steel drums» [95], des cymbales et des gongs [96]. Sur de telles structures, la richesse des comportements possibles tient aux grandes amplitudes des vibrations et aux non-linéarités géométriques. Cette dernière catégorie d'instruments à percussion offre donc des perspectives d'étude intéressantes. Une synthèse exhaustive des travaux relatifs aux instruments de percussions a été proposée récemment dans [97].

Transferts technologiques

Les travaux de recherche en acoustique musicale à caractère « fondamental » ont généré des transferts vers le milieu professionnel de la facture et plus généralement vers le grand public. En premier lieu l'évolution des moyens informatiques a entraîné des travaux de simulations numériques toujours plus nombreux, un des enjeux actuels étant la simulation en temps réel. En faisant « chanter les équations », il est ainsi possible de faire de la synthèse musicale et de créer des instruments inouïs.

Synthèse sonore par modélisation physique ou instruments virtuels

La synthèse sonore par modèle physique repose sur la simulation numérique du fonctionnement physique d'instruments acoustiques ; elle trouve son origine dans les années 1970-80 [98] [99] [51] et permet de donner l'illusion d'un instrument virtuel réagissant avec un phrasé et des variations de timbre similaires à celles de l'instrument réel. Avec l'apparition du temps réel depuis les années 1990, les modèles physiques sont sortis des laboratoires : le premier exemple commercial est sans doute le synthétiseur VL1 (Yamaha) apparu en 1994 au CCRMA [100] et fondé sur le principe du guide d'ondes numérique. Différentes approches de la synthèse par modèles physiques sont exposées dans [101].

C'est grâce à la démocratisation de la plate forme informatique de ces dix dernières années que se multiplient les applications destinées au grand public. Ainsi depuis plusieurs années, l'IRCAM [102] propose via son forum de distribution Modalys [103], un logiciel utilisant le formalisme modal pour représenter le fonctionnement d'objets vibrants (instruments de musique traditionnels ou imaginaires). La société Applied Acoustics Systems [104] fondée par des chercheurs en acoustique musicale issus de laboratoires propose depuis 1998 des synthétiseurs logiciels utilisant, entre autres, la modélisation physique d'instruments acoustiques (logiciel Tassman [105]) ou électro-acoustiques (piano électriques virtuels, logiciel LoungeLizard [106]).

Depuis 5 ans environ, l'évolution des architectures logicielles a permis la généralisation des « plugins », ou greffons, qui permettent d'apporter des fonctionnalités

nouvelles à un logiciel déjà existant. Ainsi le délai entre l'aboutissement d'une recherche et la mise à disposition du public d'applications se réduit et les possibilités de collaborations entre laboratoires de recherche et industriels se multiplient. En 2005, la société Arturia distribuera un produit fonctionnant sur ce principe et offrant la possibilité de jouer des instruments virtuels développés à la suite de recherches récentes ou même en cours [107] [108] [109]. Les modèles utilisés reposent sur une formulation temporelle du fonctionnement de l'instrument modélisé particulièrement bien adaptée au jeu temps réel (temps de calcul faible). De même, des modèles d'instruments proposés par le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique [110] [111] seront prochainement mis à disposition du public sous forme de synthétiseurs musicaux temps-réel.

Les applications de la synthèse par modèle physique trouvent parfois des applications surprenantes. Une équipe d'ethnomusicologues du laboratoire « Langues, Musiques et Sociétés » [112] a fait appel à des modèles physiques de flûtes Ouldémé pour permettre aux musiciennes un jeu en temps réel [108] afin d'analyser les échelles musicales en vigueur dans cette ethnie du Nord Cameroun. On peut noter que si la plupart des familles d'instrument de musique sont, ou seront prochainement présentes dans des synthétiseurs par modélisation physique, la voix chantée reste encore absente de l'offre aux musiciens. En effet, malgré des recherches avancées sur la modélisation de la production du son par la glotte, et en dépit des similitudes souvent soulignées entre l'auto-oscillation des cordes vocales et celle des anches ou des lèvres, la mise à disposition des musiciens d'un modèle physique de voix chantée apparaît aujourd'hui comme une perspective dont le terme reste difficile à définir.

Nouveaux instruments acoustiques ou instruments étendus

Un des buts de l'acoustique musicale est d'analyser et comprendre le fonctionnement d'instruments de musique existants afin d'en proposer éventuellement des améliorations ou des évolutions. Dans cet esprit, plusieurs études ont été menées pour apporter aux instruments certaines qualités que les matériaux de fabrication traditionnels leur interdisaient. Les matériaux composites ont ainsi été introduits dans la facture instrumentale (pour améliorer selon les cas : la résistance à l'humidité, aux variations climatiques, le coût de revient, le poids ...) aux Etats-Unis à la fin des années 70 et en France dans les années 80. Ainsi, plusieurs prototypes d'instruments (cordes frottées, cordes pincées, table d'harmonie de clavecin) ont été réalisés au Laboratoire d'Acoustique Musicale [113] à cette époque ; les brevets déposés alors sont maintenant dans le domaine public. Aujourd'hui, de nombreuses sociétés commerciales, en France et à l'étranger, distribuent divers types d'instruments (contrebasses, harpes, violons et archets, guitares, clarinettes, etc.). Les facteurs « traditionnels » s'intéressent maintenant à ces techniques : à titre d'exemple, l'association américaine des luthiers de violon organise un atelier d'une semaine cet été autour de la lutherie en composite. Autre exemple, des anches synthétiques sont aujourd'hui commercialisées, qui ne procurent pas encore aux musiciens des sensations toujours aussi satisfaisantes que les anches en roseau.

L'utilisation de matériaux composites comme matériaux de substitution va devenir incontournable dans certains cas : le pernambouc, le palissandre de Rio et l'ébène, utilisés respectivement pour fabriquer les archets, les guitares et les clarinettes, seront prochainement interdits à la vente.

D'autres exemples de transferts des dix dernières années peuvent être cités : une clarinette micro-tonale [114] qui fonctionne par la modification en cours de jeu du volume du bec par le clarinettiste, (hors période, à moins que des entreprises n'ait utilisé ce travail dans les 10 dernières années) la conception d'un système d'assistance aux timbaliers pour l'accord de la membrane en cours de jeu pour produire une nouvelle note. On notera enfin que si leur usage est encore très marginal, les matériaux actifs constituent pour certains une piste prometteuse pour les évolutions futures des instruments de musique [115]. Un projet de violoncelle actif est aujourd'hui initié entre le LAM, l'IRCAM et le compositeur György Kurtág pour une œuvre à créer en avril 2005.

Aide aux facteurs pour la conception d'instruments

Parmi les nombreux outils développés dans les laboratoires de recherche, quelques-uns ont trouvé leur chemin vers la facture professionnelle dans le processus de mise au point de nouveaux instruments : la mesure de l'impédance d'entrée des instruments à vent chez certains industriels (système BIAS par exemple [116]), le calcul de cette même impédance et donc la prévision des fréquences de résonance à partir d'une perce prédéfinie par plusieurs artisans [117]. Un logiciel d'aide aux facteurs et accordeurs de piano a également été développé [118].

Conclusion

Le champ de cet article, la physique des instruments de musique, est adjacent à d'autres champs de connaissance liés à la musique : synthèse sonore, psycho-acoustique et perception de la musique, jeu instrumental (aspects moteurs et cognitifs), traitement du signal musical, etc ... La nécessité d'intégrer plusieurs aspects dans le traitement d'un problème d'acoustique musicale crée ainsi une richesse et une diversité qui rendent la discipline particulièrement attrayante pour les scientifiques. Au plan pédagogique, de nombreuses notions de physique peuvent être exposées au travers du fonctionnement des instruments de musique, ainsi qu'en témoignent les pages web dédiées à l'acoustique musicale [119] [120]. De plus en plus de musiciens se préoccupent du fonctionnement de leur instrument et de l'élargissement de son cadre de jeu (voir par exemple [121] [122]).

Il y a dix ans, le fonctionnement général de chaque classe d'instrument était déjà bien compris. Cette décennie a été marquée par l'étude des phénomènes fins ou particuliers :

- phénomènes non linéaires répartis (propagation non linéaire, non-linéarités géométriques) ou localisés (couplage fluide-structure, lois de contact, discontinuités géométriques dans les résonateurs) ;
- présence et influence du musicien sur la physique du système ;

- détermination des valeurs des paramètres des modèles à partir de l'expérience. Ces paramètres peuvent être relatifs aux matériaux des instruments (caractéristiques du roseau des anches) ou aux gestes des instrumentistes.

Grâce au soutien institutionnel de la recherche (en France, au Royaume Uni et en Suède, par exemple) accru au cours de la décennie précédente, l'acoustique musicale a acquis aujourd'hui la crédibilité souhaitable auprès des musiciens et des facteurs d'instruments. La création en octobre 2001 par le Ministère de l'Artisanat du «pôle d'innovation des métiers de la musique» hébergé à l'ITEMM [123] correspond à ce rapprochement des communautés scientifiques et musicales. Sa mission est d'apporter un soutien technologique aux entreprises de la facture instrumentale, notamment en agissant comme interface entre les professionnels de la facture et les centres de ressources, laboratoires de recherche travaillant en acoustique musicale entre autres.

Si nous devons faire de la prospective, nous évoquerions quelques directions prises récemment en recherche qui répondent aux enjeux d'aujourd'hui et dont nous espérons des résultats dans la prochaine décennie :

- L'inversion, dont le but est de réaliser l'estimation automatique, à partir d'enregistrements d'instruments réels, des paramètres de contrôle des modèles physiques. Une difficulté est liée à la nature non linéaire des modèles. Plusieurs approches sont étudiées : une première méthode consiste à inverser les équations (non-linéaires) sur lesquelles le modèle repose [124] [125], une autre utilise des techniques d'apprentissage automatique [126].

- Le design d'instruments par optimisation : forme des barres de xylophones ou de marimba sur des critères d'accord de chaque barre [127] [128], profils de cuivres [129], des formes de violon [130].

- D'autres recherches répondent à des besoins suscités par des technologies nouvelles. Ainsi la généralisation des bases de données, et du codage de l'information ont-ils contribué à la naissance de l'indexation des sons (classification automatique).

Enfin, après avoir souligné le caractère foisonnant et innovant des recherches en acoustique musicale, on peut légitimement s'interroger sur la non-«évolution des instruments de l'orchestre depuis le milieu du dix-neuvième siècle» [131]. Deux questions se posent : dans une société où tout, y compris l'aspect extérieur des choses, se démode très vite, pourquoi les instruments de musique occupent-ils une place à part ? Comment envisager de concilier perspectives d'innovation et attachement fort à la tradition ?

Remerciements

Nous tenons à remercier C. Besnainou, M. Campbell, R. Caussé, A. Chaigne, J-P. Dalmont, V. Doutaut, B. Fabre, V. Gibiat et J. Kergomard, qui ont eu la gentillesse de répondre à nos sollicitations.

Références bibliographiques

- [1] Actes des colloques Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC) de 1993 et 2003: Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (2 volumes), edited by Anders Friberg, Jenny Iwarson, Erik Jansson, Johan Sundberg, Publications issued by the Royal Swedish Academy of Music N° 79, 1993. Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (2 volumes), edited by Roberto Bresin, 2003.
- [2] Livres de physique des instruments de musique : Hirschberg A., Kergomard J., Weinreich G. eds. (1995). *Mechanics of Musical Instruments*. CISM courses and lectures no. 355, Springer-Verlag, Vienne. Campbell M., Greated C. (1998). *The Musician's Guide to Acoustics*. Oxford University Press (revised version), United Kingdom (reprint). Fletcher N.H., Rossing T.D. (1998). *The physics of musical instruments*. Springer, New-York (reprint).
- [3] Numéros spéciaux de revues dédiés à l'acoustique musicale : *Acustica united with acta acustica* 86 (4), 599-760, 2000. *Acustica united with acta acustica* 90 (4), 579-798, 2004. *Applied Acoustics* 46 (1), 1-130, 1995. *Applied Acoustics* 65 (12), 1131-1287, 2004.
- [4] Tolonen T., Valimäki V. et Karjalainen M. (2000). Modeling of tension modulation nonlinearity in plucked strings. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* 8, 300-310.
- [5] Henrich N., Sundin G., Ambrose D., D'alessandro C., Castellengo M. et Doval B. (2003). Just noticeable differences of open quotient and asymmetry coefficient in singing voice. *Journal of Voice* 17, 481-494.
- [6] Laboratoire d'acoustique musicale du KTH de Stockholm, <http://www.speech.kth.se/>
- [7] Galembo A., Askenfelt A., Cuddy L. et Russo F. A. (2001). Effects of relative phases on pitch and timbre in the piano bass range. *Journal of the Acoustical Society of America* 110, 1649-1666.
- [8] Galembo A., Askenfelt A., Cuddy L. et Russo F. A. (2004). Perceptual relevance of inharmonicity and spectral envelope in the piano bass range. *Acta Acustica united with Acustica* 90, 528-536.
- [9] Guettler K. et Askenfelt A. (1997). Acceptance limits for the duration of pre-Helmholtz transients in bowed string attacks. *Journal of the Acoustical Society of America* 101, 2903-2913.
- [10] Thomasson M. et Sundberg J. (2001). Consistency of inhalatory breathing patterns in professional operatic singers. *Journal of Voice* 15, 373-383.
- [11] Askenfelt A. (1989). Measurement of the bowing parameters in violin playing 2. bow-bridge distance, dynamic-range, and limits of bow force. *Journal of the Acoustical Society of America* 86, 503-516.
- [12] Pavlidou M. (1997). A physical model of the string-finger interaction on the classical guitar. Thèse de doctorat, University of Wales, Cardiff.
- [13] Boutillon X. et Gibiat V. (1996). Evaluation of the acoustical stiffness of saxophone reeds under playing conditions by using the reactive power approach. *Journal of the Acoustical Society of America* 100, 1178-1189.
- [14] Henrich N., d'Alessandro C., Doval B. et Castellengo M. (2004). On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation. *Journal of the Acoustical Society of America* 115, 1321-1332.
- [15] Epps J., Smith J. R. et Wolfe J. (1997). A novel instrument to measure acoustic resonances of the vocal tract during phonation. *Measurement Science & Technology* 8, 1112-1121.
- [16] Joliveau E., Smith J. et Wolfe J. (2004). Acoustics - tuning of vocal tract resonance by sopranos. *Nature* 427, 116.
- [17] Joliveau E., Smith J. et Wolfe J. (2004). Vocal tract resonances in singing: the soprano voice. *Journal of the Acoustical Society of America* 116, 2434-2439.
- [18] Yoshikawa S. (1995). Acoustical behavior of brass players lips. *Journal of the Acoustical Society of America* 97, 1929-1939.
- [19] Copley D. C. et Strong W. J. (1996). A stroboscopic study of lip vibrations in a trombone. *Journal of the Acoustical Society of America* 99, 1219-1226.
- [20] Kourakata I., Moriyama K. et Hara T. (2001). Identification of control parameters for brass player's embouchure by measuring contact pressure on the teeth bucal surface. *JSME International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing* 44, 1142-1151.
- [21] Yoshikawa S. et Muto Y. (2003). Lip-wave generation in horn players and the estimation of lip-tissue elasticity. *Acta Acustica United with Acustica* 89, 145-162.
- [22] Guettler K. et Askenfelt A. (1997). Acceptance limits for the duration of pre-Helmholtz transients in bowed string attacks. *Journal of the Acoustical Society of America* 101, 2903-2913.
- [23] Castellengo M. (1999). Acoustical analysis of initial transients in flute like instruments. *Acta Acustica United with Acustica* 85, 387-400.
- [24] Brown J. C. (1999). Computer identification of musical instruments using pattern recognition with cepstral coefficients as features. *Journal of the Acoustical Society of America* 105, 1933-1941.

- [25] Pielemeier W. J. et Wakefield G. H. (1996). A high-resolution time-frequency representation for musical instrument signals. *Journal of the Acoustical Society of America* 99, 2382-2396.
- [26] Mellody M. et Wakefield G. H. (2000). The time-frequency characteristics of violin vibrate: modal distribution analysis and synthesis. *Journal of the Acoustical Society of America* 107, 598-611.
- [27] Gilbert J., Ponthus S. et Petiot J. F. (1998). Artificial buzzing lips and brass instruments: experimental results. *Journal of the Acoustical Society of America* 104, 1627-1632.
- [28] Cullen J. S., Gilbert J. et Campbell D. M. (2000). Brass instruments: linear stability analysis and experiments with an artificial mouth. *Acta Acustica United with Acustica* 86, 704-724.
- [29] Dalmont J. P., Gilbert J. et Ollivier S. (2003). Nonlinear characteristics of single-reed instruments: quasistatic volume flow and reed opening measurements. *Journal of the Acoustical Society of America* 114, 2253-2262.
- [30] Almeida A., Vergez C., Caussé R. et Rodet X. (2003). Experimental research on double reed physical properties. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference* (2 volumes), edited by Roberto Bresin, 243-246.
- [31] Fritz C., Wolfe J., Kergomard J. et Caussé R. (2003). Playing frequency shift due to the interaction between the vocal tract of the musician and the clarinet. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference* (2 volumes), edited by Roberto Bresin, 263-266.
- [32] Petiot J. F., Teissier F., Gilbert J. et Campbell M. (2003). Comparative analysis of brass wind instruments with an artificial mouth: first results. *Acta Acustica United with Acustica* 89, 974-979.
- [33] Wilson T. D. et Keefe D. H. (1998). Characterizing the clarinet tone: measurements of lyapunov exponents, correlation dimension, and unsteadiness. *Journal of the Acoustical Society of America* 104, 550-561.
- [34] Touzé C., Thomas O. et Chaigne A. (2002). Asymmetric nonlinear force vibrations of free-edge circular plates. Part I: Theory. *Journal of Sound and Vibration* 258, 649-676.
- [35] Debut V. et Kergomard J. (2004). Analysis of the self-sustained oscillations of a clarinet as a Van der Pol oscillator. In *18th International Congress on Acoustics - ICA 2004*, volume II, 1425-1428. Kyoto, Japon.
- [36] Gibiat V. et Castellengo M. (2000). Period doubling occurrences in wind instruments musical performance. *Acta Acustica United with Acustica* 86, 746-754.
- [37] Ollivier S., Dalmont J.P. et Kergomard J. (2004). Idealized models of reed woodwinds. Part I: analogy with the bowed strings, *Acustica united with Acta Acustica* 90, 1192-1203.
- [38] Molin N. E. et Zipser L. (2004). Optical methods of today for visualizing sound fields in musical acoustics. *Acta Acustica United with Acustica* 90, 618-628.
- [39] Fabre B., Hirschberg A. et Wijnands A.P.J. (1996). Vortex shedding in steady oscillations of a flue organ pipe. *Acta Acustica United with Acustica* 82, 693-877.
- [40] Ségoufin C., Fabre B., Verge M.P., Hirschberg A. et Wijnands A.P.J. (2000). Experimental study of the influence of the mouth geometry on sound production in a recorder-like instrument. *Acta Acustica United with Acustica* 86, 649-661.
- [41] Dequand S., Willems J.F.H., Leroux M., Vullings R., van Weert M., Thieulot C. et Hirschberg A. (2003). Simplified Models of Flue Instruments: Influence of mouth geometry on the sound source. *Journal of the Acoustical Society of America* 113, 1724-1735.
- [42] Johansson E.L., Benckert L. et Gren P. (2003). Particle image velocimetry (PIV) measurements of velocity fields at an organ pipe labium. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference* (2 volumes), edited by Roberto Bresin, 321-324.
- [43] Campbell D., Skulina D. et Greated C. (2004). Particule image velocimetry applied to the study of wind instruments. *18th International Congress on Acoustics*, Kyoto, Japon.
- [44] Bork I., Chaigne A., Trebuchet L. C., Kosfelder M. et Pillot, D. (1999). Comparison between modal analysis and finite element modelling of a marimba bar. *Acta Acustica United with Acustica* 85, 258-266.
- [45] Bretos J., Santamaria C. et Moral J. A. (1997). Tuning process of xylophone and marimba bars analyzed by finite element modeling and experimental measurements. *Journal of the Acoustical Society of America* 102, 3815-3816.
- [46] Chaigne A. et Doutaut V. (1997). Numerical simulations of xylophones .1. time-domain modeling of the vibrating bars. *Journal of the Acoustical Society of America* 101, 539-557.
- [47] Doutaut V., Matignon D. et Chaigne A. (1998). Numerical simulations of xylophones. ii. time-domain modeling of the resonator and of the radiated sound pressure. *Journal of the Acoustical Society of America* 104, 1633-1647.
- [48] Derveaux G., Chaigne A., Joly P. et Beache E. (2003). Time-domain simulation of a guitar: model and method. *Journal of the Acoustical Society of America* 114, 3368-3383.
- [49] Rhaouti L., Chaigne A. et Joly P. (1999). Time-domain modeling and numerical simulation of a kettledrum. *Journal of the Acoustical Society of America* 105, 3545-3562.
- [50] Pitteroff R. et Woodhouse J. (1998). Mechanics of the contact area between a violin bow and a string. Part I: Reflection and Transmission Behaviour, *Acta Acustica United with Acustica* 84, 543-562, Part II: Simulating the Bowed String, *Acta Acustica United with Acustica* 84, 744-757, Part III : parameter dependence. *Acta Acustica United with Acustica* 84, 929-946.
- [51] Mc Intyre M. E., Schumacher M. E. et Woodhouse J. (1983). On the oscillations of musical instruments. *Journal of the Acoustical Society of America* 74, 1325-1345.
- [52] Giordano N. et Jiang M. (2004). Physical modeling of the piano. *Eurasip Journal on Applied Signal Processing* 2004, 926-933.
- [53] Woodhouse J. (2004). On the synthesis of guitar plucks. *Acta Acustica United with Acustica* 90, 928-944.
- [54] Woodhouse J. (2004). Plucked guitar transients: comparison of measurements and synthesis», *Acta Acustica United with Acustica* 90, 945-965.
- [55] Barjau A. et Gibiat V. (2003). Delayed models for simplified musical instruments», *Journal of the Acoustical Society of America* 114, 496-504.
- [56] Verge M.P., Hirschberg A. et Caussé R. (1997). Sound Production in Recorderlike Instruments : A Simulation Model. *Journal of the Acoustical Society of America* 101, 2925-2939.
- [57] Vergez C., Rodet X. (1997). Model of the trumpet functioning: real time simulation and experiments with an artificial mouth. *International Symposium on Musical Acoustics (ISMA)*, 425-432, Edinburgh, Scotland.
- [58] Avanzini F. et Rocchesso D. (2002). Efficiency, accuracy, and stability issues in discrete time simulations of single reed instruments, *Journal of the Acoustical Society of America* 111, 2293-2301.
- [59] Ducasse E. (2002). An alternative to the traveling-wave approach for use in two-port descriptions of acoustic bores. *Journal of the Acoustical Society of America* 112, 3031-3041.
- [60] Van Walstijn M. et Campbell M. (2003). Discrete-time modeling of woodwind instrument bores using wave variables. *Journal of the Acoustical Society of America* 113, 575-585.
- [61] Wolfe J., Smith J., Tann J. et Fletcher N. H. (2001). Acoustic impedance spectra of classical and modern flutes. *Journal of Sound and Vibration* 243, 127-144.
- [62] Wolfe J. et Smith J. (2003). Cutoff frequencies and cross fingerings in baroque, classical, and modern flutes. *Journal of the Acoustical Society of America* 114, 2263-2272.
- [63] Dalmont J.P., Gazengel B., Gilbert J. et Kergomard J. (1995). Some aspects of tuning and clean intonation in reed instruments. *Applied Acoustics* 46, 19-60.
- [64] Debut V., Kergomard J. et Laloë F. (2005). Analysis and optimisation of the tuning of the twelfths for a clarinet resonator. *Applied Acoustics* 66, 365-409.
- [65] Geissler P., Martner O., Zerbs C. et Schleske M. (2003). Psychoacoustic investigations on the possibility of aurally identical violins. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference* (2 volumes), edited by Roberto Bresin, 59-62.
- [66] Bissinger G. (2004). Contemporary generalized normal mode violin acoustics. *Acta Acustica United with Acustica* 90, 590-599.
- [67] Amir N., Rosenhouse G. et Shimon U. (1995). A discrete model for tubular acoustic systems with varying cross sections the direct and inverse problems. Part 1: theory. *Acustica* 81, 450-462.
- [68] Buick J.M., Kemp J., Sharp D.B., van Walstijn M., Campbell D.M. et Smith R.A. (2002). Distinguishing between similar tubular objects using pulse reflectometry: a study of trumpet and cornet leadpipes *Measurement Science and Technology*, Volume 13, 750-757.
- [69] Myers A. (1998). Characterization and Taxonomy of Historic Brass Musical Instruments from an Acoustical Standpoint, thesis presented for the Degree of Ph.D., University of Edinburgh.
- [70] Helmholtz H.L.F. (1954). *On the sensations of tone*, Dover, New-York (reprint).
- [71] Raman C.V. (1918). On the mechanical theory of vibrations of bowed strings. *Indian Assoc. Cult. Sci. Bull.* 15, 1-158.
- [72] Benade A.H (1976). *Fundamentals of musical acoustics*. Oxford University Press, New York.
- [73] Nederveen C.J. (1998). *Acoustical aspects of woodwind instruments*. Northern Illinois University Press, De Kalb, Etats-Unis (revised version).
- [74] Hirschberg A., Gilbert J., Msallam R. et Wijnands A.P.J. (1996). Shock waves in trombones. *Journal of the Acoustical Society of America* 99, 1754-1758.
- [75] Msallam R., Dequand S., Caussé R. et Tassart S. (2000). Physical model of the trombone including nonlinear effects, application to the sound synthesis of loud tones. *Acta Acustica United with Acustica* 86, 725-736.
- [76] Ingard U. et Labate S. (1950). Acoustic circulation effects and the nonlinear impedance of orifices. *Journal of the Acoustical Society of America* 22, 211-218.
- [77] Atig M., Dalmont J-P. et Gilbert J. (2004). Saturation mechanism in clarinet-like instruments, the effect of the localised non-linear losses. *Applied Acoustics* 65, 1113-1154.

- [78] Pinard F, Laine B, Vach H. (2003). Musical quality assessment of clarinet reeds using optical holography. *Journal of the Acoustical Society of America* 113, 1736-1742
- [79] Facchinetti, M. L., Boutillon, X., Constantinescu, A. (2003). Numerical and experimental modal analysis of the reed and pipe of a clarinet. *Journal of the Acoustical Society of America* 113, 2874-2883.
- [80] Whitehouse J.W., Sharp D.B. et Harrop N.D. (2001). The use of laser doppler velocimetry in the measurement of artificially induced wall vibrations in wind instruments. *Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics*, Perugia, Italy, 411-414.
- [81] Moore T.R., Shirley E.T. et Daniels A.E. (2003). Trumpet bell vibrations and their effect on the sound of the instrument. *Proceedings of the Stockholm Musical Acoustic Conference (SMAC)*, 213-215.
- [82] Pico Vila R., Gautier F. et Gilbert J. (2004). Study of the input acoustic impedance of a vibrating cylindrical shell : consequences on clarinet-like instrument oscillations. *Proceedings of the joint congress CFA/DAGA'04*, Strasbourg, France, 879-880.
- [83] Fuks L. et Sundberg J. (1999). Blowing pressures in bassoon, clarinet, oboe and saxophone. *Acta Acustica United with Acustica* 85, 267-277.
- [84] Fabre B. et Hirschberg A. (2000). Physical modeling of flue instruments: A review of lumped models. *Acta Acustica United with Acustica* 86, 599-610.
- [85] Nolle A.W. (1998). Sinuous instability of a planar jet : propagation parameters and acoustic excitation. *Journal of the Acoustical Society of America* 103, 3690-3705.
- [86] Hill T. J. W., Richardson B. E. et Richardson S. J. (2004). Acoustical parameters for the characterisation of the classical guitar. *Acta Acustica United With Acustica* 90, 335-348.
- [87] Gautier F. et Dauchez N. (2004). Acoustic intensity measurement of the sound field radiated by a concert harp. *Applied Acoustics* 64, 1221-1231.
- [88] Woodhouse J. (2005). On the «bridge hill» of the violin». *Acta Acustica United With Acustica* 91, 155-165.
- [89] Weinreich G. (1997). Directional tone color. *Journal of the Acoustical Society of America* 101, 2338-2346.
- [90] Woodhouse J. et Loach A. R. (1999). Torsional behaviour of cello strings. *Acta Acustica United With Acustica* 85, 734-740.
- [91] Smith J. H. et Woodhouse J. (2000). The tribology of rosin. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 48, 1633-1681.
- [92] Woodhouse J., Schumacher R. T. et Garoff, S. (2000). Reconstruction of bowing point friction force in a bowed string. *Journal of the Acoustical Society of America* 108, 357-368.
- [93] Woodhouse J. (2003). Bowed string simulation using a thermal friction model. *Acta Acustica United With Acustica* 89, 355-368.
- [94] Bork I. (1995). Practical tuning of xylophone bars and resonators. *Applied Acoustics* 46, 103-127.
- [95] Rossing T.D., Hansen U. J., Rohner F. et Schärer S. (2003). The Hang: A hand-played steel drum. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference*, Stockholm, Sweden, 351-353.
- [96] Touzé C., Thomas O. et Chaigne A. (2002). Asymmetric nonlinear force vibrations of free-edge circular plates. Part I: Theory. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 258, 649-676.
- [97] Rossing T. D. (2000). *Science of Percussion Instruments*. World Scientific Publishing Compagny, Singapore.
- [98] Hiller L. et Ruiz P. (1971). Synthesizing Musical Sounds by Solving the Wave Equation for Vibrating Objects. *J. Audio Eng. Soc.*, Part I: vol. 19, no. 6, June 1971; Part II: vol. 19, no. 7, July/Aug. 1971.
- [99] Weinreich G. (1980). Logiciel "Pianofortran" de synthèse sonore par modèle physique (marteau, cordes, table d'harmonie), IRCAM.
- [100] Center for Computer Research in Musical Acoustics, <http://ccrma.stanford.edu/>, université de Stanford, États-Unis.
- [101] Trautman L. et Rabinstein R., *Digital sound synthesis by physical modeling using functional transformation method*, Kluwer Academic Publishers, New York, 2003.
- [102] Institut de Recherche et de Coordination Acoustique / Musique, <http://www.ircam.fr>
- [103] [http://www.ircam.fr/236.html?&tx_ircamboutique_pi1\[showUid\]=5&cHash=c1753efdb7](http://www.ircam.fr/236.html?&tx_ircamboutique_pi1[showUid]=5&cHash=c1753efdb7)
- [104] Applied Acoustics Systems, <http://www.applied-acoustics.com>
- [105] <http://www.applied-acoustics.com/tassman.htm>
- [106] <http://www.applied-acoustics.com/loungelizard.htm>
- [107] Vergez C. et Rodet X. (2001). Trumpet and trumpet player : physical modeling in a musical context, *International Congress of Acoustics (ICA)*, CDROM n°IV, Rome.
- [108] De la Cuadra P., Vergez C. et Causse R. (2002). Use of physical-model synthesis for developing experimental techniques in ethnomusicology- The case of the Ouldeme flute. *ICMC 2002*.
- [109] Almeida A., Vergez C., Caussé R. et Rodet X. (2004). Physical model of an oboe: comparison with experiments, *International Symposium on Musical Acoustics (ISMA)*, 112-115, Nara, Japon.
- [110] Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, <http://www.lma.cnrs-mrs.fr/>
- [111] Guillemain P., Kergomard J. et Voinier T. (2003). Real-time synthesis models of wind instruments based on physical models. In *Proceedings of the Stockholm Musical Acoustic Conference (SMAC)*, 389-392.
- [112] Langue Musique et Société, <http://www.vjf.cnrs.fr/lms/>
- [113] Laboratoire d'Acoustique Musicale, <http://www.lam.jussieu.fr>
- [114] <http://recherche.ircam.fr/equipements/instruments/cs2000/becvar/default.htm>
- [115] Transforming the sound of musical instruments by active control of the sound radiation, ACTIVE99, Florida, USA.
- [116] Brass Instrument Analysis System, http://iwk.mdw.ac.at/index_e.htm
- [117] http://ourworld.compuserve.com/homepages/philippe_bolton/index2.htm
- [118] http://www.piano-stopper.de/html/mensurix_51.html
- [119] <http://www.phys.unsw.edu.au/music/>
- [120] Groupe Spécialisé d'Acoustique Musicale de la Société Française d'Acoustique : <http://www.sfa.asso.fr/fr/gsam/fichiers/index.htm>
- [121] <http://joeleymard.free.fr/>
- [122] <http://koppreads.com/index.html>
- [123] Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique : <http://www.itemm.fr/>
- [124] Wold E. H. (1987). *Nonlinear Parameter Estimation of Acoustic Models*, Thèse de doctorat, University of California, Berkeley, États-Unis.
- [125] Hélie T., Vergez C., Lévine J. et Rodet X. (1999). Inversion of a physical model of a trumpet. *IEEE CDC : Conference on Decision and Control*. Phoenix Arizona, Décembre 1999
- [126] D'Haes W. (2004). *Automatic Estimation of Control Parameters for Musical Synthesis*. Thèse de doctorat, Université d'Anvers, Belgique.
- [127] Henrique L.L. et Antunes J. (2003). *Optimal Design and Physical Modelling of Mallet Percussion Instruments*. *Acustica united with Acta Acustica* 89, 948-963.
- [128] Petrolito J. et Legge K. A. (2005). Designing musical structures using a constrained optimization approach. *Journal of the Acoustical Society of America* 117, 384-390.
- [129] Brass Instrument Optimization Software, <http://iwk.mdw.ac.at/Forschung/deutsch/optimierung/optimization.htm>
- [130] Tinnsten M. et Carlsson P. (2002). Numerical optimization of violin top plates. *Acta Acustica United with Acustica* 88, 278-285.
- [131] Bijsterveld K. (2004). *Breaking into a World of Perfection: Innovation in Today's Classical Musical Instruments dans Social Studies of Science*. *Social Studies of Science*, 34, 649-674.