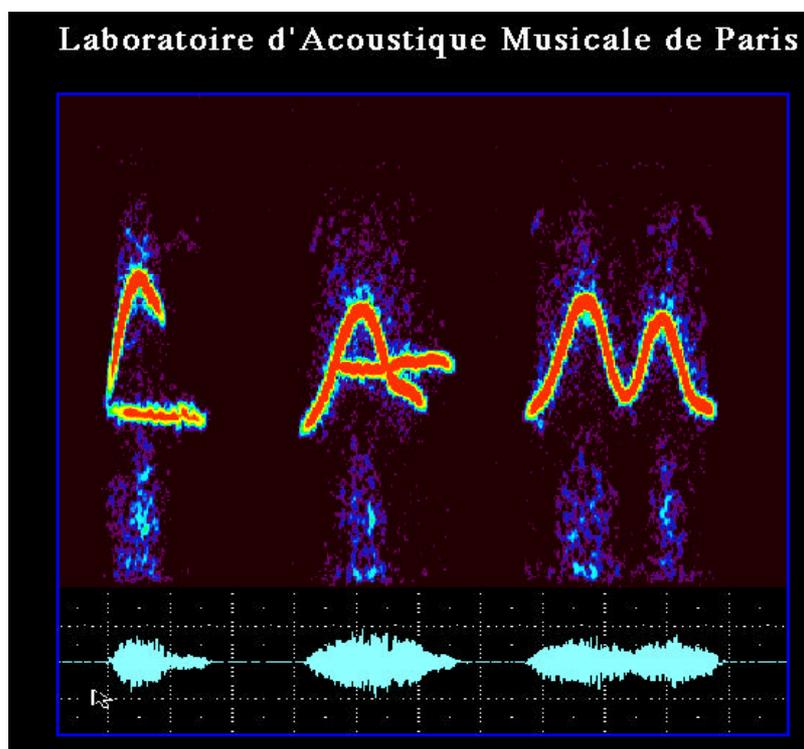


Plan du document

1 . PRÉSENTATION DU LAM.....	1
2 . BILAN DES RECHERCHES PAR THÈME.....	8
<i>Thème 1 : Vibration, Rayonnement, Auto-Oscillation</i>	8
<i>Thème 2 : Analyse physique et simulations d'instruments de musique</i>	13
<i>Thème 3 : Lutherie, matériaux composites & contrôle actif</i>	23
<i>Thème 4 : Caractérisation acoustique et perceptive des sons</i>	27
<i>Thème 5 : Acoustique des salles et de l'environnement</i>	36
<i>Thème 6 : Conservation des enregistrements sonores et audiovisuels</i>	42
3 . PUBLICATIONS.....	47
3.1 - <i>Publications majeures de niveau international</i>	47
3.2 - <i>Les communications avec actes</i>	48
3.3 - <i>Les conférences Invitées dans les congrès internationaux</i>	52
3.4 - <i>Les autres publications</i>	52
3.5 - <i>Rapports de contrasst.</i>	54
4 . FORMATION PAR LA RECHERCHE ET ENSEIGNEMENT.....	55
4.1 - <i>Thèses et mémoires encadrés au LAM</i>	55
4.2 - <i>Thèses et mémoires encadrés hors du LAM</i>	57
4.3 - <i>Enseignement de l'acoustique</i>	58
4.4 - <i>Autres enseignements</i>	59
5 . COLLABORATIONS.....	59

Université Paris 6 - CNRS - Ministère de la Culture
UMR 7604



Rapport d'activité
Laboratoire d'Acoustique Musicale
1997-2000

Adresse : 11 Rue de Lourmel, 75015 - Paris; Téléphone : 01 53 95 43 20; Fax : 01 54 77 16 59.

1 . Présentation du lam

L'Acoustique Musicale : une discipline

Définir l'acoustique est toujours un exercice difficile¹. Si nous posons que l'acoustique est la science du son, et traite de la génération, de la transmission et de la réception des ondes sonores, en quoi l'acoustique musicale est-elle particulière?

Tout d'abord le terme *musical* introduit une dimension humaine qui d'emblée pointe vers d'autres domaines que ceux des sciences physique et mécanique proprement dites. Laissant de côté les aspects artistiques que nous ne sommes pas armés pour aborder, et reprenant la définition générale énoncée plus haut, nous posons que *ce qui fait la spécificité de l'acoustique musicale, c'est la nature du récepteur et son interaction à toutes les étapes de la chaîne acoustique*. Il s'agit d'un récepteur humain. Ce récepteur n'intervient pas seulement en bout de chaîne, mais dès la production. Enfin les préoccupations fondamentales de ce récepteur humain, bien éloignées de nos soucis de mesure, sont : l'identification des sons, et plus particulièrement dans le domaine musical, l'évaluation des *qualités* des sons.

Les instruments de musique, élaborés depuis la plus haute antiquité, sont des objets qui, sous une apparence relativement simple, constituent l'aboutissement d'un savoir empirique très élaboré pour produire des sons complexes, finement variables et extrêmement efficaces à l'oreille. Des détails de leur structure, que l'on peut se croire autorisé à négliger lors d'une modélisation, se révèlent le plus souvent fondamentaux. Par provocation, E. Leipp avait coutume de dire "Une corde tendue sur un manche balai et frottée à l'archet : c'est du violon". S'il est vrai qu'un tel système permet de faire l'étude du système excitateur de l'instrument du même nom joué en musique, il en diffère fondamentalement. Tous les éléments de la structure particulière d'un violon ont un sens, car ils sont le résultat d'un nécessaire compromis entre plusieurs contraintes : les données physiques (matériaux, résistance mécanique, rendement et durée de vie) les contraintes anatomiques (dimensions, poids) et physiologiques d'un être humain (jeu combiné main gauche et main droite) ; l'adaptation du système acoustique aux propriétés de l'oreille humaine (efficacité, justesse); les caractéristiques sonores recherchées dans une culture musicale donnée en rapport avec les possibilités de la lutherie, sans compter la prise en compte des aspects esthétiques. Le problème de l'évaluation des qualités sonores de l'instrument s'inscrit nécessairement dans une connaissance globale de tous les éléments cités. Modifier un instrument pour "l'améliorer" ou créer un instrument nouveau, c'est rechercher un nouvel équilibre entre tous ces paramètres.

Que l'on considère le musicien instrumentiste ou le facteur on voit que la dimension "réception" est nécessairement en boucle avec la génération du son, dès le point de départ, et qu'il faut donc connaître les données de la perception humaine pour étudier de façon

¹ La définition du dictionnaire Robert : "Acoustique. *n.f.* Partie de la physique (en relation avec la physiologie, la psychologie et la musique) qui traite des sons et ondes sonores (nature, production, propagation et réception des sons)" fait preuve d'une ambiguïté toute révélatrice.

pertinente la physique de l'instrument. On pourrait de la même façon analyser les spécificités de l'étude acoustique des lieux de diffusion de la musique et celle des supports de transmission du signal musical, et montrer que *la recherche de qualité sonore*, par ailleurs difficile à paramétrer pour qu'elle soit mise en correspondance avec les caractéristiques physiques, est inscrite dans la conception des instruments de musique et constitue donc une contrainte essentielle de notre discipline.

Dès la création du laboratoire, ce point de vue a été affirmé et a constitué la ligne de conduite de nos recherches. Les nombreux contacts avec les facteurs et les instrumentistes nous en ont confirmé le bien-fondé, et la double formation - scientifique et musicale - des chercheurs en a permis la réalisation au travers de nombreuses collaborations.

Depuis quelques années, plusieurs recherches se développent sur les thèmes de la Ville (Environnement sonore urbain) et du Confort acoustique (bruits domestiques, TGV, habitacles automobiles). Le souci de s'inscrire dans les Programmes de Recherche pour bénéficier de bourses de thèses et favoriser le débouché des étudiants s'est trouvé combiné avec celui de nos préoccupations en recherche fondamentale sur la perception sonore. Nous avons ainsi pu transposer, dans le domaine du bruit, les compétences acquises à l'étude de problèmes musicaux, et en particulier celui de la qualité sonore, concept aujourd'hui au premier plan des préoccupations des acteurs concernés par les problèmes de bruit dans la société.

Le laboratoire

L'année 1993 marque un tournant pour le LAM. C'est d'abord la création d'une UMR - sous l'égide de l'Université Paris 6, du CNRS (SPI) et du Ministère de la Culture (DMD) - qui rassemble un groupe de chercheurs animés par la passion de l'Acoustique Musicale, et qui bénéficient du riche passé de 30 années de recherches développées par E. Leipp. C'est aussi l'année de création d'un DEA original: l'ATIAM (Acoustique, Traitement du Signal et Informatique appliqués à la Musique). Ce DEA national rassemble des équipes de l'IRCAM (Paris), du LMA (Marseille), du LAUM (Le Mans), de l'ENST (Paris) et de l'ACROE (Grenoble). Trois chercheurs du LAM s'y sont particulièrement impliqués : Claude Valette, Benoît Fabre et Michèle Castellengo qui en assure aujourd'hui la responsabilité. Ce DEA a progressivement drainé de jeunes chercheurs désirant approfondir leurs compétences à l'interface "science/musique". Au cours des journées "jeunes chercheurs en acoustique musicale" qui se sont déroulées au LAM au mois de mai dernier, on comptait 25 doctorants en acoustique musicale, dont la moitié sont issus de l'Atiam.

Déménagement du LAM

La période du contrat qui s'achève, 1997-2000 a été riche en événements. A peine remis d'une complète restructuration des locaux de Jussieu², rendue nécessaire par la croissance de l'équipe et par le manque de lieux acoustiquement isolés, nous avons appris, en juillet 1997, la décision ferme de l'Université de commencer les travaux de mise en conformité du campus par la barre des "mécaniciens". La mise en route de l'opération, à une étape d'incertitudes quand au lieu de destination et à la durée de déplacement, a été grande consommatrice de temps, passé en assemblées et réunions de discussions avec les responsables. Finalement, et

² Rappelons que lors de cette première opération (1994 - 1996), les travaux ont été effectués en grande partie sur le budget de l'unité, et ont mobilisé les forces vives de l'ensemble des personnels, doctorants y compris, qui ont assuré seuls le déménagement complet du laboratoire et sa réinstallation.

après une péripétie inattendue³, le LAM s'est retrouvé au 11 rue de Lourmel. Saluons ici l'action conjuguée des responsables de l'Etablissement Public et de l'Université dont l'aboutissement s'est concrétisé par l'installation du laboratoire dans un lieu agréable et calme, doté depuis peu des équipements en studios d'enregistrement et cabines d'écoute⁴. Un des points le plus apprécié de tous est certainement l'unité de lieu. Les conditions de travail et les relations entre tous les personnels s'en ressentent de façon très positive. Enfin la capacité d'accueil de la salle de réunion, nous a permis de mettre en place un séminaire général (voir §7.2) et d'organiser plusieurs cours du DEA Atiam. Le retour sur le campus de Jussieu est prévu pour la deuxième vague, soit en Septembre 2002.

Les recherches : thèses, contrats et Actions Incitatives.

Malgré les remous provoqués par le déménagement du laboratoire la recherche s'est développée et 6 thèses préparées au LAM ont été soutenues en 1998 et 1999.

Dans le cadre de la thématique "perception de l'environnement sonore" nous avons répondu, en collaboration avec le LCPE, à deux appels d'offre des programmes PREDIT, l'un en coopération avec la société Acouphen et l'autre avec la SNCF. La demande présentée à l'ACI "Ville" du Ministère, qui a permis d'obtenir un CDD jeune chercheur pour Corsin Vogel, sera représentée.

Trois axes prioritaires ont bénéficié d'aides sur Action Incitatives du CNRS.

En premier le *Son numérique*, c'est à dire, l'acquisition de programmes professionnels de montage numérique du son (Sonic Solution et Pro-Tools) ainsi que de l'environnement approprié (stations Mac Intosh + cartes d'acquisition; Magnétophones DAT; graveurs de CD). Les chercheurs se sont investis dans cette nouvelle technologie qui permet maintenant de fournir des exemples sonores de haute qualité, et de travailler avec beaucoup plus de possibilités dans le domaine perceptif.

L'aide accordée au thème *Lutherie Matériaux composites et Contrôle actif* a permis d'acquérir un ensemble de contrôle Temps-Réel comprenant la carte "d-space" et les logiciels de traitement spécialisés (matlab, simulink), nécessaires pour le travail de thèse de Rémy Chollet (voir Thèmes 2 et 3).

Enfin l'AI accordée en 1999 à l'axe *aéroacoustique* du Thème 2 a permis d'acquérir l'indispensable matériel de visualisation et de traitement numérique des images (Thème 2).

On trouvera dans les développements de chaque thème, les renvois aux divers contrats listés §6.1

La situation financière du laboratoire est tout à fait satisfaisante grâce aux soutiens des trois tutelles dont les rôles respectifs sont bien complémentaires. Par contre, la gestion proprement dite croît en complexité et en lourdeur et Catherine Fourcin y consacre une part croissante de son temps. Malgré la disparité des modes de gestion mis en oeuvre à l'Université (Nabuco) et au CNRS (X-Lab), nous souhaitons conserver une parité des nos ressources sur les deux institutions afin de bénéficier aussi de solutions propres à chaque type de gestion. Nous en avons fait cruellement l'expérience lors d'un transfert de contrat. Blocages et pertes de temps sont de mauvais souvenirs.

³ Pour des raisons qui n'ont pas été élucidées, le LAM n'a pas été intégré dans le projet d'installation au CEA. Ce contretemps a compliqué la situation. Il a fallu faire un nouveau projet, et le décalage du calendrier de déménagement a eu pour conséquence que le plus gros de l'opération a été supporté en fait par 3 personnes.

⁴ Les derniers travaux : cabine d'écoute sèche, studio de montage Berlioz, labo orgues et cabine audiométrique n'ont été terminés que début 2000.

L'équipe

L'équipe vit et bouge. En 1997 nous avons accueilli Jean-Marc Fontaine, Ingénieur au Ministère de la Culture, travaillant dans le cadre d'une convention de recherche avec la Bibliothèque Nationale de France⁵. Il est en charge du thème 6 : conservation des enregistrements sonores et audiovisuels. Marc-Pierre Verge, recruté comme CR2 en 1995, a obtenu une mise en disponibilité pour créer une entreprise au Canada, afin d'y développer un logiciel de synthèse par modèles physiques. Il a gardé un lien avec l'équipe 2 et projette de réintégrer le LAM en septembre 2001. Jean-Dominique Polack, nommé professeur en 1996, a sollicité trois ans de mise en disponibilité pour mettre en place un enseignement d'acoustique à l'Université Technique du Danemark. Présent une semaine par mois, il assure activement sa participation à 3 contrats de recherche et à l'encadrement de plusieurs thèses. Il prévoit de revenir, d'ici deux ans, riche de son expérience danoise.

La récente reconversion en astrophysique de Claude Valette dont l'équipe disparaît est en quelque sorte compensée par l'arrivée de Vincent Gibiat du Laboratoire Ondes et Acoustiques (ESPCI) et de son groupe, dont l'activité de recherche s'inscrit directement dans nos thématiques tout en la complétant par un volet "acoustique ultrasonore de milieux multi-échelles" du plus haut intérêt pour l'équipe 3.

Par son rattachement au LAM, Daniel Ambroise, MdC à l'UPMC apportera des compétences statistiques qui nous font défaut. Cet apport est particulièrement important pour les études sur le vieillissement du DVD (Thème 6, J.M. Fontaine) et pour le traitement des données résultant des travaux sur la perception. (Thème 4, M. Castellengo)

Depuis septembre 1996 nous bénéficions, en partage avec le LMM des services d'un ingénieur informaticien, Gwenaël Robin, recruté par concours interne affecté. La séparation géographique des deux laboratoires et la croissance effective des tâches se sont soldées par une demande de mutation, en décembre 1999. Nous sommes reconnaissants à la Direction Scientifique du SPI/CNRS de nous avoir attribué un poste AFIP pour lequel le recrutement est en cours.

La collaboration déjà forte avec l'équipe analyse synthèse de la parole du LIMSI va se renforcer dans la perspective d'un rattachement possible d'ici deux ans.

Dans ce contexte, les membres du LAM ont souhaité assurer une continuité de la Direction du laboratoire pour le début du contrat. Compte tenu du départ prévu de Michèle Castellengo, un nouveau Directeur sera donc proposé d'ici peu, au plus tard à mi-parcours.

Perspectives d'avenir

L'équipe

Le Directeur attire l'attention des autorités de tutelle sur l'importance et l'urgence de trouver des solutions pour stabiliser de jeunes docteurs. Ces solutions passent évidemment par des recrutements sur des postes de Maître de Conférence ou de chercheur.

⁵ Jean-Marc Fontaine a effectué deux déménagements coup sur coup, avec un volume de matériel assez conséquent; le premier de Villepreux à Jussieu, en 1997 et le second de Jussieu à la Rue de Lourmel en 1998.

Actuellement les jeunes permanents : Bertrand David et Jean Guérard sont sur des postes de PRAG, solution d'attente qui laisse évidemment trop peu de temps pour la recherche. Laurent Millot, qui a une charge d'enseignement équivalente, se trouve dans les mêmes conditions.

Pour la perception sonore, axe prioritaire du laboratoire dont les nombreux contrats en cours démontrent et l'intérêt et l'importance, le recrutement sur un poste "classique" est extrêmement difficile en raison des cloisonnements thématiques des institutions (Université ou CNRS). Une compétence pluridisciplinaire sérieuse s'acquiert au prix d'efforts souvent peu valorisants au début, et sa maturation requiert du temps⁶. Valérie Maffiolo et Corsin Vogel, actuellement en Post-Doc, en ont pris le risque. Souhaitons que des actions déterminantes puissent être mises en place pour assurer une continuité et permettre que les recherches sur la perception de l'environnement sonore développées par les chercheurs du LAM et du LCPE se développent en bénéficiant des efforts investis.

Les recherches

Les recherches fondamentales sur la physique de la production sonore seront développées: instruments de musique (thèmes 1 et 2) ainsi que la synthèse sonore par modèle physique (thème 2) qui en est en quelque sorte le complément.

De même les recherches globales, pluridisciplinaires, impliquant toutes les approches : facture, jeu, esthétique sonore, histoire organologique, en collaboration avec des facteurs et des conservateurs de Musée. Ceci concerne la lutherie et l'innovation instrumentale (thème 3) et l'étude des instruments traditionnels (thèmes 1 et 4).

L'axe rayonnement des sources et acoustique des lieux (thème 5) est un thème fondamental. Il est relié d'une part à la perception et d'autre part aux thèmes de l'environnement sonore.

Trois sujets pluridisciplinaires pour lesquels une compétence au LAM existe de longue date continuent à se développer d'autant qu'ils permettent de fédérer plusieurs chercheurs et de développer des collaborations : la Voix chantée, l'Orgue et le Piano.

L'expertise en qualité sonore, développée depuis plusieurs années pour les Instruments de Musique et transférée à l'étude du confort acoustique sera fortement soutenue. Deux programmes PREDIT (Environnement et SNCF) sont en cours, une demande au programme Ville sera proposée en collaboration avec d'autres équipes (LCPE, LAUM, CERMA). Un recrutement est indispensable sur ce thème.

L'axe 6, Conservation des enregistrements sonores, est redéfini, en accord avec les orientations de la Direction de la Recherche au Ministère de la Culture, notamment le plan de numérisation et le DVD.

Enfin les recherches de propagation en milieu homogène et multi échelles, qui continueront à se développer en interne dans la nouvelle équipe 1, trouveront progressivement des interactions avec les thèmes des autres équipes.

Un projet de Plan Pluri-Formation est déposé sur le thème "aide à la conception d'instruments composites actifs". Il réunira le LAM, le LMM et deux chercheurs de l'École Polytechnique (LMS et IA), ainsi qu'un facteur de piano.

⁶ Nous nous permettons d'insister sur le fait que la pluridisciplinarité est particulièrement difficile à acquérir lorsqu'elle concerne deux domaines aussi distincts dans leurs enjeux et dans leurs méthodes, que les sciences physiques et les sciences humaines. Si la collaboration entre des équipes de ces deux domaines reste indispensable pour garantir une recherche de qualité, elle ne peut se réaliser pleinement que lorsque au moins un partenaire d'une des deux équipes a une culture pluridisciplinaire, ce qui nécessite un fort investissement de la part de l'autre équipe.

Ainsi, en suscitant des collaborations pluridisciplinaires avec d'autres laboratoires, le LAM s'inscrit pleinement dans le département du SPI du CNRS

Le LAM, maintenant bien intégré à la communauté des mécaniciens de l'Université Paris 6, est rattaché à la nouvelle Ecole Doctorale : Sciences Mécaniques, Acoustique et Electronique de Paris, dirigée par J.C. Guinot

Les liens avec le Ministère de la Culture, qui s'inscrivent dans le cadre du nouvel accord cadre CNRS/Culture signé en 1998, sont renforcés de fait par l'affectation directe de Jean Marc Fontaine au LAM et non plus à la BnF.

Le nombre et la qualité des publications, la liste des contrats, la qualité et la diversité des recherches témoignent de la vitalité de l'acoustique musicale et de la dynamique de l'équipe. Au sein d'une communauté où les produits d'informatique musicale sont en croissance rapide, l'originalité et la force du LAM tiennent à l'enracinement des connaissances dans l'étude de systèmes mécaniques dont nous avons rappelé la complexité au début de cet avant-propos, ainsi qu'à la prise en compte des données de la perception dans une approche originale, distincte de celle de la psychoacoustique traditionnelle. Souhaitons que dans le cadre d'une nouvelle association, le recrutement de jeunes chercheurs permette d'assurer l'avenir d'un domaine de recherches en plein essor.

Michèle Castellengo

31 MAI 2000

Personnel du Laboratoire (1997-2000)**1. ENSEIGNANTS/CHERCHEURS**

AMBROISE	Daniel	MC1	Paris 6
BOUTILLON	Xavier	CR1	CNRS
CASTELLENGO	Michèle	DR2	CNRS Directeur du laboratoire
CUESTA	Christian	MC1	Paris 12
FABRE	Benoit	MC1	Paris 6
POLACK	Jean-Dominique	PR.	Paris 6 disponibilité au 1/8/99
VALETTE	Claude	DR2	CNRS
VERGE	Marc-Pierre	CR2	CNRS disponibilité au 1/9/98

2. ITA

BESNAINOU	Charles	IR2	CNRS
FONTAINE	Jean-Marc	IR1	Min Culture
FOURCIN	Catherine	SARCS	CNRS
ROBIN	Gwenaël	IE2	CNRS mutation au 31/12/99

3. CHERCHEURS POST-DOC

DAVID	Bertrand	PRAG (ENSEA)
GUYOT	Frédérique	(départ le 30/9/97)
GUERARD	Jean	PRAG (IFITEP)
MILLOT	Laurent	Contractuel temps partiel
VOGEL	Corsin	CDD

4. CHERCHEURS PREPARANT UNE THESE

		<i>Financement</i>	<i>Année</i>	<i>Univ</i>
CHOLLET	Rémy	E.N.S.	1999-2002	P6
GUASTAVINO	Catherine	MESR	1999-2002	P6
HENRICH	Nathalie	MESR	1998-2001	P6
MAFFIOLO	Valérie	MESR	1995-1999	P6
MZALI	Myriam	CIFRE	1998-2001	P6
NATHANAIL	Sandie	Projet Eur.	1996-1999	Maine
SEGOUFIN	Claire	DGA	1997-2000	P6

5. VACATAIRES

BERNHARD	Jean-Yves	Ingénieur du son
MAFFIOLO	Cécile	Aide-Bibliothécaire 1/11/98-30/6/99

2 . Bilan des recherches par thème

Tout au long de l'exposé des recherches on trouvera entre [] les renvois à la liste des publications et contrats de recherche donnée .pp. 47 à 54. Les abréviations employées sont :

P = Publication majeure ; C = Communication avec acte; I = Conférence invitée.; A = contribution à ouvrage; CR = Contrat de recherche.

THEME 1 : VIBRATION, RAYONNEMENT, AUTO-OSCILLATION
--

CLAUDE VALETTE

L'accent est mis, dans ce thème, sur la physique des phénomènes utilisés dans les instruments de musique. Deux instruments font l'objet d'une étude détaillée, l'harmonica diatonique et la valiha. Le reste du travail, à visée très générale, utilise les connaissances que nous avons acquises lors d'études détaillées antérieures.

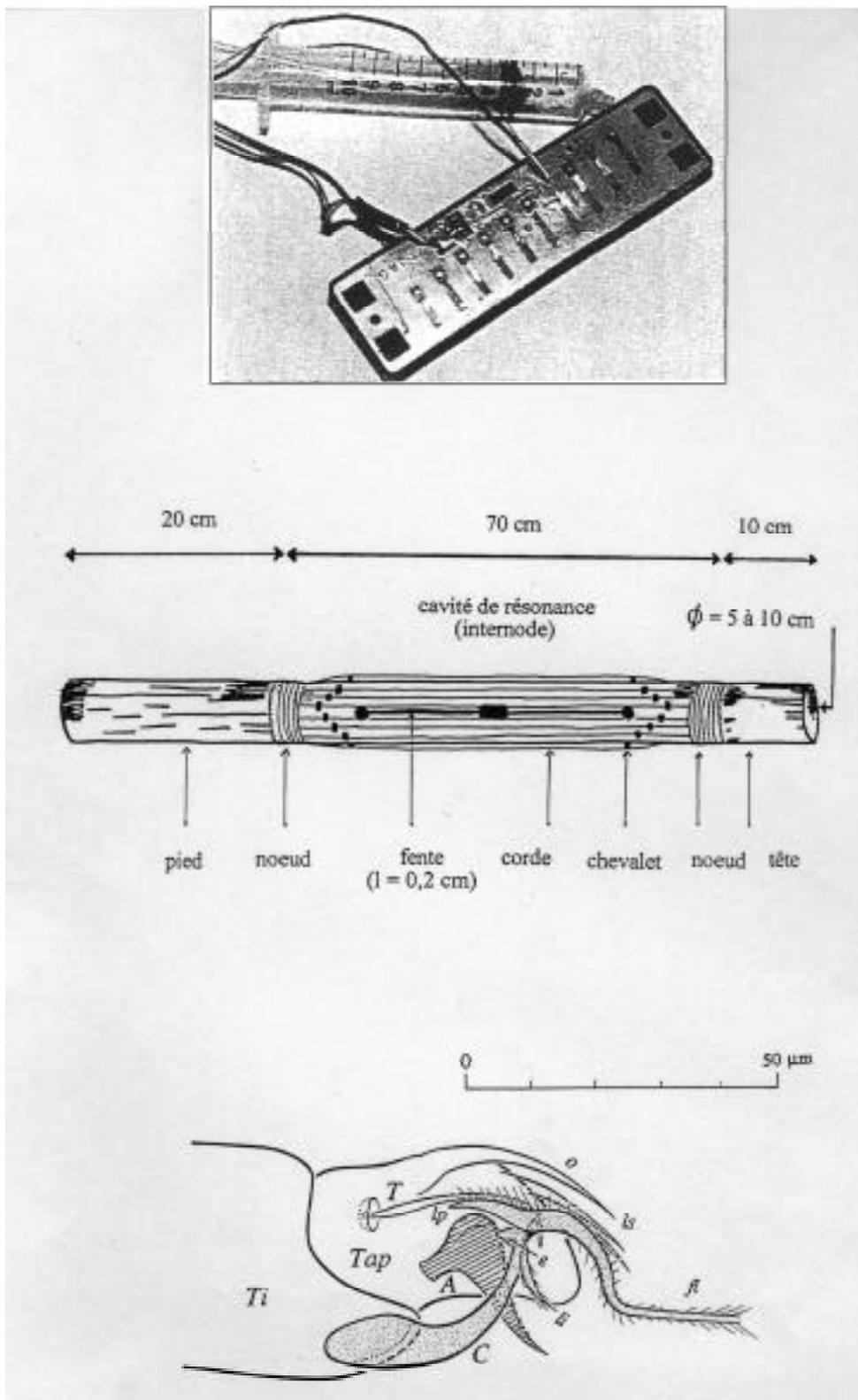
Étude de l'aérodynamique de l'harmonica diatonique (L. Millot)

[Thèse; P 13; C 38; C 39; C 40]

C'est le travail de thèse de Laurent Millot, qui a bénéficié d'une bourse de trois ans dans le cadre du DEA ATIAM. La thèse, intitulée "Étude des instabilités des valves : application à l'harmonica diatonique", a été soutenue le 2 décembre 1999.

Rappelons que notre intérêt pour cet instrument est né suite à une demande de Joël Hanriot, harmoniciste professionnel. Une première étude (Christian Cuesta et Claude Valette) avait cerné la nature des mécanismes à la base des techniques contemporaines de jeu (bend, overblow et overdraw), qui permettent de rendre l'instrument complètement chromatique entre les mains de quelques virtuoses (possibilité de transposer un thème demi-ton par demi-ton douze fois). La nécessité de prendre explicitement en compte la cavité buccale dans le mécanisme d'auto-oscillation lui même, et non simplement dans la modification du timbre comme lors des études antérieures, avait également été établie (stage d'Eugénie Goy).

L'étude expérimentale utilise comme précédemment des jauges de contrainte collées sur les anches, mais elle a été rendue beaucoup plus exhaustive en introduisant un capteur de pression piezorésistif différentiel (pression relative à la pression atmosphérique) : il s'agit d'une jauge miniature de la société Endevco, linéaire de 0 à 14 kHz et de 0 à 14 kPa. La cavité buccale a également été simulée, pour des mesures, au moyen d'une seringue. La figure montre, de gauche à droite, l'arrivée des fils des jauges de contrainte, le capteur de pression miniature et la seringue. Le modèle construit par Laurent Millot permet de rendre compte correctement de tous les modes de jeu existants. Il met en évidence le rôle des paramètres de contrôle mécaniques (forme des anches au repos, réglage de l'offset) ou physiologiques (pression, constriction palatale, position de la langue dans la bouche, positionnement des lèvres). Il répond donc aux interrogations des musiciens et, dans une version plus conviviale, le logiciel pourrait constituer, entre les mains d'harmonicistes professionnels, un outil permettant d'évaluer ce qui est possible ou pas dans les techniques d'overblow ou d'overdraw notamment. L'étude a permis de montrer le rôle des voyelles fricativées dans le contrôle du jeu pour produire, en particulier, les modes avancés.



Mettant à profit le caractère sinusoïdal du mouvement des anches, qui a été précisé quantitativement (mesure du taux de distorsion harmonique), le modèle repose sur les équations non linéaires de l'écoulement dans le conduit vocal et dans l'harmonica, équations qui sont ensuite linéarisées afin de rechercher les conditions d'instabilité. Le conduit vocal est schématisé au moyen de deux cavités et de deux conduits, le premier conduit représentant la constriction palatale, le second les lèvres et le canal d'entrée de l'harmonica. Le modèle de conduit vocal, à deux degrés de liberté, prend donc en compte les deux premières résonances. L'écoulement considéré est à une dimension. On le suppose adiabatique. Au travers des anches, on le suppose irrotationnel et incompressible. Les instabilités sont recherchées en utilisant trois méthodes : la méthode de l'équation caractéristique, celle fondée sur la phase de la surpression amont/aval et celle des admittances acoustiques équivalentes.

Au moyen du modèle, deux pistes pour une synthèse ont été explorées, en calculant le flux volumique sortant des anches. Les résultats sont tout à fait encourageants à l'écoute. Pour aller vraiment plus loin, il faudra résoudre le régime d'auto-oscillation en conservant les équations sous leur forme non linéaire (la linéarisation supprime, entre autres choses, toute possibilité d'un calcul de l'amplitude).

Étude de la valiha (J. Razafindrakoto)

[Thèse]

La thèse de Jobonina Razafindrakoto, "*La valiha de Madagascar : tradition et modernité en Imerina de 1820 à 1995*", a été menée à bien et soutenue le 16 juin 1997 (Paris-Sorbonne, Doctorat de Musicologie, codirection Manfred Kelkel et Claude Valette, mention très honorable avec les félicitations). Rappelons que la valiha, instrument national de Madagascar, est une cithare tubulaire essentiellement diatonique (voir figure). À l'origine, les cordes sont en fibre végétale directement tirées du bambou qui constitue le corps. Maintenant, les cordes sont métalliques, mais elles ont gardé la même disposition sur le corps : progression par tierces de part et d'autre d'une fente centrale au-dessus de laquelle est installée la première corde du grave. La gamme diatonique se monte en alternant les cordes de part et d'autre de la fente centrale, ce qui n'est pas sans rappeler la disposition de l'harmonica diatonique dans lequel la gamme se monte alternativement en soufflant et en aspirant. L'étude comprend des mesures sur les cordes (rôle du matériau explicité), sur le corps résonant, sur l'accordage que réalise chaque musicien dans différents modes, les mesures venant appuyer une étude musicologique de la valiha et de son style de jeu. Un article présentant la partie proprement physique du travail est en phase de correction.

Un système de communication sonore chez les acariens (Y. Coineau; C. Valette)

[P 6]

Ce travail ponctuel a été effectué suite à une demande d'Yves Coineau, professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle. L'étude anatomique d'un spécimen d'acarien provenant du Gabon ayant montré l'existence d'un système susceptible d'exciter des ondes sonores et d'en détecter (voir figure), mon travail a consisté à évaluer les ordres de grandeur pour dire si cette interprétation en termes d'activité physiologique pouvait avoir un sens. L'ensemble du système supposé émetteur-récepteur est constitué par trois phanères. Le poil *C* qui comporte un pied solidement implanté sur le tibia se prolonge par un long flagelle cilié en écouvillon *fl* suspendu sur une structure en ressort. Une languette postérieure *lp* établit le contact avec la trichobothrie *T* implantée sur le tarse et qui se glisse au milieu du ressort de suspension du flagelle. Ce dernier grâce à sa grande surface de contact peut entrer en résonance sous l'effet d'une excitation relativement faible et transmettre ses vibrations à la

trichobothrie. Le dernier article présente en outre un poil hypertrophié *A* solidement implanté et dont l'arête supérieure porte une rangée de dents. La flexion du tarso-apotèle qui le porte par rapport au tibia peut mettre en contact l'épine *e* du poil *C* avec la rangée de dents du poil *A*, provoquant ainsi une microstridulation. Le système mis ainsi en vibration est susceptible d'engendrer une onde sonore qui peut à son tour exciter le système équivalent porté par un congénère (ultrasons de portée relativement courte, vraisemblablement). Ce mécanisme, plausible, constitue une grande surprise car rien d'équivalent n'a été jusqu'ici observé chez les acariens. La confirmation directe par détection sonore sera néanmoins difficile, d'autant que la bête, provenant du Gabon, n'a pas été observée vivante jusqu'ici. Le travail a donné lieu à un article publié dans la revue internationale *Acarologia*.

Vibrations et acoustique, physique des instruments de musique (C. Valette)

[Voir 7.2]

Parallèlement, j'ai souhaité construire une présentation d'ensemble des instruments de musique reposant sur une modélisation physique cohérente. Les quelques ouvrages présentant les instruments de musique à partir de la mécanique me donnent toujours une impression de morcellement, de juxtaposition d'études diverses sans lien profond entre elles. De plus, mon expérience de professeur de flûte me donne une idée précise de ce que pourrait être une présentation de la physique d'un instrument de musique utilisable par un musicien : montrer comment les lois de la physique conditionnent le choix des dimensions, des formes et des matériaux afin de satisfaire aux exigences de base de l'oreille, ne retenir que les éléments les plus simples qui permettent de dégager les paramètres significatifs, en insistant sur le contenu conceptuel et les ordres de grandeur. Je pense que c'est de ce "feeling scientifique" dont on a besoin dans le cadre d'une pratique artistique (musique, facture instrumentale, prise de son etc.). J'ai utilisé mon travail pour concevoir des cours à Louis-Lumière et au DEA ATIAM, j'ai donc une série de textes complètement achevés sous FrameMaker (Acoustique Physique, Vibrations, Electroacoustique) que j'aimerais pouvoir diffuser dans le public pour lequel je l'ai pensé (musiciens, facteurs d'instruments, preneurs de son etc. ayant une culture de base en physique). Si ce doit être un livre, je ne voudrais pas me retrouver avec un prix imposé complètement dissuasif, comme cela s'est passé pour le livre sur la *Mécanique des cordes vibrantes* que j'ai publié avec Christian Cuesta ; si c'est un texte en libre accès sur Internet, il devra rester sur un site abondamment visité.

Reconversion en Astrophysique

Ce n'est pas une confusion de sigle (Laboratoire d'Astrophysique de Meudon pour Laboratoire d'Acoustique Musicale). Ce n'est pas un mélange entre les conséquences d'un même modèle (génération des ondes de choc par la méthode des caractéristiques, enrichissement du timbre du trombone par formation d'ondes de choc dans la coulisse, génération d'ondes de choc dans les nuages d'hydrogène et naissance des étoiles dans les bras galactiques).

J'ai commencé doucement à déborder le cadre strict de l'Acoustique Musicale dans mon travail d'ensemble sur les instruments de musique depuis deux ans. Afin d'approfondir mon inventaire des processus dissipatifs, je me suis replongé dans la mécanique statistique, où j'ai retrouvé sans difficulté la mécanique quantique. Mes lectures sur les transitions de phase ont ramené mon attention sur la notion de rupture de symétrie : j'ai été sidéré de voir comment S. Weinberg établit en quelques lignes toutes les propriétés des supraconducteurs en partant seulement de la rupture de symétrie par invariance de jauge (*The Quantum Theory of Fields*, vol.2 p.332, 1996). J'ai réexaminé tout mon travail sous cet éclairage (rupture d'invariance par renversement du temps, mais conservation de l'invariance par translation le

long d'une paroi avec couche limite, le nombre d'onde restant réel, alors que l'invariance par translation est brisée là où l'instrument rayonne, le nombre d'onde n'étant plus réel). M'étant retrouvé par ce détour dans la cosmologie, je me suis initié en amateur à la relativité générale (S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*). J'ai finalement contacté Alain Léger fin octobre 1999, puis rejoint en cours de route le DEA à Meudon. Alain Léger est l'initiateur du projet Darwin de détection de la vie sur des exoplanètes.

Ma nouvelle orientation implique, naturellement, la disparition de mon équipe, ce qui ne devrait pas poser de difficulté particulière. En effet, le moment est favorable pour deux raisons. Christian Cuesta se trouve maintenant très absorbé par de tâches administratives car il a accepté la direction du Département de Mesures Physiques dans son IUT de Paris 12. Laurent Millot quant à lui commence sa période post-doctorale : deux stages de fin d'étude (INSA de Toulouse et FSMS du Conservatoire de Musique de Paris) devraient respectivement permettre une étude des non-linéarités et des possibilités de synthèse par modèle physique dans le cas de l'harmonica. Parallèlement, un autre stage de fin d'études (FSMS) sera l'occasion de débiter, avec des enseignants de l'ENS Louis lumière, un travail de recherche sur la qualité des stations de travail audionumérique.

THEME 2 : ANALYSE PHYSIQUE ET SIMULATIONS D'INSTRUMENTS DE MUSIQUE

XAVIER BOUTILLON

Structures vibrantes dans les instruments de musique

B. David, X. Boutillon, C.A. Faure, B. Fabre - collaboration H. Vach, M. Facchinetti, Ecole Polytechnique ; G. Weinreich, Université du Michigan.

[P2; P4; P7; P12; C4; C5; C15; C16]

L'objectif est de caractériser finement les structures vibrantes instrumentales en vue de comprendre leurs propriétés musicales. Nous avons travaillé d'une part sur l'analyse paramétrique des réponses à un impact pour en extraire les durées de décroissance modale et d'autre part sur l'exploration des modes propres par holographie interférométrique (coll. Ecole Polytechnique). Les principaux résultats ont été la mesure du rendement acoustique des structures, la caractérisation de l'influence sur un carillon de sa restauration par sablage, une visualisation des dissymétries modales de cloches et la saisie des modes propres d'anches de clarinette en vue d'une simulation numérique de l'instrument complet. Enfin, une étude sur la mobilité mécanique tridimensionnelle a vu son aboutissement au cours de la période ainsi que l'étude dérivée sur la calibration des accéléromètres.

Décroissances modales de structures vibrantes

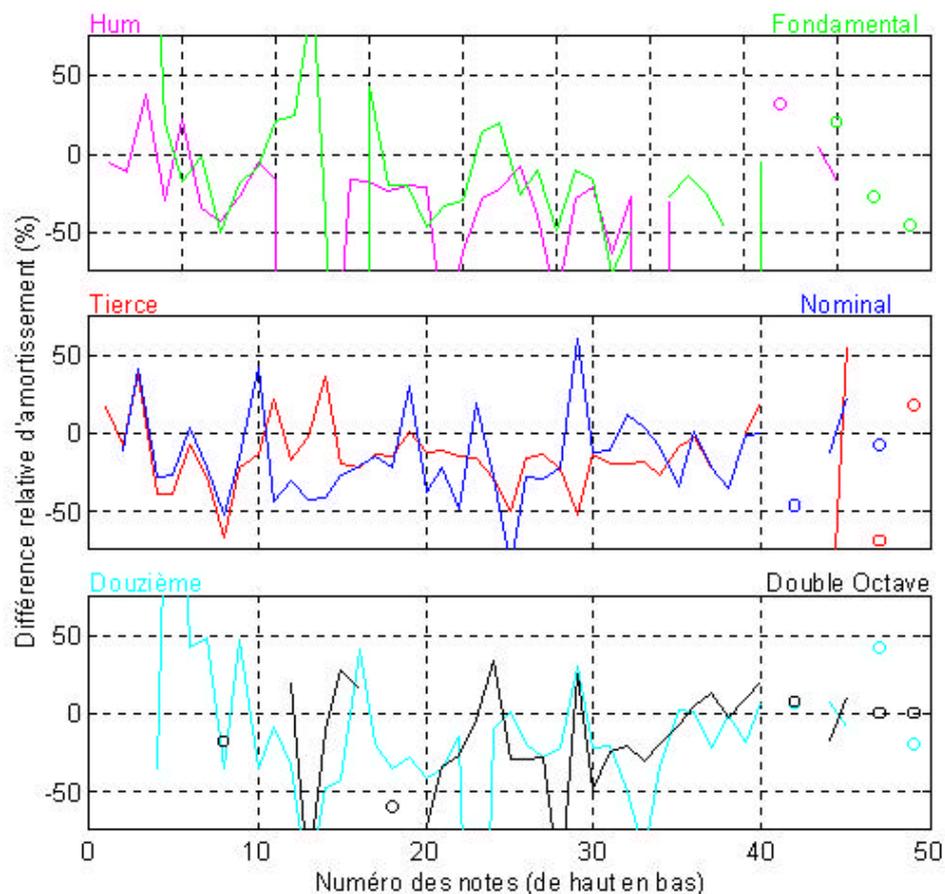
La décroissance modale des structures vibrantes est un paramètre important en acoustique. Sur les instruments à vibration libre (percussions, piano, guitare, etc.), elle a une incidence directe sur le timbre. Sur les instruments à cordes en général, la décroissance des modes de cordes, de caisse (violon, guitare, ...) ou de table (piano, ...) est liée indirectement à l'amplitude du son rayonné *via* leur rendement acoustique. En ingénierie acoustique, l'amortissement est pris en compte de plus en plus finement dans les logiciels de prédiction. Nos recherches comportent une part de traitement de signal et une expérimentation acoustique. Elles ont donné lieu à une application directe en facture instrumentale.

A partir de travaux récents^{7 8}, un algorithme bien adapté à la physique des instruments de musique a été mis au point, capable de résoudre plusieurs modes de fréquences très proches mais de taux de décroissance temporelle très différents, grâce à l'optimisation des paramètres d'analyse et à l'application de pré-traitements (filtrage *ad hoc* et translations de fréquence notamment). La détermination du rendement acoustique repose sur une mesure de *variation* de la décroissance. Une évaluation systématique de la fiabilité des paramètres estimés (incertitude ou marge de confiance) a été réalisée, ce qui représente un progrès important par rapport aux travaux publiés antérieurement et permet d'améliorer considérablement la qualité des résultats.

⁷ Sarkar T. K., Hua Y. (1990), "Matrix Pencil Method for estimating parameters of exponentially dumped/undumped sinusoids in noise", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, **38** (5), p. 814-824.

⁸ Laroche J. (1993), "The use of the Matrix Pencil Method for the spectral analysis of musical signals", J. Acoust. Soc. Am. **94** (4), p. 1958-1965.

Qualification d'une procédure de restauration de cloches - Aide à la facture instrumentale



Variation de l'amortissement des cloches du carillon de Perpignan du fait de sa restauration

Le carillon de la cathédrale de Perpignan, classé Monument historique, a fait récemment l'objet d'une restauration minutieuse. L'étude acoustique dont nous avons été chargés visait notamment à analyser les changements apportés par la restauration sur les fréquences et les amortissements propres des cloches. L'étude a mis en évidence que le sablage n'a pas modifié les fréquences propres mais diminué d'environ 15% en moyenne les amortissements. La mise au point d'une analyse largement automatisée permet également d'envisager de mettre cet outil à disposition des facteurs, très demandeurs de moyens de mesure et d'informations sur les décroissances modales.

Rendement acoustique d'une structure vibrante

L'amplitude du son rayonné est un paramètre primordial pour quasiment tous les instruments. Motivés entre autres par des questions de facture instrumentale (remplacement du bois par des matériaux composites, aux propriétés énergétiques différentes ; vieillissement ou séchage des bois), nous avons entrepris de mesurer le rendement acoustique des instruments à cordes, dans une approche purement quantitative pour l'instant. Les structures étudiées (simples plaques, pour valider l'approche ou instruments complets) sont placées sous

dépression ambiante variable dans une chambre à vide. À pression nulle, le rayonnement acoustique est impossible. Les décroissances modales sont relevées à des pressions ambiantes décroissantes.

Mise sous vide de plaques (métal, composites, bois)

Une fois automatisée la détermination de la décroissance et de la fréquence d'un mode vibratoire, nous avons mesuré le facteur de rayonnement de plaques et leur rendement acoustique en fonction de la fréquence. Les résultats sont conformes aux prédictions théoriques et ont été intégrés aux travaux menés par plusieurs équipes françaises de la Commission C. Valor de validation des progiciels vibro-acoustiques (groupe de travail mixte SFA / SFM). L'accord entre nos mesures et celles réalisées par d'autres équipes ou prédites par des logiciels est remarquable et valide du même coup cette nouvelle approche du rayonnement acoustique des plaques.

Les premières mesures sur des tables d'harmonie de violon en composite ne sont pas encore assez précises pour en déduire directement le rendement. On peut toutefois l'estimer inférieur à 10% dans les cas mesurés (en dessous de 1500 Hz). Le problème vient de ce que la précision sur la mesure de la décroissance est considérablement dégradée pour les décroissances rapides (une plaque de bois sonne beaucoup moins longtemps que son homologue métallique. La solution que nous avons commencé de mettre en œuvre consiste à comparer dans le vide et dans l'air les modes des cordes fixées sur l'instrument, à décroissance plus longue.

Résultats sur la guitare

Un modèle simple décrivant le couplage corde-chevalet en terme d'admittance permet d'expliquer un résultat surprenant : certains partiels de la vibration de corde présentent des amortissements *plus forts* dans le vide. En analysant les conditions du mouvement de la structure, *entraîné par celui de la corde*, on trouve que la décroissance est plus forte dans le vide si l'impédance au chevalet est essentiellement dissipative et qu'elle est à l'inverse plus faible si l'impédance est essentiellement réactive. Le rendement acoustique peut être déduit dans chacun des cas à partir de la mesure de la décroissance temporelle des modes de cordes en fonction de la pression statique. Nous trouvons⁹ un rendement acoustique compris entre 15% et 60% sur une plage de fréquence 80-2500 Hz.

Déformées modales de cloches

Nous avons utilisé la visualisation des modes propres des structures mécaniques par holographie laser dans un contexte pédagogique (projets expérimentaux de l'École Polytechnique) pour mettre en évidence comment une asymétrie structurelle levait la dégénérescence des modes d'une structure à symétrie axiale. Ce travail montre également comment les deux modes issus de cette brisure de symétrie sont situés l'un sur un minimum et l'autre sur un maximum local de l'énergie de vibration.

Déformées modales d'anches de clarinette

cf. "simulation numérique de clarinette"

⁹ David B. (1999), "Caractérisations acoustiques de structures vibrantes par mise en atmosphère raréfiée", thèse de Doctorat de l'Université Paris 6.

Excitation des instruments à vent

B. Fabre, X. Boutillon, M.P. Verge, C. Ségoufin ; coll. Université Technique de Eindhoven, Université Chalmers, Université du Michigan.

[P3; P6bis; P10; P16; P17; C2; C43; C44; C45; I5; I6; I7; A3; A4 A5]

Instrument à embouchure de flûte

L'étude du fonctionnement physique des instruments à embouchure de flûte (flûte à bec, tuyau d'orgue, flûte traversière etc...) mêle différents aspects : acoustique, mécanique des fluides, aéro-acoustique, culture instrumentale (facture, organologie, techniques de jeu). L'objectif que nous poursuivons reste modeste dans le sens où la facture instrumentale intègre bon nombre de raffinements visant à améliorer la sonorité des instruments que l'approche physique ne permet pas de comprendre dans l'état actuel de nos connaissances. Dans le cadre global des modèles de fonctionnement qui sont développés au LAM depuis 1988, il s'agit actuellement de tenter d'interpréter certains points de facture comme par exemple la courbure interne d'un canal de flûte à bec, l'arrondi du biseau, les « dents » pratiquées sur le « fond » d'un tuyau d'orgue. Ainsi, certaines études menées au LAM sont déclenchées par un souci de compréhension de certains « détails » dont la culture instrumentale (facture, techniques de jeu, organologie) nous enseigne l'importance.

Les outils mis en œuvre pour ce travail sont

- l'expérimentation (mesures acoustiques, visualisation de l'écoulement¹⁰) sur des instruments, des instruments à géométrie simplifiées (idéalisées) ou des sous-parties d'instruments (jet libre, jet + biseau etc...)
- la simulation d'écoulement : Fluent, Reduced Navier-Stokes [LMM], Castem [CEA], Boltzman réseau
- la modélisation : intégration dans un modèle global des descriptions des interactions localisées
- la synthèse sonore (validation perceptive)
- les collaborations avec des facteurs d'instruments : discussions, réalisation d'instruments adaptés aux contraintes expérimentales

Afin d'enrichir le travail des différents points de vue cités plus haut, ces études s'effectuent en collaboration avec divers institutions ou personnes :

- au sein même de notre UFR : Laboratoire de Modélisation en Mécanique (LMM)
- le Laboratoire de Dynamique des Fluides de l'Université Technique de Eindhoven (Pays-Bas)
- le Laboratoire de Simulation Numérique des Ecoulements Fluides – SINUMEF de l'ENSAM-Paris
- l'IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique Musique)
- des facteurs d'instruments : Jean-Yves Roosen, Claire Soubeyran (flûtes traversières), Jean-Luc Boudreau, Henri Gohin (flûtes à bec) , Munetaka Yokota (Orgues).

¹⁰ Une aide spécifique accordée en 1999 par le CNRS nous a permis de mettre en place un dispositif optique de visualisation de l'écoulement par striescopie rapide (100ns) intégrant une caméra rapide haute définition. Voir la figure présentée plus bas.

- la Société Applied Acoustic Systems : synthèse sonore par modèles physiques.

Les recherches menées au LAM sur les instruments à embouchure de flûte peuvent être classées en trois phases dont les deux dernières se sont déroulées dans les quatre années écoulées :

- Analyse des interactions écoulement/champ acoustique en vue d'obtenir un modèle global de l'auto-oscillation
- Etude du comportement du modèle au regard des données expérimentales
- Analyse détaillée de certains « points durs » du modèle

Analyse des interactions écoulement/champ acoustique

Les différents éléments ont tout d'abord été décrits: formation et comportement instable du jet, nature dipolaire des sources acoustiques associées au mouvement du jet au biseau, source large bande associée à la turbulence dans l'écoulement, formation de tourbillons au biseau par décollement de l'écoulement induit par le champ acoustique, entretien de l'oscillation acoustique dans le résonateur. Les modèles couramment utilisés dans la littérature ont été analysés, critiqués, dénoncés pour certains, au regard des données expérimentales. Des modèles simplifiés ont été proposés.

Etude du comportement du modèle

Nous avons intégré les éléments dans un modèle global de l'auto-oscillation. L'analyse du comportement du modèle confrontée à des données expérimentales permet d'en apprécier la pertinence ainsi que les limitations. Le modèle a ainsi pu être testé au moyen de :

- bilans de puissance : détermination de l'amplitude d'oscillation en régime stationnaire
- linéarisation : détermination du seuil basse pression d'oscillation
- synthèse sonore par modèle physique : validation perceptive.

Les modèles développés ont ainsi pu être validés (comportement global et ordres de grandeur) pour des jets laminaires, ce qui correspond à une gamme de pression d'alimentation correspondant au jeu « standard » de la flûte à bec. Cependant, certains éléments du modèle font l'objet, par manque de connaissance physique, d'une description très simplifiée. Citons à titre d'exemple : le modèle d'oscillation du jet est un modèle linéaire correspondant à un profil de vitesse du jet de type Bickley ; le détail de la perturbation transversale du jet par le champ acoustique et en particulier l'influence des chanfreins que l'on trouve dans la flûte à bec n'est pas apprécié. Ces éléments constituent les « points durs » faisant l'objet de la troisième phase. Avant de la décrire, notons cependant que les résultats obtenus en terme de synthèse sonore ont été particulièrement remarquables et ont maintenant trouvé une application commerciale dans le logiciel de synthèse développé par la société canadienne Applied-Acoustics-Systems.

« Points durs »

Afin de pouvoir interpréter physiquement des points de facture comme le rôle des chanfreins cité comme exemple ci-dessus, il est nécessaire d'étudier certaines interactions écoulement / champ acoustique avec plus de détails. Les travaux ont porté sur :

- l'effet de la courbure interne du canal de la flûte à bec
 - Le premier paramètre de facture visé dans cette étude est la longueur du canal. Alors qu'un écoulement de type Poiseuille se forme si le canal est assez long, le profil de vitesse interne au canal montre des couches limites plus fines dans le cas d'un canal court. Nous avons en premier lieu observé expérimentalement

l'influence de la longueur du canal sur le fonctionnement global de l'instrument (seuils de fonctionnement et de changement de régime, amplitude et spectre du signal de pression interne au résonateur). Nous avons par la suite développé une interprétation des résultats expérimentaux basée sur l'analyse du comportement instable du jet en fonction de son profil de vitesse (voir figure 1). Ce dernier est déduit par raccordement du profil interne au canal puis on procède à la résolution de l'équation de Rayleigh pour l'amplification spatiale sur un jet infini. Les profils estimés ont pu être validés par des mesures de vitesse au fil chaud en sortie du canal réalisées par nos collaborateurs hollandais ainsi que des simulations directes de l'écoulement suivant trois techniques différentes : logiciels Fluent, Reduced Navier-Stokes (LMM), Castem (CEA). Enfin, le comportement instable du jet soumis à une excitation acoustique transversale est étudié expérimentalement dans le cadre des projets actuels faisant appel au montage de visualisation de l'écoulement. La figure 2 montre les coefficients d'amplification spatiale obtenus pour un canal court et un canal long et la figure 3 le comportement observé lors d'une excitation acoustique contrôlée (haut-parleur).

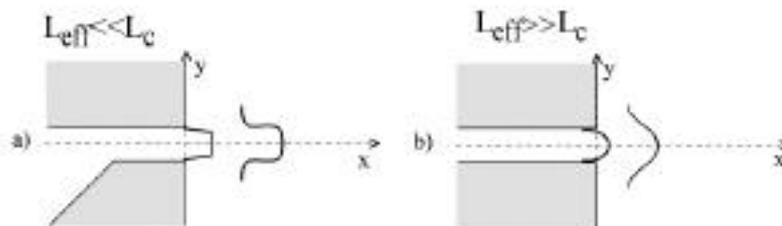


Figure 1 : profils de l'écoulement interne et externe au canal d'une flûte à bec pour un canal court (a) et un canal long (b)

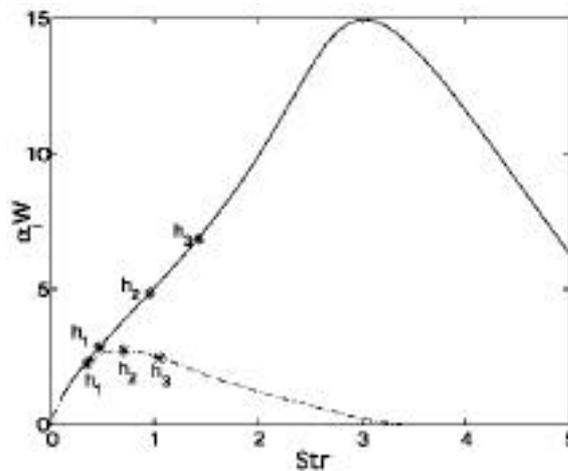


Figure 2 : Variation en fonction de la fréquence réduite du coefficient d'amplification spatiale d'une perturbation sur un jet issu d'un canal court (trait plein) et d'un canal long (trait pointillé). Les fréquences des trois premiers harmoniques en jeu à pression faible dans un tuyau d'orgue expérimental sont portées (*) pour référence.

- Le second paramètre est la courbure interne du canal. La convergence du canal que l'on observe couramment dans les flûtes à bec a été étudiée. Son effet sur le profil de vitesse du jet a été évaluée par les techniques citées ci-dessus. Une première interprétation à été proposée.

- le rôle des chanfreins

Des mesures expérimentales ont montré l'effet important de stabilisation de l'oscillation apporté par les chanfreins présents en sortie du canal.

- l'influence du système en amont du canal : bouche du flûtiste à bec ou pied du tuyau d'orgue.

Il s'agit ici d'apprécier le rôle de résonateur acoustique que constitue le réservoir intermédiaire : la bouche du flûtiste à bec ou le pied du tuyau d'orgue. En effet, les fluctuations de pression dues à la résonance acoustique dans le tuyau sont, au point de formation du jet ou lumière, du même ordre de grandeur que la pression statique du réservoir. Aussi, si le canal ne filtre pas trop et n'amortit pas trop le phénomène, on assiste à des fluctuations de la vitesse du jet. Des mesures ont été effectuées sur un tuyau d'orgue, qui montrent grâce à un modèle basé sur l'équation de Bernoulli en régime variable, que les effets des résonances de la cavité intermédiaire sont très fortement atténués. Dans le cas de la flûte à bec, les fluctuations de vitesse du jet ainsi générées induisent des pertes dont l'ordre de grandeur est comparable aux pertes visco-thermiques dans le résonateur.

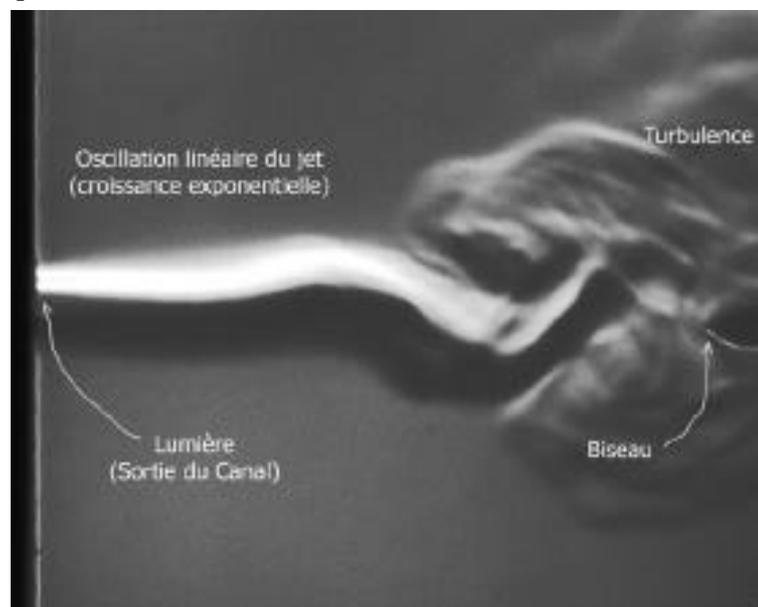


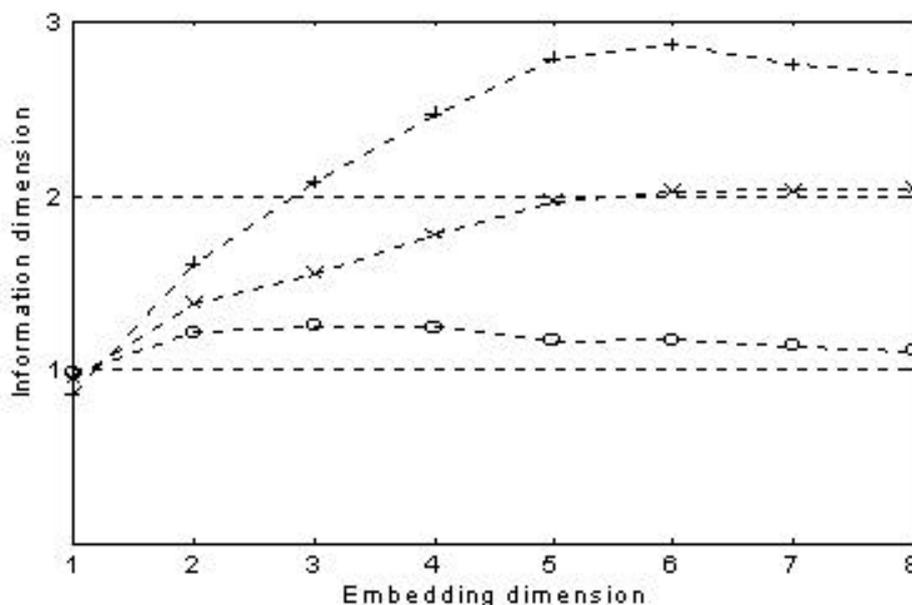
Figure X

Figure 3 : Visualisation par strioscopie du comportement instable d'un jet soumis à une excitation acoustique forcée par haut parleur. Epaisseur du jet : 1mm, Reynolds : 650 , excitation acoustique transversale : 150 Hz.

Anches lippales

Les cuivres (trompettes, trombone, cor, etc.) ont pour excitateur les lèvres de l'instrumentiste qui forment une anche dite forte, dans la mesure où sa vibration possède une certaine autonomie par rapport au tuyau. Les élèves s'exercent d'ailleurs à générer un son en utilisant la seule embouchure. Les observations directes du mouvement des lèvres montrent que les deux lèvres ne vibrent pas de façon identique et que le mouvement de chacune est assez complexe. Il nous a donc paru intéressant de chercher à connaître combien de degrés de liberté étaient impliqués dans la dynamique des lèvres en vibration autonome, couplées à la seule embouchure. La méthode consiste à enregistrer une séquence aussi stable que possible (un système humain n'est pas parfaitement contrôlable) au voisinage de l'embouchure ; cette

série temporelle est ensuite analysée par des techniques utilisées dans l'étude des systèmes dynamiques non-linéaires (c'est évidemment le cas ici) au fonctionnement éventuellement chaotique : la quantité d'information H_n (ou entropie du signal) est calculée pour différentes dimensions de plongement¹¹ de la série et différentes résolutions (en nombre de bits). On détermine ainsi la dimension d de l'attracteur sur lequel évolue le signal représentatif de l'état du système. La figure montre que la dimension de l'attracteur est 1 lorsqu'un trompettiste souffle dans un résonateur de Helmholtz à résonance renforcée, 2 lorsque le couplage entre lèvres et résonateur est diminué par l'insertion d'un bouchon acoustique et 3 lorsqu'un débutant souffle dans l'embouchure seule (son de "buzz"). D'autres essais semblent montrer que l'attracteur du son de "buzz" n'a pas la même dimension pour un professionnel et pour un joueur moins expérimenté.



Dimension d'information, pour différentes situations physiques.

Simulations d'instruments de musique

M.P. Verge, B. Fabre, X. Boutillon, J. Guérard – coll. A. Hirschberg, Université technique de Eindhoven; A. Constantinescu, M. Facchinetti, Ecole Polytechnique.

[P18; C25; C46; I8; I9; A13]

Synthèse par modèles physiques

Nous avons mis au point un programme permettant de simuler en temps-réel le fonctionnement des instruments à embouchure de flûte. Ce travail a été réalisé en collaboration avec des chercheurs du laboratoire de dynamique des fluides de l'Université de

¹¹ Gershenfeld N. (1993), "Information in dynamics", in *Proceedings of the Workshop on Physics and Computation*, edited by D. Matzke, 276-280, IEEE Press, Los Alamitos, CA.

Technologie d'Eindhoven aux Pays-Bas. La synthèse sonore est réalisée à partir d'un modèle aéro-acoustique décrivant l'écoulement dans l'embouchure de l'instrument. Ce modèle permet de simuler le comportement instable du jet, son interaction avec le champ acoustique du résonateur, la formation de tourbillons aux différentes arêtes de l'embouchure ainsi que le bruit de turbulence. Le résonateur est modélisé à l'aide du formalisme des guides d'onde digitaux. Le programme permet d'ajuster, dans une certaine mesure, la géométrie du résonateur. Une application de ce travail est la synthèse sonore pour la musique. Ainsi le modèle peut être "joué" en le contrôlant à l'aide de signaux MIDI. Marc-Pierre Verge, qui menait ces travaux, a obtenu de la part du CNRS une mise en disponibilité pour la création à Montréal, d'une entreprise spécialisée dans les logiciels sonores pour des applications musicales et de post-production.

Simulation hybride de flûte

Dans ce type de réalisation, l'embouchure de l'instrument est conservée telle quelle et peut être jouée par le musicien. Le corps de l'instrument est remplacé par un court tuyau muni de microphones et d'un haut-parleur. Un calcul effectué en temps réel par un DSP à partir des signaux microphoniques (traités en analogique au préalable) permet de séparer les ondes dans le tuyau selon leur direction de propagation. Un autre calcul permet de commander le haut-parleur de sorte qu'il substitue à la fonction de réflexion naturelle du tuyau de remplacement (muni de ce haut-parleur) une fonction de réflexion souhaitée ; ainsi, on recrée à l'embouchure une pression acoustique en principe identique à celle qu'on aurait avec un instrument naturel. On peut donc émuler des modifications du résonateur de l'instrument sans en altérer la perce, la répartition des trous, etc. mais par simple changement des paramètres du calcul. La première flûte à bec hybride ainsi réalisée joue dans son premier registre sur une octave environ et octavie normalement.

Une corde virtuelle frottée par un archet réel avait été réalisée précédemment selon un principe semblable : le mouvement de Helmholtz avait été obtenu mais la plage de stabilité était extrêmement réduite.

Simulation numérique de clarinette

En collaboration avec des collègues de l'Ecole Polytechnique, nous avons effectué une simulation numérique d'une clarinette complète prenant en compte les différents modes propres de l'anche, la non-linéarité de contact et un modèle simplifié d'écoulement. L'anche est modélisée en éléments finis (CASTEM, validée par une analyse modale préalable), ainsi que la première partie du conduit acoustique ; dès lors que les ondes deviennent planes à l'intérieur du tuyau, on peut les modéliser par une simple impédance acoustique, raccordée à ce qui précède. La non-linéarité de contact entre l'anche et le bec est prise en compte et l'action du flux d'air entre l'anche et le bec est modélisée par une loi de Bernoulli. L'approche retenue consiste à projeter les conditions aux limites (variables dans le temps) sur la base modale du système et à calculer ainsi pas à pas le fonctionnement dynamique de l'ensemble anche - jet d'air (simplifié...) - tuyau (complet). Les premières simulations obtenues sont très encourageantes et constituent une première dans le domaine. L'objectif est de parvenir à étudier les effets des propriétés d'une anche prise dans sa complexité.

Autres

X. Boutillon, B. Fabre, M.P. Verge, J. Guérard ; coll. M. Dauvois, Institut de Paléontologie humaine.

[P11; C3; C47; C13; C14; C26; C27; C28; A1; A2]

D'autres travaux, reliés au cadre développé plus haut, ont été menés : sur le fonctionnement des tuyaux sonores, sur la mécanique de piano (point développé dans les projets de l'équipe).

La mise au point du programme de synthèse sonore de flûte par modèle physique, a surtout reposé sur un développement des connaissances du mécanisme d'excitation ; il a toutefois fallu développer également un modèle fin du résonateur ce qui nous a amené à travailler les cheminées latérales des tuyaux sonores.

Le travail de simulation de flûte hybride s'inscrit dans un cadre plus large de contrôle actif de son dans un conduit pour lequel existe un modèle explicite de propagation. Nous sommes ainsi parvenus à réaliser un contrôle d'au moins 40 dB sur plusieurs kHz. Une autre application réside dans la réflectométrie et la mesure de profils de conduits acoustiques.

Les études de paléoacoustique – , sifflets, flûtes préhistoriques, acoustique en grotte ornée, lithophones – ont donné lieu à des communications variées et sont maintenant achevées.

THEME 3 : LUTHERIE, MATERIAUX COMPOSITES & CONTROLE ACTIF

CHARLES BESNAINOU

La période 1996-2000 a été marquée par la poursuite du développement d'instruments de musique de qualité en matériaux composites. Ces instruments ont acquis leurs lettres de noblesse auprès des luthiers et des musiciens les plus exigeants. Ainsi s'est établie une collaboration avec un luthier de violon de grande renommée, Joseph Curtin aux États-Unis. Par ailleurs, les deux derniers CD du concertiste Rafaël Andia ont été gravés grâce à une guitare classique fabriquée au LAM. Le contrôle actif appliqué aux instruments de musique est entré dans une nouvelle phase avec Rémy Chollet, normalien qui en a fait son sujet de thèse (co-direction avec Xavier Boutillon). Un vaste projet sur le piano a commencé à se structurer avec plusieurs acteurs (voir plus loin : prospective). D'ores et déjà, les résultats d'une étude préliminaire modélisant la table d'harmonie de piano ouvrent des perspectives intéressantes dans la compréhension et la modélisation du savoir-faire des artisans facteurs.

Matériaux composites (sujet initié en 1986) (Ch. Besnainou; S. Vaiedelich, E. Marandas)

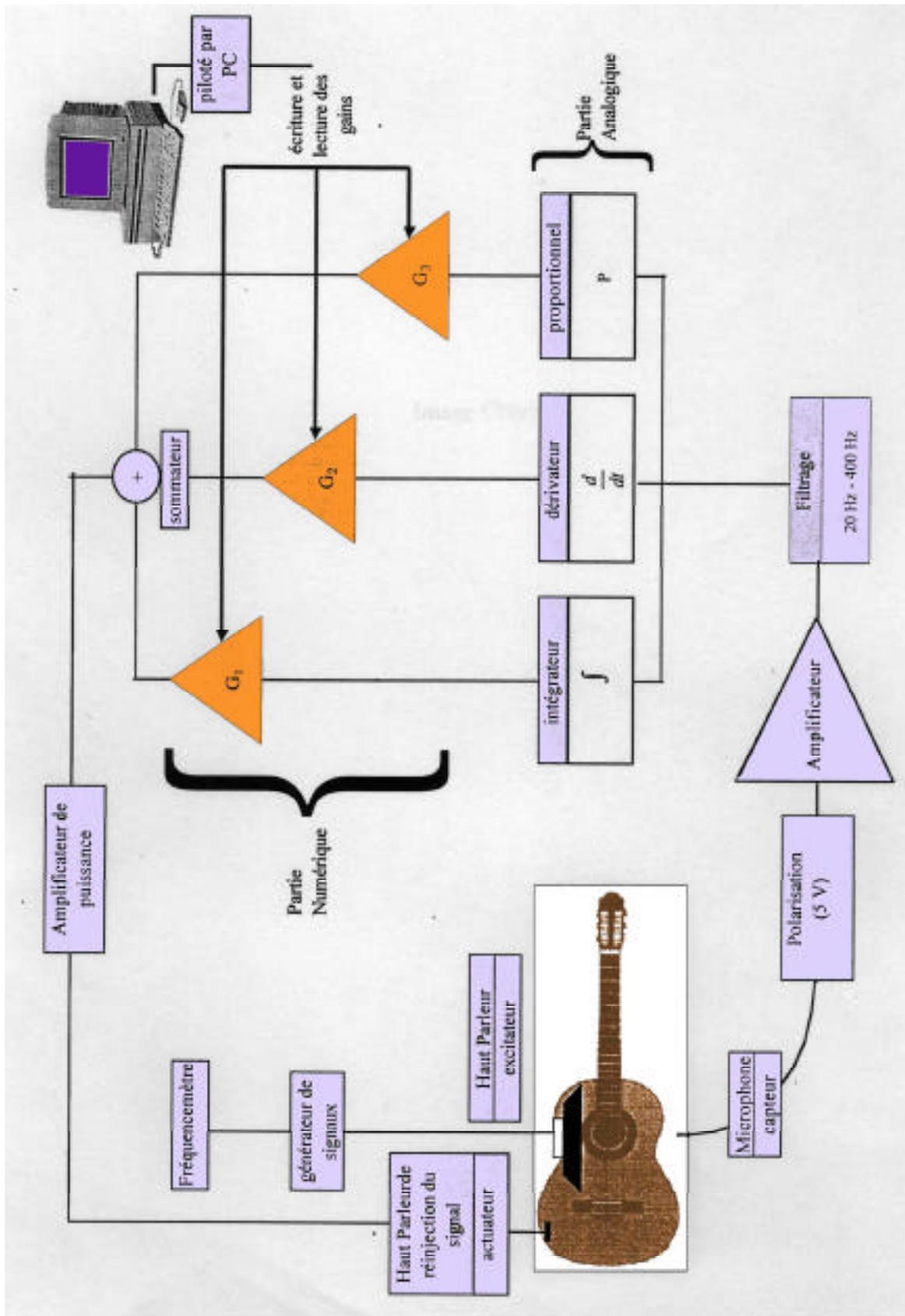
[I1; I2; C13]

Dernier avatar dans les tentatives de transfert de technologie vers une PME de la lutherie du quatuor à corde, le contrat de collaboration, *violon 2000* avec la société *Aubert-Moinier* de Mirecourt pour la réalisation industrielle d'un violon d'étude en composite s'est soldé par le dépôt de bilan de la société en 1997. Les raisons en sont essentiellement l'incapacité de cette société à maîtriser sa trésorerie. Nous ne sommes pas les seuls à être amers, tous les partenaires de ce projet (prototypiste en injection, fabricant de moules, bureau d'étude calcul de structure, stylicien, habillage et texture, le LAM) qui s'étaient largement impliqués au-delà de leur rémunération ont assisté, impuissants, à l'abandon du projet qui en était dans la phase finale de présérie.

Le procès en appel qui nous opposait à la société *ATN International* a été conclu en février 2000 : les juges ont reconnu au CNRS le droit de résilier la licence qu'il avait précédemment octroyée ; d'autre part, ils ont aussi condamné *ATN* à payer les redevances impayées au CNRS, de plus ils lui ont interdit de produire et de vendre des instruments utilisant la technologie mise au point au LAM. Il reste que cette société continue de produire et de proposer à la vente des instruments selon notre technologie !

Néanmoins, la conception d'instrument de musique en matériaux composites est maintenant arrivée à maturité. La qualité acoustique est reconnue par les musiciens et plusieurs facteurs sont demandeurs de formation à ces nouvelles technologies. J'ai été invité au dernier congrès international d'acoustique à faire une conférence faisant le point sur la question à Seattle (ICA 98). J'ai par ailleurs été invité à animer un atelier sur ma pratique des composites destinés à des professionnels de la lutherie lors du dernier ISMA 98 dans l'état de Washington. Quelques semaines auparavant Joseph Curtin, luthier à Ann Arbor, Michigan, m'invitait dans son atelier pour être initié aux composites, depuis nous poursuivons une riche interaction [voir II.2.5].

En mai 1998, avec Eric Marandas, artisan réparateur de piano, nous avons amorcé une collaboration fructueuse en "retablant" un piano droit avec une table composite. Les résultats, plus qu'encourageants, nous ont décidé à concevoir un projet plus vaste sur le piano.



Contrôle actif appliqué aux instruments de musique : la synthèse sonore par stimulation modale [S3M] (sujet démarré en 1993) (R. Chollet)

[C1: C8]

Changer la voix des instrument de musique tout en conservant la relation privilégiée entre le musicien et son instrument. Les résultats de base ont été obtenus dès 1995, en particulier grâce à deux types de contrôleurs de la boucle de réaction : 1) contrôle actif en fréquence, phase et amplitude (CAFP), 2) contrôle actif par impulsions codées (CAPIC). Ces ensembles utilisent les techniques analogiques qui réclament pour chaque fonction de contrôle un réglage spécifique qui malheureusement anile le précédent. En 1998, le CNRS nous a accordé une Action Incitative sur Programme (AIP) de 100 kF pour l'achat d'un ensemble numérique temps réel *d-space* dévolu a ce projet. Avec un tel système, chaque fonction de contrôle peut être ainsi pérennisée et stockée en mémoire.

Bien que le projet *violon 2000* ait contenu la participation de Charles Besnainou à la S3M, les travaux se sont poursuivis avec plusieurs étudiants dont j'ai encadré les stages (voir liste § 4.1).

1996, Rémy Chollet (DEA EEA) : étude d'un nouveau type de contrôleur à commande proportionnelle, dérivée, intégrale (PID), système issu de l'automatique, qui se révèle plus souple d'utilisation que les précédents.

1997, Guillaume Aeberli (DEA ATIAM) : réalisation d'un tel contrôleur PID pour la *Modification de la résonance de Helmholtz de la guitare par contrôle actif* dans une version hybride (semi-analogique, semi numérique, voir figure) avec l'aide de Jean Guérard (thésard). Ce travail est la préfiguration d'un projet visant à évaluer les contributions respectives de la caisse et de la table dans le rayonnement de la guitare. Publication acceptée au 5^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lausanne 2000.

1997, Éric Nabor (DEA ATIAM) : Implantation sur une carte DSP "temps réel" du contrôleur numérique PID. Tout ce travail sera repris lorsque l'on recevra l'ensemble *d-space*.

1998, Renaud Deback (PFE INSA de LYON) : étude d'un capteur-actionneur destiné à la *Modification de l'impédance de couplage entre la corde et le chevalet du violon par contrôle actif*.

En 1999, débute la thèse de Rémy Chollet intitulée *Étude des propriétés musicales des instruments à cordes en utilisant le contrôle actif*. Prise en main préalable de la carte *d-space*.

Modélisation d'une table de piano (J. Frelat; V. Maurel)

Il s'agit d'une étude de faisabilité pour comprendre le rôle de la précontrainte que les facteurs de pianos inscrivent dans une table d'harmonie préalablement à la mise sous la charge du plan des cordes. Ce travail de modélisation et de calcul n'aurait pas pu être mené sans la collaboration de Joël Frelat (CR) du Laboratoire de Modélisation en Mécanique.

En 1999, Vincent Maurel (DEA ATIAM), dans une *Étude préliminaire au rayonnement d'une table de piano précontrainte* établit qu'avec une précontrainte donnée, les cinq premiers modes de vibrations de la table du piano peuvent avoir une efficacité de rayonnement de plusieurs ordres de grandeurs supérieurs, comparés à ceux de la même table sans précontrainte. Ces résultats sont le point de départ du projet piano développé plus loin.

Encadrement

Citons 4 projets de recherche qui ont donné lieu à des études ponctuelles.

Perception de la qualité acoustique des archets de violon, Bénédicte St-Loubry, (DEA ATIAM); 1996

Étude mécanique et perception de la qualité acoustique d'archets de violon, Clotilde Louvain, maîtrise de mécanique, Université de St Quentin-en-Yvelines. 1996

Étude comparative de différentes marques de cordes de violon, Emmanuelle Peter, CNSM, classe d'acoustique musicale du Conservatoire de Paris, 1999,

La sourdine du violon, Sophie Charlet, CNSM, classe d'acoustique (ibid) 1999

THEME 4 : CARACTERISATION ACOUSTIQUE ET PERCEPTIVE DES SONS

MICHELE CASTELLENGO

L'objectif principal de ce thème de recherche concerne l'étude des processus perceptifs, mis en jeu dans l'écoute des phénomènes sonores, qu'il s'agisse de musique, pour laquelle nous avons une compétence particulière, ou de bruits au sens général.

La tâche des psychoacousticiens consiste à mettre en relation les grandeurs manipulées par les musiciens: hauteur, intensité, durée, timbre, avec les paramètres du signal sonore. Or, depuis que nous avons développé aussi notre recherche dans le domaine des sons de l'environnement, nos connaissances en perception sonore se sont approfondies. En effet, il a été nécessaire d'introduire deux niveaux dans la perception sonore. Au premier niveau intervient la reconnaissance du son : voix, bruit mécanique, cri animal. C'est l'écoute de type événementiel ou encore causal, qui constitue l'essentiel de notre écoute de l'environnement sonore. Elle s'effectue inconsciemment aussi lors de l'écoute musicale, bien que nous ne la sollicitons que rarement. En effet, les sources sonores habituelles de la musique sont totalement prévisibles (piano, voix, batterie..). L'écoute musicale porte donc moins sur les sons en eux-mêmes que sur les rapports des grandeurs acoustiques qu'ils véhiculent. C'est donc, à un deuxième niveau de perception, une écoute qualitative des propriétés des sons dans leurs relations mutuelles. Lorsqu'elle s'impose en musique, l'écoute événementielle mobilise l'attention et perturbe l'écoute musicale proprement dite. Elle peut resurgir à l'audition de musiques inhabituelles (cultures étrangères, musiques d'avant garde) et surtout lors de l'utilisation de bruits.¹²

Cette prise en compte de deux niveaux d'écoute, causale et qualitative, permet par ailleurs d'aborder l'étude du timbre dans une approche renouvelée. Elle a permis également de poser clairement le problème de l'étude de la qualité sonore des bruits de l'environnement, en remettant au premier plan des questionnements, la sémantique sonore. Nous posons comme préalable que tout son fait sens pour un auditeur. Ce n'est qu'en deuxième lieu que l'on peut rechercher les raisons des qualités perçues et pour ce qui concerne l'environnement, les notions d'agrément ou de désagrément. De la même façon, l'étude des qualités timbrales des sons musicaux (clair, "chaud") ne peuvent être abordée que dans le cadre d'une catégorie instrumentale définie, connue des auditeurs.

L'analyse que nous venons de présenter s'appuie sur une recherche de longue date, dont les premiers éléments ont publiés en 1986. Elle n'aurait pu aboutir sans une collaboration étroite avec une équipe de psychologues et plus particulièrement Danièle Dubois, psycholinguiste.

¹²P. Schaeffer décrit avec beaucoup de détails les problèmes qui l'ont conduit à développer une écoute de type nouveau pour les musiques qu'il créait avec des bruits enregistrés. (*A la recherche d'une musique concrète*, éd. du Seuil, Paris, 1955)

1 - Méthodologie générale de la recherche en Perception sonore : (Groupe de recherches : LAM : Michèle Castellengo et J.D.Polack Polack- LCPE : Danièle Dubois et Sophie David)

[C 37; C49; C50; A5; A10]

La méthode générale de recherche en perception sonore que nous avons progressivement mise en place au LAM est originale et se différencie aussi bien des approches de la psychoacoustique que de celles de l'intelligence artificielle. Elle se propose d'aborder l'étude de toutes sortes d'événements sonores : musique, parole ou bruits. Les idées de base ont été développées lors de la thèse de F. Guyot : *Etude de la perception sonore en termes de reconnaissance et d'appréciation qualitative : une approche par la catégorisation* (1996). Sur la base des notions de catégorisation prototypique, appréhendées dans l'optique de D. Dubois, nous avons défini les principes de notre méthode expérimentale de tests sonores. Les mots clés en sont:

- validité écologique des stimuli et de la situation de test;
- catégorisation libre,
- verbalisation.

Le traitement linguistique des verbalisations permet ensuite de remonter au niveau significatif pour l'auditeur, donc d'interpréter les résultats. Lorsque les stimuli sonores s'y prêtent (bruits d'aspirateurs, sons des Steel-Pans), la modification de certains paramètres acoustiques des stimuli par resynthèse permet de vérifier notre interprétation des résultats.

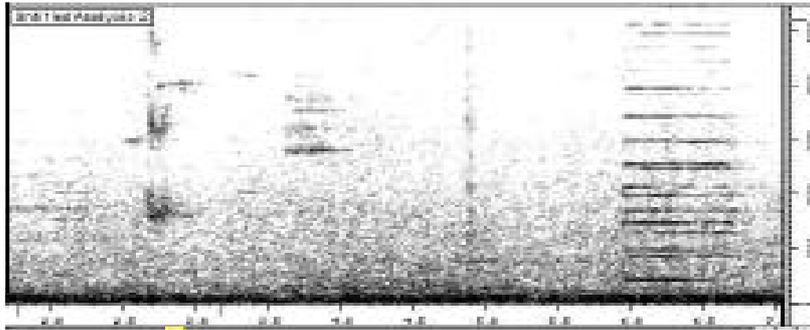
Cette approche conduit à une étude réaliste de la "qualité sonore" des bruits, de l'environnement, mais aussi des sons musicaux. Nous exposons maintenant les différents sujets abordés.

2 - Etudes de la qualité sonore

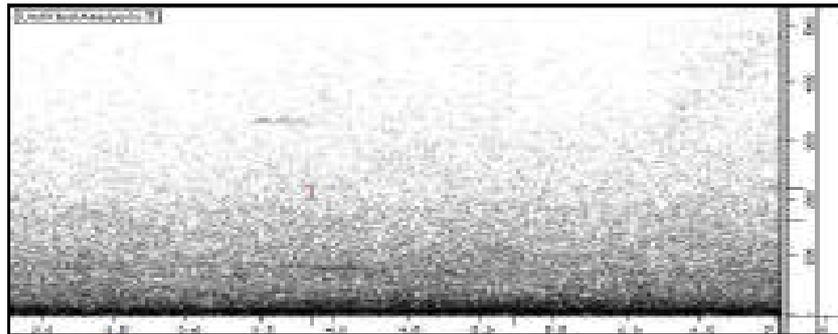
Caractérisation acoustique et sémantique de la qualité sonore de l'environnement urbain. (V. Maffiolo, D. Dubois, J.D. Polack; C. Villain)

[Thèse; C 34, C35, C36, C37; A7, A8; I 4; contrats CR1; CR3; CR4]

La thèse de Valérie Maffiolo illustre particulièrement bien les principes qui viennent d'être énoncés mais, à la différence des bruits étudiés par F. Guyot (aspirateurs et bruits domestiques), la nature des stimuli : l'ambiance sonore urbaine, est ici particulièrement complexe. Il a fallu d'abord sélectionner des séquences significatives pour les sujets et représentatives de la ville, au cours d'une étude approfondie (questionnaires; représentations graphiques et verbalisations) faite en collaboration étroite avec Corsin Vogel, doctorant du Thème 5. En deuxième lieu, un travail systématique d'évaluation des dispositifs de prise de son en extérieur a permis de définir une méthode d'enregistrement et de restitution des ambiances sonores en laboratoire "écologiquement valide". 16 séquences sonores ont été sélectionnées (environ 15 s.), 8 de type "événementiel" comprenant des bruits repérables, et 8 de type "amorphe" représentative du bruit de fond diffus. Deux questions étaient au centre de l'étude : la perception de l'intensité sonore et celle de l'agrément (aspect plus ou moins plaisant). Le travail a porté à la fois sur des changements d'intensité des stimuli (originaux ou normalisés); des changements de consigne de tests (intensité, agrément, identité) et des types de tests différents (catégorisation libre, consigne sur une paire, note de dissimilarité).

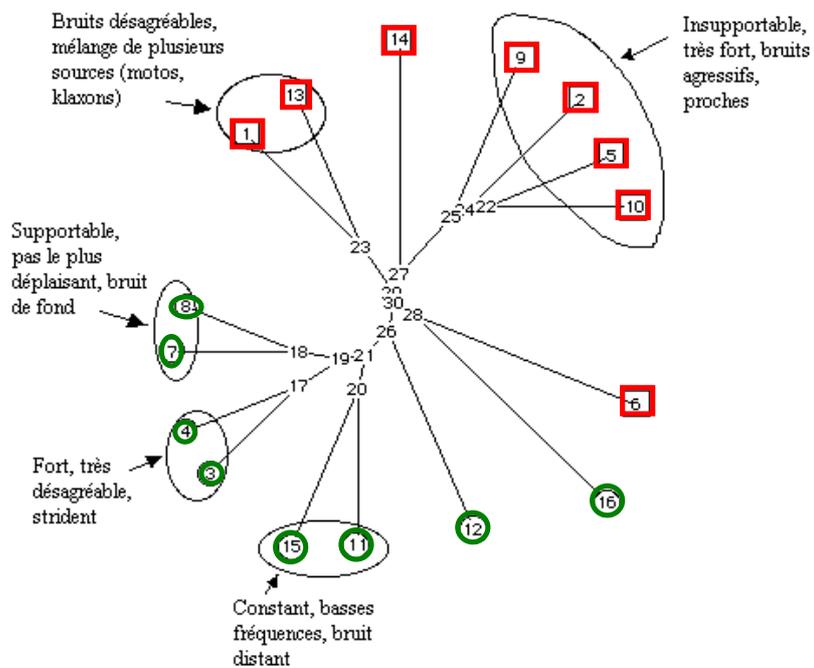


Séquence sonore "évènementielle" (N°5)



Séquence sonore "amorphe" (N°7)

Les résultats ont clairement montré, par l'analyse conjuguée des regroupements et des verbalisations, que les traitements des sujets différaient, selon que le contenu des scènes sonores était de type "évènementiel" ou de type "amorphe".



On en conclut que la seule mesure de l'intensité est insuffisante, et qu'il faut prendre en compte la structuration des représentations mentales des ambiances sonores pour les sujets, tant l'incidence de la signification de ces ambiances est manifeste sur leurs appréciations qualitatives.

Les mêmes concepts de recherche ont été appliqués à l'évaluation de qualité perçue des espaces verts de la Ville de Paris. L'étude a montré la forte interaction des données visuelles avec les données auditives pour l'évaluation de la qualité globale (cf CR 3; direction scientifique D. Dubois).

Identification des sons : Données temporelles et spectrales (G. Cohen, D. Dubois)

[DEA Atiam]

Guillaume Cohen a étudié les temps de réaction à la reconnaissance d'une série de sons brefs extraits de l'environnement quotidien. Les résultats ont montré que l'on pouvait relier la vitesse de réaction à la familiarité, et le retard des réponses à la complexité des événements, c'est à dire à la nature des bruits. La catégorisation a mis en évidence 4 classes de bruits dans l'ordre de familiarité décroissante. 1. la voix humaine, 2. les sons des animaux, 3. les sons musicaux, 4. les bruits. Les bruits produits par l'homme sont des catégories prioritaires.

Evaluation de la qualité des archets de violon (B. Saint-Loubry; D. Dubois; Ch Besnainou)

[DEA Atiam]

Ce sujet de recherche exceptionnel est représentatif des exigences et de la complexité que l'on rencontre en acoustique musicale. L'objectif était de comparer les qualités d'archets de violon réalisés en bois et en matériaux composites. 12 archets ont été rassemblés : 4 archets anciens très estimés, 3 archets contemporains en bois et 5 archets carbone. Pour évaluer ces archets, B. Saint-Loubry a sollicité d'une part 14 archetiers travaillant le bois ou le carbone, et d'autre part 13 musiciens tous professionnels, professeurs et musiciens d'orchestre. Les musiciens essayaient leur archet sur un instrument de référence et sur leur violon personnel; les archetiers les testaient au moyen des manipulations qui leur sont propres (flexion, torsions diverses). Chaque sujet devait effectuer une catégorisation avec pour consigne la qualité, et expliquer verbalement les types de regroupement. Dans le peu de temps imparti (stage de DEA Atiam) les résultats ont mis en évidence la complexité des interactions sensorielles intervenant dans l'évaluation globale: tactile et sonore pour le musicien (couple main+archet /violon); tactile et visuelle (esthétique) pour les archetiers. La recherche n'a pas pu être poursuivie, faute de financement.

Transitoire d'attaque des steel-pan.(P. Gaillard; M.Castellengo)

[Thèse + C 22]

Les Steel-drums, instrument inventés aux îles Caraïbes pendant la 1ère moitié du 20ème siècle sont réalisés avec des bidons d'huile dont la surface supérieure est travaillée (emboutissage et martelage) de façon à circonscrire des zones vibrantes correspondant à des modes propres accordés, en relation quasi harmonique entre eux. Lorsqu'un secteur est mis en vibration par frappement, de nombreux couplages s'effectuent de sorte que la durée d'établissement du son est pratiquement intermédiaire entre celle d'une percussion et celle d'autres modes d'excitation comme l'archet ou le souffle. Une série de tests de catégorisation libre ont été mis en place pour explorer la perception de ces sons qui présentaient l'intérêt particulier d'être inconnus de nombre d'auditeurs. Un seuil temporel de prise en compte du transitoire est proposé.

Evaluation de la qualité sonore d'un orgue : comparaison avant et après restauration
(M. Castellengo, Ch Besnainou, J.D. Polack, J.Y. Bernhard)

[C15, Monuments historiques]

L'orgue est un instrument très complexe dont la qualité sonore d'ensemble, liée à celles du lieu d'implantation, est complètement déterminée par les réglages effectués sur chacun des tuyaux au moment de sa construction. Les interventions sur l'instrument sont donc des opérations exceptionnelles. Nous avons été chargés à plusieurs reprises, d'effectuer l'inventaire sonore d'instruments de grande valeur, afin de permettre un bilan comparatif avant puis après la restauration. En 1997 et en novembre 1999 deux missions ont ainsi été effectuées à Ebersmunster, pour enregistrer l'orgue Jan Andreas Silberman de l'église Saint-Maurice (1732). Les dépouillements de l'enregistrement sonore et les analyses acoustiques qui feront l'objet d'un rapport à la Direction Régionale des Affaires Culturelle d'Alsace, sont en cours de réalisation.

Sons de bouche des transitoires d'attaque des tuyaux à embouchure de flûte (M. Castellengo)

[P5]

Cette publication qui reprend des recherches effectuées entre 1969 et 1976 lors de la thèse, montre qu'une approche perceptive et musicale de l'analyse expérimentale des transitoires d'attaque des tuyaux à bouche apporte une contribution originale à la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. Le rôle des sons de biseau du système buccal dans la production sonore du tuyau complet a été clairement mis en évidence. Recherchés par le facteur d'instruments de style baroque (tuyaux d'orgue et flûtes à bec), les sons de bouche qui sont très sensibles aux faibles variations de pression se produisant au moment du transitoire initial, jouent un rôle important dans la netteté et la qualité de l'attaque de ces instruments.

3 - Voix chantée

3.1 Analyse acoustique et perception de la source en voix chantée (N. Henrich, Ch d'Alessandro, B. Doval, N. Molinier)

[C 29; C30; C31; Thèse, DEA]

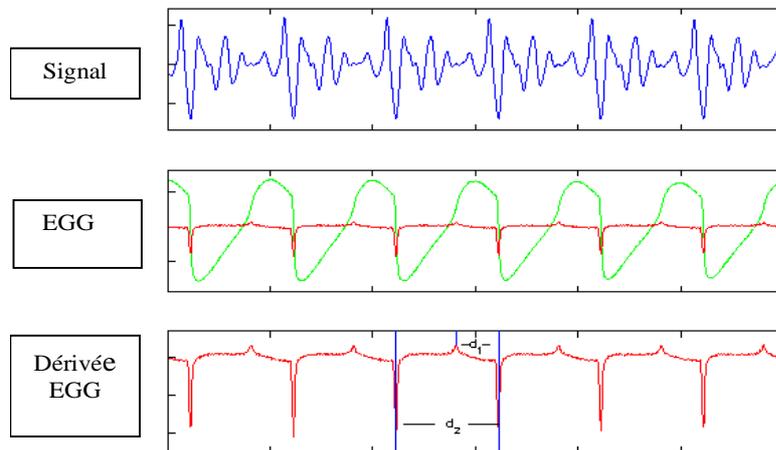
La qualité vocale, dans la parole comme dans le chant, repose en grande partie sur les propriétés de la source de voisement. En s'appuyant sur le modèle acoustique source-filtre, on peut étudier les paramètres de la source de débit glottique pour caractériser les différentes productions vocales. Plusieurs modèles paramétriques de l'onde de débit glottique ont été proposés mais ils ne possèdent pas tous les mêmes paramètres, ni le même nombre de paramètres. Néanmoins, dans tous les modèles, on retrouve comme paramètres la période de voisement (T_0), le quotient d'ouverture (O_q), et au moins un paramètre qui règle la vitesse de fermeture (par exemple la pente spectrale). Ces deux derniers paramètres sont donc au centre de ce travail de recherche, dont le propos est de développer des méthodes de mesures ou d'estimations de ces paramètres et de les appliquer, afin d'analyser et de caractériser différentes productions vocales. Trois axes de recherche sont exploités :

1. des mesures expérimentales sont effectuées sur la source laryngée, en particulier à l'aide de l'électroglottographie qui permet de rendre compte des variations temporelles d'accolement des cordes vocales.
2. des techniques d'estimation spectrale de ces paramètres sont développées, en s'appuyant sur des modèles temporels et spectraux de la source et du conduit vocal.

3. une expérimentation perceptive est mise en place, afin de relier ces paramètres à la qualité vocale perçue par les auditeurs et de déterminer des seuils perceptifs de variation.

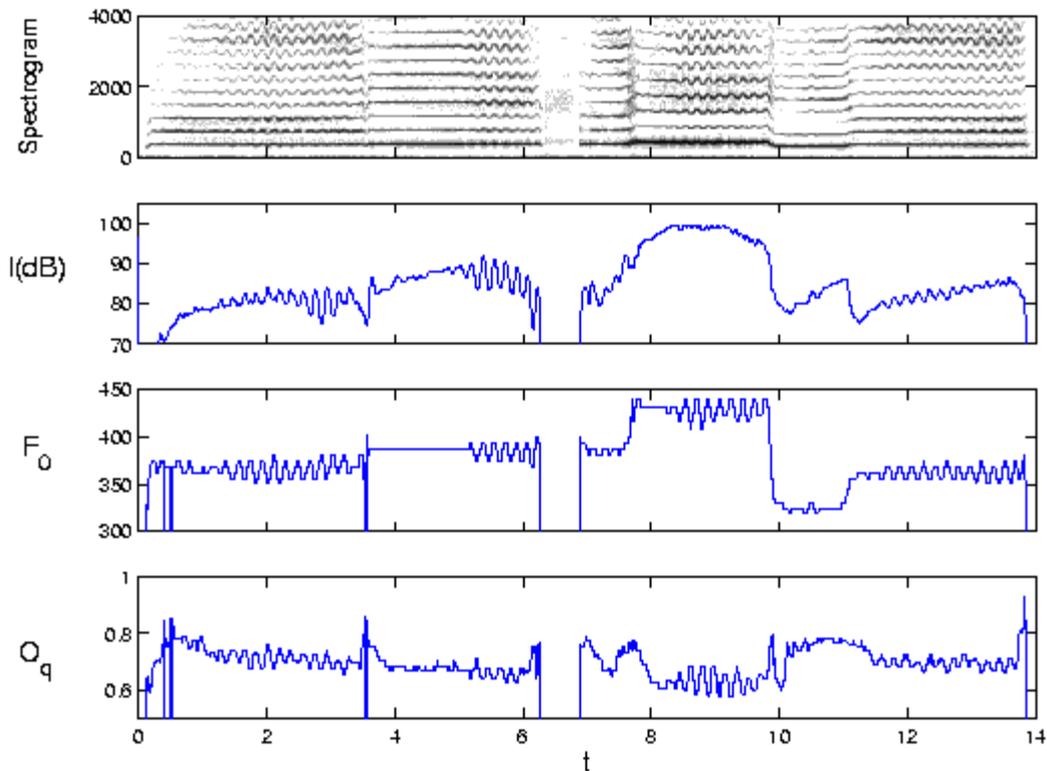
Ce travail de recherche se déroule en collaboration étroite avec l'équipe *Analyse, Synthèse et Perception* du groupe *Traitement du Langage Parlé* du LIMSI.

1. Mesures expérimentales :



L'électroglottographie est une méthode d'exploration non-invasive, qui permet de mesurer le quotient d'ouverture, défini comme le rapport de la durée d'ouverture glottique sur la période de vibration des cordes vocales. Le signal électroglottographique, proportionnel à l'impédance électrique du cou, varie en fonction de la surface de contact des cordes vocales. En le dérivant, on obtient pour chaque période deux pics assez nets, de sens opposé. Le pic le plus marqué correspond au moment de fermeture glottique, tandis que l'autre pic peut être relié à l'instant d'ouverture glottique. La détermination de ces deux instants permet alors de connaître la valeur du quotient d'ouverture. Ceci est illustré sur la figure suivante, qui représente le signal acoustique (en haut), le signal électroglottographique (au milieu) et sa dérivée (en bas). Le quotient d'ouverture se déduit du rapport entre d_1 et d_2 . Les signaux acoustiques et électroglottographiques de chanteurs professionnels ont été enregistrés simultanément. La figure suivante illustre les données acoustiques extraites de ces signaux, en particulier la fréquence fondamentale F_0 , le quotient d'ouverture O_q et l'intensité acoustique I au niveau du microphone.

Les signaux acoustiques et électroglottographiques de chanteurs professionnels ont été enregistrés simultanément. La figure suivante illustre les données acoustiques extraites de ces signaux, en particulier la fréquence fondamentale F_0 , le quotient d'ouverture O_q et l'intensité acoustique I au niveau du microphone.



Les mesures électroglottographiques de quotient d'ouverture réalisées sur les chanteurs ont abouti aux résultats suivants :

- des différences significatives de quotient d'ouverture entre les voix d'homme et les voix de femme, ce qui s'explique principalement par le fait que les hommes n'utilisent pas le même registre laryngé que les femmes, lors de l'émission vocale (les barytons chantent en mode 1, registre laryngé caractérisé par des cordes vocales épaisses, vibrant sur toute leur longueur, tandis que les sopranes utilisent le mode 2, pour lequel la masse vibrante est réduite et la tension musculaire plus importante).
- une corrélation entre l'intensité vocale et le quotient d'ouverture, quelque soit la hauteur du son émis. Quand l'intensité vocale augmente, le chanteur tend à diminuer son quotient d'ouverture, donc à garder les cordes vocales en contact plus longtemps (relativement à la période) lors de la phonation. Cet effet ne se retrouve pas en mode 2, où on observe même parfois l'effet inverse, c'est-à-dire une augmentation du quotient d'ouverture lors d'une augmentation d'intensité.
- des variations dynamiques de quotient d'ouverture plus importantes en voix parlée qu'en voix chantée, ce qui semble naturel si l'on pense que le chanteur met l'accent sur l'homogénéité et la continuité sonore. En voix parlée, ces variations sont vraisemblablement liées à la prosodie et à l'articulation.

2. Estimation spectrale des paramètres de l'onde de débit glottique

Dans le cas d'une fermeture abrupte des cordes vocales lors de la phonation (pente spectrale nulle), la source est modélisée spectralement par un filtre linéaire anticausal d'ordre 2, dont les coefficients peuvent être reliés simplement aux paramètres de source T_0 (période fondamentale), AV (amplitude de l'onde débit glottique), O_q (quotient d'ouverture) et m (coefficient d'asymétrie de l'onde de débit glottique). Estimer ces paramètres revient donc à

trouver le filtre qui correspond au mieux à l'onde de débit glottique obtenue par filtrage inverse du signal acoustique.

3. Expérimentation perceptive.

L'objet de cette étude est de mettre en évidence le rôle perceptif du quotient d'ouverture et de déterminer des seuils perceptifs de variation. Une première étape consiste à synthétiser des échantillons sonores dont on maîtrise les paramètres de source (en particulier le quotient d'ouverture). Toute la difficulté de cette étape réside dans le naturel du signal synthétique. Une expérimentation perceptive sur les échantillons synthétiques permet ensuite de déterminer ces seuils perceptifs de variation.

4. Contacts

Dans le cadre de cette recherche nous avons effectué deux visites auprès de chercheurs spécialistes de la voix :

- H. Schütte, concepteur de la Videokymographie et D. Miller qui a développé le logiciel *Voce Vista* au voice Research Laboratory de Groningen (Pays Bas)
- A. Fourcin, un des premiers utilisateurs de l'electroglottographe; University College of London.

3.2 Etude acoustique des registres vocaux (M. Castellengo, B. Roubeau)

L'étude des registres vocaux, amorcée en 1982 avec Bernard Roubeau orthophoniste, est d'une grande complexité, tant par les difficultés d'observation et d'accès aux mesures que pose l'appareil phonatoire humain, que par la diversité des opinions contradictoires qui opposent chercheurs et praticiens. Nous avons participé à plusieurs rencontres scientifiques et de diverses associations (Société Française de phoniatrie; Association des Professeurs de Chant), et les deux notions de "registre laryngé" et "registre résonantiel" sont maintenant bien acceptées.

Phonétogrammes vocaux des différents registres (B. Roubeau; P. Bodin; M. Ragot)

[Mémoires d'orthophonie; Conférences]

Le phonétogramme rend compte de l'étendue dynamique de la voix. Dans le cadre de nos recherches sur les mécanismes laryngés nous avons entrepris l'exploration systématique du phonétogramme dans chacun des registres laryngés. 40 sujets se sont prêtés à l'examen : hommes, femmes, chanteurs ou non chanteurs et enfants. Une étude plus spécifique du troisième registre a aussi été menée. Ce travail a fait l'objet de deux mémoires d'orthophonie sous la direction de B. Roubeau et en collaboration avec M. Castellengo.

Les registres des chanteurs (B. Chuberre; Ch. Mathias; M. Castellengo; N. Henrich)

L'enseignement d'acoustique musicale donné au CNSM se conclut par un Mémoire de recherche. Deux élèves, par ailleurs lauréats de la classe de chant lyrique ont pu utiliser les connaissances acquises en acoustique pour étudier la voix des chanteurs dans une optique professionnelle¹³. Chantal Mathias, soprano lyrique a fait le point sur "la voix de femme". Le baryton Bertrand Chuberre couronne simultanément ses études de médecine, sa spécialité de phoniatrie et le prix de la classe d'acoustique avec un remarquable travail de recherche sur deux techniques d'adaptation vocale particulières au chant classique : "la couverture et la voix

¹³ La situation est habituellement inversée : les scientifiques étudient la voix des chanteurs... Ici la confiance entre chercheur et sujet est totale, et surtout, le questionnement est parfaitement ciblé.

mixte" ainsi que sur le problème spécifique de "la voix de sifflet". Il a pu bénéficier des récentes avancées dans l'analyse de l'électroglottogramme développées par Nathalie Henrich.

3.3 Atelier Voix Chantée

L'*Atelier Voix Chantée* a été réactivé en 1998. Il regroupe mensuellement au LAM un petit nombre de chercheurs et de professionnels de la voix, qui portent tous un intérêt particulier à la voix chantée et à son étude. Il a été pensé comme un groupe de travail, plutôt qu'une conférence, et les participants sont donc activement engagés dans une recherche autour du thème de l'atelier. La motivation directe d'un tel atelier est de croiser les savoirs. La spécialisation nous pousse en effet à aborder la voix chantée d'un point de vue unique (celui de la production, du traitement du signal, de l'activité musculaire, de la perception, du chanteur, du musicien ...), ce qui doit s'enrichir par l'échange. Les thèmes abordés sont disponibles sur la page WEB de l'atelier (<http://www.lam.jussieu.fr/voix/>)

3.4 Conférences sur la voix (M. Castellengo)

1997 - CoMeT ; Voice Range Profile in relationship to laryngeal vibratory mechanisms (M. Castellengo; B. Roubeau)

1998 - Festival "Imaginaires"; Paris. L'alchimie acoustique des timbres de la voix. (M. Castellengo)

1998 - Congrès de la Société Française de Phoniatrie (conférence invitée) "Le bilan acoustique : explorations spécifiques à la voix chantée" (M. Castellengo).

4 - Doublement de période dans la voix et le jeu d'instruments à vent (V. Gibiat)

[P8]

La publication réalisée avec V. Gibiat (LOA) concrétise une collaboration de longue date sur les phénomènes non linéaires des systèmes excitateurs et plus particulièrement le doublement de période. Ce type de production "pathologique" pour nos oreilles s'inscrit naturellement dans la production musicale de haut niveau dans plusieurs cultures traditionnelles (Xhosa de l'Afrique du sud; Tibet).

5 - Mémoires d'acoustique musicale de la classe du CNSMP

Outre les deux mémoires sur la voix chantée dont il a été fait mention au §3.2, différentes recherches menées par des étudiants du Conservatoire National Supérieur de Musique de Paris donnent lieu à des recherches originales, dont une bonne partie (environ la moitié) se déroulent avec l'appui de chercheurs du LAM. Citons :

Laurent Melin (1997) Apports de nouvelles études acoustiques appliquées à l'orchestre dans la "Symphonie fantastique" d'Hector Berlioz.

Marie Cécile Barras (1998) La spécificité acoustique des accords *signalétiques* chez Stravinsky - *1er prix*

Madeleine Leclair (1998) Etude d'un chant Gèlèdè des itcha du Bénin. Une approche acoustique. *1er prix*

Chantal Mathias - La voix de soprano - Approche acoustique des registres dans le chant lyrique. *1er prix*

Theodora Psychoyou – Acoustique et musique en France de Marin Mersenne à Joseph Sauveur. Naissance d'une nouvelle discipline. – *1^{er} prix*

THEME 5 : ACOUSTIQUE DES SALLES ET DE L'ENVIRONNEMENT

J.D.POLACK

L'activité de l'équipe est scindée en deux : une activité environnement, réalisée pour l'essentiel au laboratoire en étroite collaboration avec Danièle Dubois et avec le Thème 4 (voir pages 26 à 28) ; et une activité acoustique des salles, réalisée pour l'essentiel à l'extérieur dans le cadre de thèses.

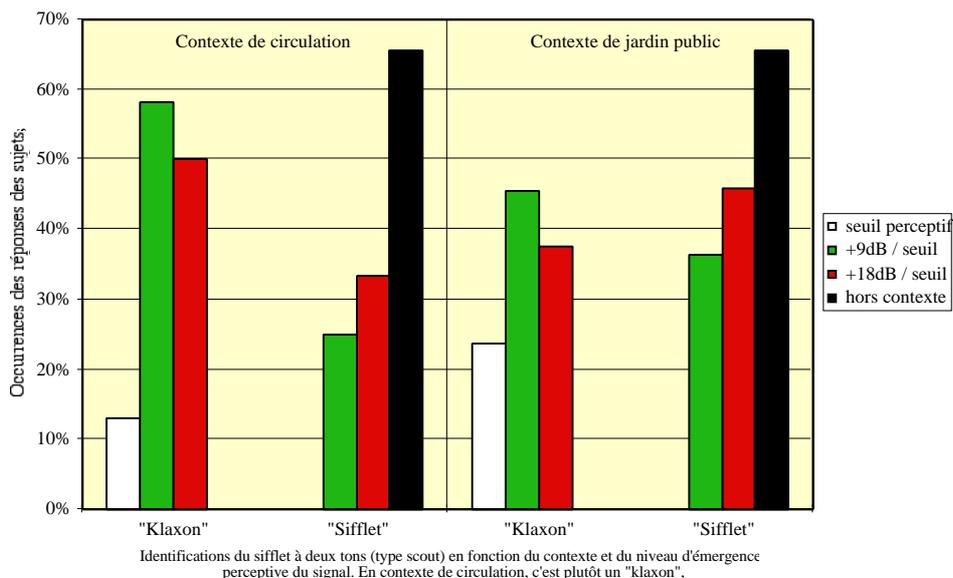
Environnement

Le but de cet activité est de comprendre comment le monde qui nous entoure "fait sens". L'hypothèse de base - celle de tout le structuralisme - est que seules les différences font sens, mais que toutes les différences repérables ne sont pas significatives. En conséquence, le travail consiste à repérer les ruptures et variations de la structure de signaux acoustiques, que l'on confronte systématiquement à des auditeurs pour découvrir si ces signaux sont porteurs de sens. En d'autres termes, ce ne sont pas les "invariants structuraux" que l'on recherche, mais leurs ruptures et modifications. Cette activité a nécessité une forte remise à niveau de la part de Jean-Dominique Polack, car l'approche psycholinguistique de Danièle Dubois est très différente de la psychoacoustique classique telle qu'il avait pu la découvrir à Göttingen, ou l'enseigner au DEA d'Acoustique du Mans entre 1986 et 1990. Il s'agit donc, dans les faits, d'un changement de thématique qui a pris plusieurs années, ce qui explique l'absence de publication majeure dans le domaine au cours des 4 dernières années

Etude sémiotique et acoustique de l'identification des signaux sonores d'avertissement en contexte urbain (C. Vogel, D. Dubois)

[C.35, C.37, C.49, C.50, I.10, A.5, A.8]

Dans un premier temps, il s'est agit de développer une technique d'enregistrement et de restitution des sons qui respecte le critère de "validité écologique", c'est-à-dire qui soit telle que les sons enregistrés gardent leur signification d'origine à la restitution. C'est sous cette seule condition que l'on peut affirmer que les réactions des sujets à la restitution est la même que dans la réalité. Cela a en outre nécessité la prise en main d'un logiciel de montage sonore, Sonic Solutions, en collaboration avec le thème 6, et cette prise en main s'est révélée beaucoup plus délicate et longue que prévu initialement, de par la complexité du logiciel. Ce point méthodologique assuré, Corsin Vogel a pu montrer que la signification, et donc le statut sémantique, dépend du contexte, et ceci de manière différente pour différents signaux d'avertissement. Certains signaux résistent aux changement de contexte, et correspondent pour cette raison à des prototypes, d'autres changent de dénomination avec le contexte. Quelques éléments structuraux des signaux associés ont pu être mis en évidence, mais cet aspect mérite une étude plus approfondie. Corsin Vogel a bénéficié d'une BDI dans le cadre du PIR Villes pour l'essentiel de sa thèse.



Perception des basses fréquences dans les TGV (M. Mzali, D. Dubois, collab. F. Letourneaux et F. Poisson: SNCF)

[Contrat CR6]

Cette thèse s'inscrit dans la suite de celle de Valérie Maffiolo (Thème 4, étude de la qualité sonore), car elle concerne les représentations mentales¹⁴ des usagers du T.G.V., saisies à travers leur perception de l'ambiance sonore, de préférence basse fréquence. Le statut de concepts comme "gênant" et "désagréable", le premier correspondant à une action qui pourrait être supprimée et le deuxième à une situation passive sur laquelle le sujet n'a pas prise, s'est ainsi vu confirmer dans l'analyse d'enquêtes réalisées à bord de trains commerciaux et d'une rame T.G.V. d'essai. En particulier, les catégories obtenues lors de la circulation d'essai sont les mêmes que celles obtenues pour les trains commerciaux, avec des répartitions sensiblement égales. Ces enquêtes doivent maintenant servir de références pour vérifier la "validité écologique" de la simulation qui s'engage maintenant, à l'aide des enregistrements effectués sur la rame d'essai. M. Mzali bénéficie d'une bourse CIFRE SNCF dans le cadre d'un contrat PREDIT. S'agissant d'environnement "interne", le travail de M. Mzali assure en quelque sorte la liaison avec l'acoustique des salles.

Perception des basses fréquences dans l'environnement urbain (C. Guastavino, D. Dubois)

[Contrat CR5]

Cette recherche s'inscrit en parallèle de celle de M. Mzali, mais revient aux ambiances urbaines sous leur aspect basse fréquence. Après une étude bibliographique, l'étape de simulation est en cours de réalisation. Catherine bénéficie d'une bourse MENRT dans le cadre d'un contrat PREDIT avec le ministère de l'environnement.

¹⁴ c'est-à-dire la manière dont les usagers organisent leurs connaissances : il s'agit donc de cognitive, et non de psychoacoustique

Acoustique des salles

Le thème est plutôt abordé dans le cadre de collaborations, comme c'est le cas de la thèse de M.Mzali que l'on peut considérer comme concernant l'acoustique des salles.

Auralisation dans les maquettes (collab. X.Meynial, V.Grillon, F.Maria, LAUM)

[P.9, C.24]

Le thème des maquettes acoustiques a dominé les recherches de Jean-Dominique Polack pendant toute la période où il a été affecté au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (1983-1992). Il a culminé vers la fin de cette période par l'étude de l'auralisation dans les maquettes. Les publications citées en références font donc le point sur les résultats obtenus au cours de plusieurs thèses, et constituent de ce fait le bilan d'une recherche maintenant mise en veilleuse. Ce bilan a montré l'importance de la prise en compte de la directivité des sources et récepteurs sonores, ce qui nous a convaincu de la nécessité de nous mettre à l'école des preneurs de son professionnels. Aujourd'hui, l'influence de ce travail se mesure à travers l'insistance de la validité écologique dans notre approche de l'environnement

Influence de la vision sur l'évolution de la qualité acoustique (S. Nathanail, C. Lavandier, IUT Cergy-Pontoise, O. Warusfel, IRCAM)

[C.41 ,C.42 ,A.9]

L thèse de S. Nathanail qui s'est déroulée principalement à l'IUT de Cergy-Pontoise, et seulement terminée au labo. Le sujet en était l'influence de la vision sur l'évaluation de la qualité acoustique. L'étude bibliographique a montré la complexité du problème et l'absence de conceptualisation claire et raisonnée des présupposés cognitifs. S. Nathanail s'est donc retournée vers les travaux précédemment réalisés à l'IRCAM, en particulier l'importance perceptive de la distance apparente à la source, pour focaliser ses recherches sur ce problème. Malgré un arsenal technique conséquent pour présenter des images stéréoscopiques sur écran, le résultat montre que la vision est essentiellement restée décorrélée de l'audition : c'est que la validité écologique des simulations n'est pas assurée. Une étude de l'ensemble des paramètres perceptifs liés à la qualité sonore confirme ce résultat qui remet en question les paradigmes classiques de simulation acoustique des salles. S. Nathanail a bénéficié deux ans d'une bourse de l'Union Européenne attribuée à l'Université du Maine.

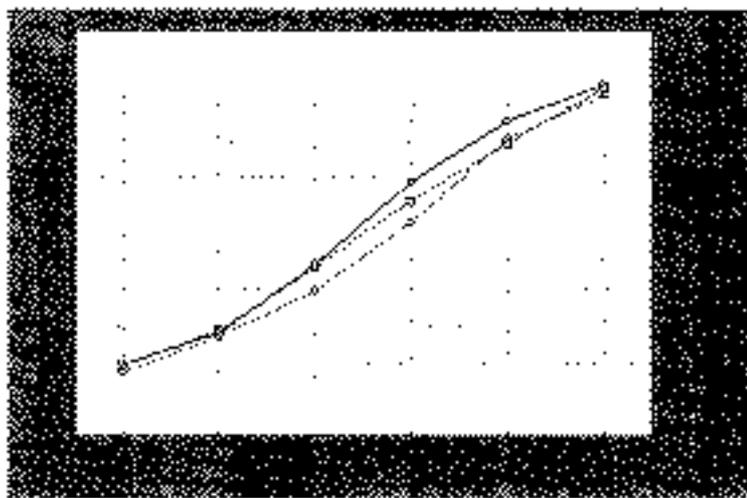
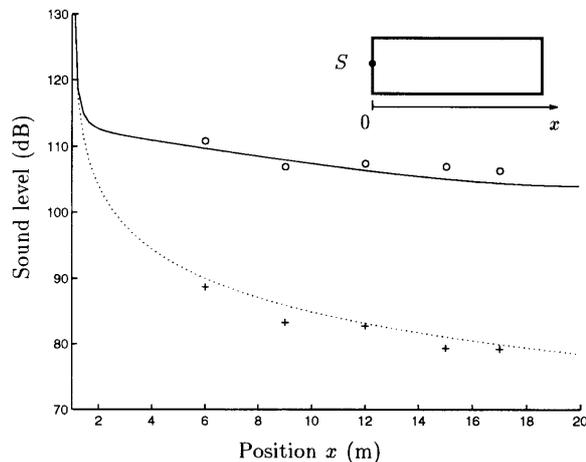


Figure 4.25 : Distance auditive apparente des stimuli auditifs en fonction des conditions variables.

Modélisation des champs diffus par une équation de diffusion - Application à l'acoustique des salles et à l'acoustique urbaine. (J. Picaut; coll. L. Simon LAUM)

[P.14, P.15]

Dans le droit sujet de l'acoustique des salles, J. Picaut a développé un modèle de diffusion dans les salles allongées se comportant comme une extension du modèle classique de Sabine. Toute la difficulté du problème résidait dans la justification du modèle, et J. Picaut a eu l'idée de simuler la dynamique de la salle par une répartition aléatoire d'objet diffusant dont la densité reste compatible avec le libre parcours moyen. Ce faisant, il a retrouvé un modèle développé 20 ans plus tôt, en lui apportant le fondement théorique qui manquait. Le paramètre essentiel du modèle est le coefficient de diffusion, fortement lié au libre parcours moyen. Ce modèle permet de reproduire correctement les tendances que l'on mesure dans un couloir ou dans une rue, mais pas encore les valeurs numériques exactes ; il faut donc le compléter par une procédure expérimentale de détermination du coefficient de diffusion. J. Picaut a écrit sa thèse au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, sous la direction locale de Laurent Simon, dans le cadre du PIR Villes.



Comparaison entre mesure - symboles - et modèle de diffusion - lignes - dans un couloir de 20,3 x 2,23 x 3,36 m. Les cercles et la ligne continue correspondent à l'énergie sonore totale, les croix et la ligne pointillée correspondent au seul son direct.

Modélisation du rayonnement acoustique de structures tridimensionnelles couplées à une cavité en moyennes et hautes fréquences (C. Floc'h; collab. A. Bardot et X. Bohineust PSA)

Le sujet en est la caractérisation vibro-acoustique d'un panneau d'habitacle automobile, y compris l'interaction avec la cavité interne de l'habitacle, pour atteindre une modélisation binaurale minimale, mais perceptivement adéquate. Si la description complète d'un panneau rectangulaire, y compris sous une approche holographique, s'est montré facilement réalisable, l'interaction avec la cavité a été plus difficile à modéliser. En particulier, les outils numériques choisis, plus précisément ceux qui proviennent de l'acoustique des salles, se sont révélés trop frustrés pour modéliser correctement une géométrie aussi complexe qu'un habitacle automobile, et trop fermés pour y incorporer, même de manière phénoménologique, les

sources images manquantes. En conséquence, la simulation auditive n'est pas satisfaisante, confirmant du même coup la conclusion précédent sur l'inadéquation des paradigmes classiques de simulation acoustique des salles. C. Floc'h a réalisé sa thèse dans le cadre d'une convention CIFRE avec PSA.

Techniques de reproduction multicanale - optimisation des matricages pour la prise de son et sa restitution (J. Daniel; coll. J.B.Rault CCETT)

[C.11, C.12]

Du point de vue de la restitution sonore, la thèse de Jérôme Daniel s'intéresse aux techniques actuelles de reproduction multicanale, en particulier aux matricages optimaux tant à la prise qu'à la restitution du son. Il s'agit de trouver un format intermédiaire minimal qui conserve l'information de direction d'arrivée des fronts sonores, de manière à ce qu'ils soient restitués correctement. L'étude, essentiellement théorique, constitue un développement des techniques Ambisonics, et reformule entièrement les critères habituellement utilisés pour le matricage : des valeurs nouvelles des coefficients de matricage sont proposées, et une interface utilisateur a été réalisée. L'étape suivante consiste à valider perceptivement ce système et les nouvelles matrices. Jérôme a bénéficié d'un financement du CCETT à Rennes.

Optimisation de l'implantation de haut-parleurs et le calcul de leur réponse binaurale dans l'habitacle d'un véhicule. (S. Jeanjean; coll. Y.Hadjee et A.Vadé PSA)

Cette thèse s'engage maintenant sur le placement des haut-parleurs dans un habitacle automobile. Faisant suite à la thèse de C. Floc'h, le travail consiste à utiliser la technique mise au point pour évaluer le champ acoustique dans une voiture, et donc optimiser l'emplacement des haut-parleurs. Le travail, qui vient de commencer, a d'abord consisté à faire le point sur les modèles de haut-parleur existants, puis s'oriente vers le couplage de ces modèles avec ceux de C. Floc'h. S. Jeanjean bénéficie d'un contrat CIFRE avec PSA.

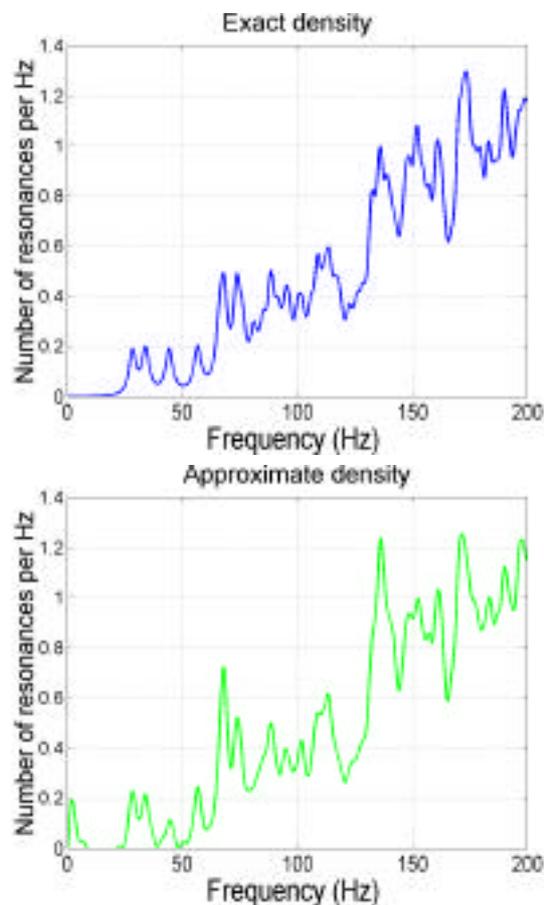
Contrôle des premières résonances d'une cavité unidimensionnelle par procédé rétroactif. (M. Imbert; Ch Besnainou)

Le précédent travail a beaucoup bénéficié de l'étude de M. Imbert sur le contrôle actif en paroi. Dans le cadre de son mémoire d'ingénieur CNAM, M. Imbert a envisagé la réalisation d'un mur actif qui absorbe les sons basse fréquence. Une étude bibliographique a fait ressortir l'intérêt du modèle d'Olson, daté de 1953. Pour mieux comprendre le fonctionnement de ce modèle, une maquette du système à grande échelle et à une dimension a été construite. La faisabilité du modèle d'Olson a ainsi été prouvée, en mettant expérimentalement en évidence l'existence de matériaux d'impédance égale à celle de l'air sous faible épaisseur. Les modèles de haut-parleur développés par M. Imbert sont actuellement très utilisés au labo. M. Imbert a bénéficié d'un financement dans le cadre de la formation permanente.

Divers.

En marge de ces activités, J.D.Polack a conservé une activité plus marginale de modélisation acoustique des salles, en s'orientant de plus en plus vers l'interaction source/salle. Dans le cadre d'une invitation de 4 mois chez Bang & Olufsen au Danemark pendant l'été 97, J.D.Polack a appliqué les travaux de Balian et Bloch sur la distribution des modes, pour écrire un utilitaire MatLab qui calcule la réponse acoustique d'une salle par

resommation des contribution des sources images en tenant compte des régularités de la distribution de celles-ci. Le travail a été complété dans le cadre du DEA de Julien Coenca, étudiant du Mans, et une communication est acceptée au 5^o CFA. Un article est en cours de rédaction. Le travail doit maintenant être comparé aux résultats expérimentaux obtenus par Alexis Baskind dans le cadre de son DEA ATIAM. Utilisant un jeu de 72 réponses impulsionnelles mesurées pour 4 positions de source et 18 positions de microphone, Alexis a pu calculer la puissance émise par la source en se basant sur les propriétés statistiques du champ réverbéré. Le résultat, qui confirme certains résultats numériques précédemment obtenus, montre que l'influence des modes sur la puissance s'exerce bien au delà de la fréquence usuellement admise, la fréquence de Schroeder, et confirme l'existence de "rigidité spectrale" dans une salle rectangulaire. Une communication au 5^o CFA et à la 108^o Convention de l'AES ont été présentées.



Comparaison entre le calcul exact de la densité modale d'une salle rectangulaire de 6 x 5 x 2.5m (en haut) et le calcul par sommation des sources images (en bas)

THEME 6 : CONSERVATION DES ENREGISTREMENTS SONORES ET AUDIOVISUELS

JEAN-MARC FONTAINE

Les études et recherches ont pour objet d'acquérir les connaissances nécessaires pour assurer la conservation et la consultation à long terme des collections de documents sonores, audiovisuels, et multimédia relevant du Ministère de la Culture et de la Communication. Les travaux concernent de manière équivalente les fonds anciens, actuels, et futurs.

La méthodologie et les moyens d'investigation dépendent du type d'information (son, images fixes, images animées), du mode de codage (analogique ou numérique) et du type d'inscription de l'information (déformation de matière détectée mécaniquement ou optiquement, magnétisation de particules ferromagnétiques,...).

Pour l'enregistrement analogique, on considère les thématiques identifiées par un support : le disque, la bande magnétique audio ou vidéo. Avec l'enregistrement numérique, la notion de préservation des enregistrements s'est élargie vers la prise en compte de la fusion de tous types d'informations sur un support donné. La multiplicité des formats d'enregistrement, des équipements spécifiques d'accès aux informations constitue un obstacle majeur à la notion même de conservation. Il faut repérer dans cette production les systèmes les plus aptes à répondre aux objectifs fixés compte tenu du contexte des institutions, définir les performances, les modes de dégradation, les modes de restauration du support et de l'information. Ainsi ces 4 dernières années l'accent a été mis sur les modalités de transfert numérique des informations audioanalogiques, sur les outils de restauration des sons dégradés, et sur le comportement des mémoires optiques (disques compacts pressés et disques enregistrables une fois).

Les opérations de transfert des enregistrements

[C17; C18; C23; Convention BnF]

Afin d'assurer la sauvegarde des enregistrements menacés et d'améliorer les conditions de communication des documents, des transferts doivent être réalisés sur des systèmes offrant les meilleures garanties de préservation de la qualité, de conservation et, de manière plus implicite, de facilité d'accès.

Toutes les questions de qualité, de préservation à long terme des formats et des supports cibles surgissent au moment d'effectuer ces choix. Les investigations sont menées sous forme de veille technologique en relation avec le milieu industriel, les partenaires en France et à l'étranger, et enfin par les expérimentations. La définition des équipements et des modalités de transfert des enregistrements sonores a été conduite grâce à la synthèse des connaissances que les études et recherches de ce programme ont permis d'acquérir sur les conditions de lecture, les traitements de l'information, les systèmes d'enregistrement numérique. Un cahier des charges a été élaboré pour procéder aux transferts des collections de la Bibliothèque nationale de France. Ces travaux ont contribué à la mise en place de 3 studios de transfert entièrement équipés, en cours de validation actuellement (Annexe BnF de Bussy St-Georges).

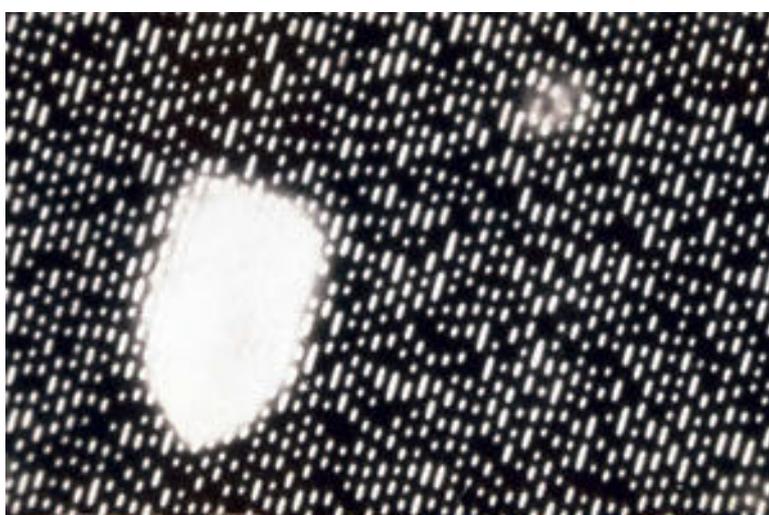
Restauration des enregistrements sonores dégradés

[C 32; Convention BnF]

L'état acoustique de certains enregistrements se montre, dans bien des cas, insuffisant pour permettre l'exploitation du document. Les traitements de restauration du son donnent des résultats satisfaisants lorsque la structure des sons parasites (bruits) est suffisamment dissemblable du message "utile". Les difficultés proviennent du manque de discrimination de la parole ou de la musique par rapport à ce qui apparaît comme étant du bruit. Une étude de traitement s'est engagée en collaboration avec le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine qui a développé des algorithmes susceptibles de traiter certaines dégradations, basés sur des méthodes de soustraction des bruits large bande par l'estimation du spectre à court terme. Une recherche a été menée sur l'élaboration d'un système adaptatif de traitement. M. ZENG Hong a soutenu sa thèse en février 1996.

Etude des disques compacts pressés

[C 21; C 33; C 42; R3; Convention BnF; contrat CR2]



CD pressé : informations masquées par des particules dans la couche de polycarbonate.

Les critères de contrôle de qualité du signal enregistré

Dans certaines conditions, la lecture des enregistrements numériques permet d'extraire les données décrivant la qualité de l'inscription de l'information et de dresser un diagnostic de l'état du disque. Pour étudier les variables correspondantes aux quelques 45 paramètres de 221 disques, une étude a été menée en collaboration avec une équipe spécialisée sur les techniques d'analyses multidimensionnelles : le CISIA (Centre International de Statistique et d'Informatiques Appliquées). L'analyse en composantes principales a permis d'obtenir une description graphique descriptive d'un ensemble d'observations effectuées sur des variables numériques continues. Outre les corrélations établies entre les paramètres, les calculs ont permis de produire des familles de classes et de dresser un ordre hiérarchique de pertinence des paramètres :

E32 -----> BLER -----> I3 -----> I11 -----> BR -----> XT -----> PP

C'est-à-dire respectivement : les erreurs numériques, l'amplitude du signal électrique et enfin les paramètres directement liés à la morphologie des microcuvettes.

Vieillissement thermique : corrélation entre l'évolution du comportement chimique et celle du signal numérique enregistré.

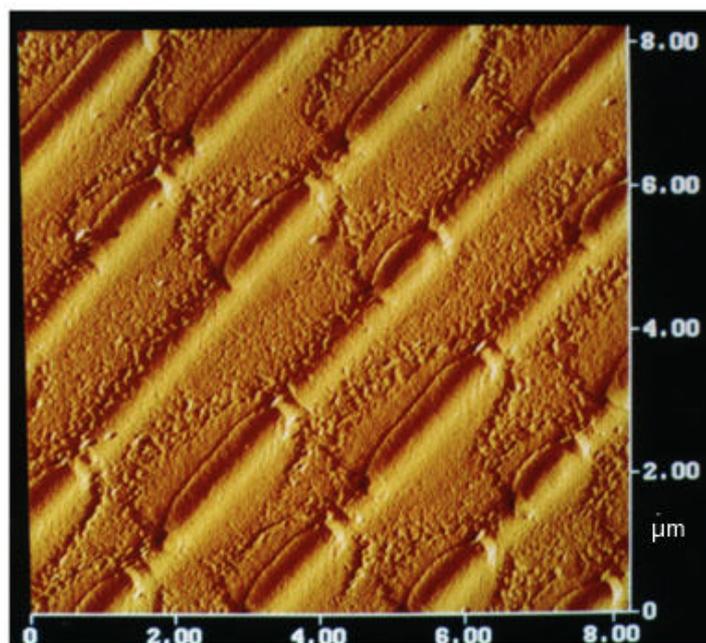
L'insuffisance des données accessibles sur la composition et le comportement des disques nous a incité à contacter le Laboratoire de Photochimie de Clermont-Ferrand (Centre National d'Etude de Photo-protection) spécialisé sur les problèmes liés au vieillissement des polymères.

Les analyses ont montré la grande disparité de formulation de la mince couche de vernis qui "protège" le film métallique et supporte également une encre de nature... indéfinie. Les essais d'exposition thermique ont révélé un comportement très différent selon la nature des vernis : forte instabilité des vernis celluloseux utilisés surtout pendant une première période semble-t-il; stabilité mieux établie des vernis cyanoacrylates utilisés par la suite. Les disques compacts connaissent une réelle incertitude quant à leur aptitude à la conservation. Cela signifie que nous pouvons maintenant rencontrer des cas de dégradation manifeste des disques compacts audio de première génération. D'où la vigilante attention dont les collections de CD-Audio, CD-ROM doivent faire l'objet afin de déclencher des transferts en temps utiles.

Les mesures effectuées sur de longues durées d'exposition thermique font apparaître une dégradation du taux d'erreur, phénomène qui a fait l'objet d'investigations chimiques. Les analyses effectuées par le Laboratoire du CNEP ont montré que, effectivement, on retrouvait des évolutions en concordance avec celles observées sur le signal. La corrélation entre l'évolution du signal et l'évolution du vernis confirme l'origine d'un processus de dégradation complexe aboutissant à la perte de qualité réfléchissante de la couche métallique. Ces travaux contribuent à la mise au point de modèles de comportement du BLER avec le temps proposés par un groupe de normalisation international (AES-ANSI IT-9).

Disques compacts enregistrables une seule fois

[C 19; C20; Convention BnF; Contrat CR9]



CD-R couche sensible : pré-gravure et pits

Influence de la puissance du laser d'écriture sur les caractéristiques du signal enregistré.

Grâce à des séries de CD-R enregistrés spécialement par la société japonaise Mitsui, une étude sur l'influence de la puissance d'écriture du rayon laser a pu être réalisée. La sensibilité, l'évolution de l'ensemble des paramètres propres au disque est estimée en fonction de la puissance du spot d'écriture, ce qui permet de mieux comprendre les processus d'écriture des CD-R et de mieux cerner les paramètres au travers desquels la qualité de l'enregistrement est définie.

En outre, des analyses chimiques réalisées par le Laboratoire du CNEP sur notre demande ont mis en évidence la manifestation d'un site moléculaire d'instabilité lorsque la puissance du laser augmente. Cette modification chimique de la couche sensible sous l'effet du rayon laser constitue un indice important qui devra être précisé lors des études ultérieures de vieillissement.

Qualité d'enregistrement des CD-R en fonction du type de graveur.

Il a été montré que la qualité d'enregistrement des disques CD-R dépendait fortement des systèmes utilisés pour pratiquer la gravure. Une collaboration avec le LNE (Laboratoire National d'Essais) a permis de disposer de disques enregistrés dans des conditions rigoureuses faisant intervenir différents types de disques et différents modèles de graveurs. Ainsi une estimation de la variabilité des conditions d'enregistrement des CD-R devenait possible. Certes, les produits ne cessent de varier mais il était tout à fait intéressant de faire le point des conditions initiales et de les cadrer avec les évolutions susceptibles de se produire dans le temps. L'étude a permis de sélectionner les paramètres les plus représentatifs de la qualité initiale d'enregistrement. Les différences observées se sont montrées considérables, ce qui nous conduit dorénavant à considérer de manière encore plus attentive voire critique les conditions de gravure. Les aspects relatifs au vieillissement devront toujours être placés dans le contexte de la qualité initiale de gravure des disques.

Essais préliminaires de thermovieillissement

- Analyses chimiques de la couche d'enregistrement

La nature exacte de la phtalocyanine utilisée pour la fabrication de CD-R parmi les plus stables ne peut être identifiée sans mise en oeuvre de moyens analytiques lourds. Toutefois, les analyses pratiquées en spectrophotométrie IRTF sur 4 types de disques CD-R ont montré leur efficacité pour comparer la nature de leur couche sensible : Laboratoire du Centre national de Photoprotection (CNEP - Université de Clermont II).

Des essais à température élevée (100 et 130°C), pratiqués sur des échantillons de couche sensible débarrassés du film de protection (contact direct de l'air) et sur des échantillons protégés, ont montré l'effet barrière des couches d'or et de vernis. Il est à noter qu'une oxydation particulière se produit dans tous les cas pour le type de disque étudié (site insaturé). Ces observations mettent l'accent sur la fragilité des zones de bordure intérieure et extérieure du disque. En outre, des analyses chimiques pratiquées sur certains types de disques ont mis en évidence la manifestation d'une thermooxydation lorsque la puissance du laser augmente. Cette modification chimique de la couche sensible sous l'effet du rayon laser constitue un indice important qui devra être précisé lors des études de vieillissement.

- Etude du vieillissement thermique de 5 types de CD-R

L'estimation de la durée de vie de différents types de disques CD-R est effectuée selon des modalités qui font intervenir température et humidité. Afin d'orienter les choix de supports dans le cadre de changements généralisés de formulation (passage de la couche métallique or à la couche métallique argent) et de valider un modèle de vieillissement actuellement proposé à la normalisation (AES53, IT9.27 : *Life Expectancy of CD-R*), des essais sont actuellement lancés sur la base de la seule température. Sont étudiés 2 types de formulation (phtalocyanine et cyanine) et 2 types de couche réfléchissante (or et argent). Si les résultats obtenus à 60 °C se confirment pour d'autres températures, une remise en question du modèle de vieillissement proposé par le groupe de travail sera discutée.

Détection acoustique d'insectes xylophages

[Voir II.2.6 contrat CR 8]

La détection de l'activité des insectes xylophages qui permet de déclencher des traitements des structures de bois ou des mobiliers infestés peut être opérée par des procédés acoustiques. Ces techniques mises au point pour certaines espèces (termites) peuvent-elles être étendues à d'autres espèces (*Lyctus*, *Vrillettes*) ? Dans quelles conditions ? La détection doit en particulier cerner les possibilités de détection en milieu bruyant.

La caractérisation des signaux émis dans des conditions préparées (espèce, qualité de bois) est associée à l'étude de systèmes proposés pour ce type d'application. La pertinence du développement d'un outil spécifique doit être évaluée.

Une telle étude implique une approche pluridisciplinaire : acoustique, traitement du signal, entomologie, science du bois,... ce que favorise la collaboration avec le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) du Ministère de la Culture.

3 . Publications

3.1 - PUBLICATIONS MAJEURES DE NIVEAU INTERNATIONAL

- P 1. AMBROISE D., BERNARD J.M., BLANCHARD J.L., GO L-TESTU F., GRANGE D., MORINEAU A., SERMIER F., THAURONT G., VALETTE N.; (1997), Exploitation graphique des plans factoriels; *Rev. Statistique Appliquée*, **XLV**(4), 36-64.
- P 2. BOUTILLON X., FAURE C.A. (1998), "The Mean-Projection Method for the transverse calibration of accelerometers - I. Theory", *Acustica/Acta Acustica* **84** 348-358.
- P 3. BOUTILLON X., GIBIAT V. (1996), "Experimental determination of the stiffness of saxophone reeds using the reactive power approach" *J. Acoust. Soc. Am.*, **100** (2), 1178-1189.
- P 4. BOUTILLON X., WEINREICH G. (1999), "Three-dimensional mechanical admittance: theory and new measurement method applied to the violin bridge", *J. Acoust. Soc. Am.* **105** (6), 3524-3533.
- P 5. CASTELLENGO M., (1999), Analysis of initial transients in flute like instruments. *Acta Acustica*, **85**, p.387-400
- P 6. COINEAU Y., THERON PD. VALETTE C.; (1997) Une association de phanères, constituant probablement un système de communication sonore original chez les acariens; *Acarologia*, **38**, (2), pp.111-116.
- P 6bis FABRE B., HIRSCHBERG A., WIJNANDS A.P.J., (1996) Vortex shedding in steady oscillation of a flue organ pipe. *Acustica Acta Acustica*; **82** (863-877).
- P 7. FAURE C.A. and BOUTILLON X. (1998), "The Mean-Projection Method for the transverse calibration of accelerometers - II. Experiments", *Acustica/Acta Acustica* **84** 359-371.
- P 8. GIBIAT V., CASTELLENGO M., (2000), Period doubling occurrences in wind instruments musical performance. *Soumis à Acta Acustica*.
- P 9. GRILLON,V., MEYNIAL, X., POLACK, J.-D. (1996) What can auralisation in small scale models achieve? *Acustica/Acta Acustica* **82**, 362-364
- P 10. HIRSCHBERG A., FABRE B. (2000), "Physical modeling of flue instruments: a review of lumped models", *soumis à Acustica – Acta Acustica*.
- P 11. KOKKELMANS S.J.J.M.F., VERGE M.P., HIRSCHBERG A. WIJNANDS A.P.J., SCHOFFELLEN R. L. M. (1999), "Acoustic behavior of chimney pipes", *J. Acoust. Soc. Am.* **105** (1), 546-551.
- P 12. MENOU K., AUDIT B., BOUTILLON X. and VACH H. (1998), "Holographic study of a vibrating bell: an undergraduate laboratory experiment", *Am. Journal of Phys* **66**(5), 380-385.

- P 13. MILLOT L., CUESTA CH., VALETTE C.; (2000) , Experimental Results when Playing Chromatically on a Diatonic Harmonica; accepted for *Acta Acustica*.
- P 14. PICAUT, J., POLACK, J.-D., SIMON, L.; (1997) “A mathematical diffuse field model based on a diffusion equation, *Acustica/Acta Acustica* 83, 614-621
- P 15. PICAUT, J., SIMON, L., POLACK, J.-D. (1999), Sound fields in long rooms with diffusely reflecting boundaries, *Applied Acoustics* 56, 217-240.
- P 16. SEGOUFIN C., B.FABRE, M.P.VERGE, A.HIRSHBERG, A.P.J.WIJNANDS (2000), “Experimental study of the influence of the mouth geometry on sound production in a recorder-like instrument : windway length and chamfers”, accepté par *Acustica – Acta Acustica*.
- P 17. VERGE M.P., FABRE B., HIRSCHBERG A., WIJNANDS A. P. J. (1997), Sound production in recorderlike instruments. I. Dimensionless amplitude of the internal acoustic field”, *J. Acoust. Soc. Am.* **101** (5), 2914-2924.
- P 18. VERGE M.P., HIRSCHBERG A., CAUSSE R. (1997), “ Sound production in recorderlike instruments. II. A simulation model”, *J. Acoust. Soc. Am.* **101** (5), 2925-2939.

3.2 - LES COMMUNICATIONS AVEC ACTES

- C 1. BESNAINOU Ch., (1999), Transforming the Voice of Musical Instruments by Active Control of the Sound Radiation, *ACTIVE 99*, Fort Lauderdale, pp 1317-1321
- C 2. BOUTILLON X. (1998), Detecting the Number of Degrees of Freedom of a Lip Reed in Brass-Instrument Playing, 16th International Conference on Acoustics (Seattle), 1117-1118, *135th ASA meeting, J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 5 Pt. 2, 3010.
- C 3. BOUTILLON X. (2000), Les instabilités vibratoires d’une corde de violon frottée par un archet, *colloque Mécamat-CNRS*, 9 p.
- C 4. BOUTILLON X., DAVID B. et FABRE B. (1997), An acoustical study for the restoration of the carillon in Perpignan - characterisation of bell dampings, *ISMA’97 Edimbourg, Institute of Acoustics* **19** (5), p.567-572.
- C 5. BOUTILLON X., DAVID B. et FABRE B. (1997), Étude acoustique pour la restauration du carillon de Perpignan, 4^{ème} Congrès Français d’Acoustique, *Marseille, SFA-Teknea*, **1**, 605-608.
- C 6. CASTELLENGO M., (1999), Métamorphoses de la flûte traversière au 19^{ème} siècle : Esthétique musicale, acoustique et facture. *Actes du colloque "Acoustique et instruments anciens"*, édité par la SFA; pp.85-100 (avec Ex. sonores).
- C 7. CASTELLENGO M., GOAD P., (1996), Comparison of Reed Stops of Four French Classical Organs, *4th Int. conf. on music Perception and Cognition.*; Mc Gill University - Montréal.
- C 8. CHOLLET R., AEBERLI G., BESNAINOU CH., (2000), Modification de la résonance de Helmholtz de la guitare par contrôle actif", *5ème CFA*, Lausanne.

- C 9. CHOLLET R., AEBERLI G., BESNAINOU Ch., (2000), Modifier la résonance de Helmholtz de la guitare par contrôle actif, 5^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lausanne.
- C 10. CUESTA C., VALETTE C.; (1998) Mécanique des cordes de clavecin et d'autres instruments, *Colloque Acoustique et instruments anciens, Cité de la Musique*, actes édités par la SFA, pp.47-58.
- C 11. DANIEL J., RAULT J.B., POLACK J.D., (1998) , Ambisonic encoding of other audio formats for multiple listening conditions, *AES 105^{ème} convention*, San Francisco.
- C 12. DANIEL J., RAULT J.B., POLACK J.D., (1999), Acoustic properties and perceptive implications of stereophonic phenomena, *AES 106^{ème} convention*, Rovaniemi.
- C 13. DAUVOIS M., BOUTILLON X. (1999), Grottes et lithophones, *Colloque Acoustique et instruments anciens – factures, musiques et science, Cité de la Musique*, , édité par SFA-Cité de la Musique, 215-223. (avec Ex. sonores)
- C 14. DAUVOIS M., FABRE B. (1999), Les instruments à vent paléolithiques, *Colloque Acoustique et instruments anciens – factures, musiques et science, Cité de la Musique*, , édité par SFA-Cité de la Musique, 29 p. (avec Ex. sonores)
- C 15. DAVID B. et BOUTILLON X. (1997), Estimation de paramètres modaux pour la mesure du rendement acoustique des guitares, *4ème Congrès Français d'Acoustique Marseille* , *SFA-Teknea*, 1, 597-600.
- C 16. DAVID B. et BOUTILLON X. (2000), “Rendement acoustique d'une guitare”, *5ème Congrès Français d'Acoustique*, Lausanne, 4 p.
- C 17. FONTAINE J.M. (1997), *Audiovisual Collection Preservation - Archival Storage Workshop. University of California*, San Diego,.
- C 18. FONTAINE J.M. (2000), Les disques optiques d'archivage des documents sonores, vidéos et multimédias, *Septièmes rencontres de la CST* (Commission Scientifique et Technique)
- C 19. FONTAINE J.M.; (1997) CD-R Photoaging, preliminary experiment. *Congrès IASA* (International Association of Sound and Audiovisual Archives), Mascate (Sultanat d'Oman).
- C 20. FONTAINE J.M.; (2000) Eléments de caractérisation de la qualité initiale et du vieillissement des disques CD-R, *JTS*, Paris.
- C 21. FONTAINE J.M; (Ed. 1999) Relevance of the parameters defining the quality of CDs. *JTS (Joint Technical Symposium)*, London 1995 -.
- C 22. GAILLARD P., LEGROS C., CASTELLENGO M., (2000) Modification de certaines caractéristiques physiques des sons de steeldrums en vue de la réalisation de tests psychoacoustiques; 5^{ème} CFA , Lausanne.
- C 23. GARCIA J. , MARZET D., FONTAINE J.M. (2000) La recherche d'information scientifique et technique en matière de conservation des supports audiovisuels, *JTS, (Joint Technical Symposium organisé par les ONG concernant les archives cinématographiques, sonores, vidéo et l'UNESCO)*,

- C 24. GRILLON, V., MARIA, F., MEYNIAL, X., POLACK, J.-D. (1997), Auralisation in small scale models. *ASVA 97*, Tokyo, 359-364
- C 25. GUERARD J. and BOUTILLON X. (1996), "Bowing virtual strings", *IEEE Proc. of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing 1996 (Atlanta)*, **3**, 1756-179.
- C 26. GUERARD J. et BOUTILLON X. (1997), Séparation en temps réel d'ondes acoustiques planes dans un tuyau cylindrique, *4ème Congrès Français d'Acoustique Marseille*, SFA-Teknea, **1**, 649-652.
- C 27. GUERARD J., BOUTILLON X. (1997), Real Time Acoustic Wave Separation in a Tube, *ISMA '97*, Institute of Acoustics **19** (5), Edimbourg p. 451-456.
- C 28. GUERARD J., BOUTILLON X. (1998), "Real-time Wave Separation in a Cylindrical Pipe with Applications to Reflectometry, Echo-cancellation, and a Hybrid Musical Instrument", *16th International Conference on Acoustics*, 2261-2262, 135th ASA meeting, J. Acoust. Soc. Am. **103**, Seattle 5 Pt. 2, 2874.
- C 29. HENRICH N., D'ALESSANDRO CH., CASTELLENGO M., DOVAL B.; (2000), Mesures électroglottographiques du quotient d'ouverture glottique en voix parlée et chantée. *JEP* 2000;
- C 30. HENRICH N., D'ALESSANDRO CH., DOVAL B., CASTELLENGO M.; (2000), Open quotient measurements on EGG, speech and singing signals, *4th International Workshop Advances in Quantitative Laryngoscopy*, Voice and Speech Research, Jena.
- C 31. HENRICH N., DOVAL B. AND D'ALESSANDRO C. (1999), Glottal open quotient estimation using linear prediction, *Proc. International Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications*, Firenze, Sept. 1999.
- C 32. HONG ZENG; (Ed. 1999) The restoration of audio recordings using frequency domain DSP Techniques running under windows. *JTS (Joint Technical Symposium)* London 1995 - Ed. 1999.
- C 33. LEMAIRE J., PICHON N., FONTAINE J.M; (éd 1999) Microspectrophotometric Analyses of changes in the organic materials used in optical discs. *JTS (Joint Technical Symposium)* London 1995.
- C 34. MAFFIOLO V., CASTELLENGO M., DUBOIS D., (1999), Qualitative judgments of urban soundscapes, *Internoise 99*, Fort Lauderdale, 1251-1254.
- C 35. MAFFIOLO V., DAVID S., DUBOIS D., VOGEL C., CASTELLENGO M., POLACK J.-D., (1997), Sound characterization of urban environment. *Inter-noise 97*, Budapest., 1239-1242..
- C 36. MAFFIOLO V., DUBOIS D., DAVID S., CASTELLENGO M., POLACK J.-D., (1998), Loudness and pleasantness in structuration of urban soundscapes. *Inter-noise 98*, Christchurch,.
- C 37. MAFFIOLO V., VOGEL C., POLACK J.-D., CASTELLENGO M., DUBOIS D., DAVID S., (1997), Ambiances sonores représentatives d'une ville : le cas de Paris. *4ème Congrès Français d'Acoustique, Marseille*, 303-306,.

- C 38. MILLOT C., CUESTA C., VALETTE C.; (1997) Interactions of Both Reeds in a Channel of a Diatonic Harmonica ; *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*, Intitute of Acoustics, University of Edimburgh, **2**, pp.261-266.
- C 39. MILLOT C., CUESTA C., VALETTE C.; (1997) Rôle de la cavité buccale dans le fonctionnement de l'harmonica diatonique ; *Proceedings of the 4th French Congress on Acoustics*, Marseille, actes édités par la SFA, **1**, pp.637-640.
- C 40. MILLOT C., CUESTA C., VALETTE C.;(2000) Geste buccal pour un jeu chromatique sur un harmonica diatonique, *5ème Congrès Français d'Acoustique*, Lausanne.
- C 41. NATHANAIL,S., LAVANDIER, C., POLACK, J.D. (1997) Influence of the visual information on auditory perception. *ASVA 97*, Tokyo, 285-290
- C 42. NATHANAIL,S., LAVANDIER, C., POLACK, J.D., WARUSFEL, O. (1997) Influence of sensory interactions between vision and audition on the perceptual characterisation of room acoustics. *ICMC'97*, Thessalonicki.
- C 43. SEGOUFIN C., B.FABRE, M.P.VERGE, E.M.S. HANSSSEN, A.P.J. WIJNANDS, A.HIRSCHBERG (1998), Recorder windway profile : influence on sound production, *ISMA'98*, Leavenworth, USA, p. 203-208.
- C 44. SEGOUFIN C., FABRE B., LAGREE PY., GOORMAN K., VAN DEN TILLAART J. (2000), Estimation de profils de vitesse de jet à la lumière d'un canal, *5ème Congrès Français d'Acoustique*, Lausanne, 4 p.
- C 45. VERGE M.P. (1996), "Aeroacoustic sources in flute-like instruments", *Proc. of the Nordic Acoustical Meeting*, Helsinki, p. 429-435.
- C 46. VERGE M.P. (1996), Physical modeling of aeroacoustic sources in flute-like instruments, *Proc. of the International Computer Music Conference* (Hong Kong), p. 5-8.
- C 47. VERGE M.P., SCHOFFELEN R., WIJNANDS A., HIRSCHBERG A., BOX C. (1997), Acoustics behaviour of chimney pipes, *ISMA'97*, Institute of Acoustics **19** (5), Edimbourg, p.309-314.
- C 48. VOGEL C., DUBOIS D., CASTELLENGO M., Perception of warning signals in urban context. *Internoise 98*, Christchurch, (1998).
- C 49. VOGEL C., MAFFIOLO V., POLACK J.-D., CASTELLENGO M., (1997) Sound characterization of urban environments: an approach based on ecological validity. *102nd Convention of the Audio Engineering Society*, Munich,.
- C 50. VOGEL C., MAFFIOLO V., POLACK J.-D., CASTELLENGO M., (1997), Validation subjective de la prise de son en extérieur, *4^{ème} Congrès Français d'Acoustique*, Marseille, 307-310.

3.3 - LES CONFERENCES INVITEES DANS LES CONGRES INTERNATIONAUX
--

- I 1. BESNAINOU Ch, (1998), Composites Materials for Musical Instruments : the Maturity, *ICA 98*, Seattle,
- I 2. BESNAINOU Ch, (1998), Workshop on Composite Materials Applied to Musical Instruments, *ISMA98*, Leavenworth
- I 3. CASTELLENGO M., Mouth tones of flue organ pipes : a control of sound aesthetics, *Joint Meeting: ASA and Forum Acusticum*, 2aMU1; Berlin,
- I 4. CASTELLENGO M., BESNAINOU C., DUBOIS D., (1999), Acoustical quality of musical instruments and categorization; *Joint Meeting: ASA and Forum Acusticum*, 4aMU8; Berlin.
- I 5. FABRE B. (1998), Noise and turbulence in flute-like musical instruments, *International Symposium on Musical Noises*, Stockholm.
- I 6. FABRE B., VERGE M.P., HIRSCHBERG A. (1999), Sound production in flue instruments: a review, *137th ASA meeting*, J. Acoust. Soc. Am. **105**, 2 Pt. 2, 939 et *Forum acusticum* (Berlin), *Acustica/Acta Acustica* **85** S1, S13.
- I 7. VERGE M.P. (1996), Sound production in flutelike instruments, *Institute of Physics Annual Congress*, Telford (UK).
- I 8. VERGE M.P., HIRSCHBERG A. (1996), Time-domain simulation of aeroacoustic sources in flutelike instruments, *3rd joint meeting of the ASJ and ASA* (Honolulu), J. Acoust. Soc. Am., 100(4) Pt. 2, p. 2811.
- I 9. VERGE M.P., HIRSCHBERG A. (1997), Flow visualization and physical modeling of flute-like instruments. *Int. Symp. of simulation, visualization and auralization for acoustics, research and education*, Tokyo, p. 157-164.
- I 10. VOGEL C., POLACK JD., CASTELLENGO M., DUBOIS D., (1999), Perception and meaning of warning signals in urban contexts.; *Joint Meeting: ASA and Forum Acusticum*, 5pNSa1; Berlin.

3.4 - LES AUTRES PUBLICATIONS

3.4.1 Contributions à ouvrages, revues diverses

- A 1. BOUTILLON X., GRIJALVA R. (1999), "Control index of the upright and grand piano actions", *137th ASA meeting*, J. Acoust. Soc. Am. **105**, 2 Pt. 2, 1056 et *Forum acusticum* (Berlin), *Acustica/Acta Acustica* **85** S1, S130.
- A 2. DAUVOIS M., BOUTILLON X., FABRE B. et VERGE M.P. (1998), "Son et musique au Paléolithique", *Pour La Science*, **253** (Nov. 98), 52-58.

- A 3. GOORMAN K., LAGREE PY., SEGOUFIN C., FABRE B. (2000), "Inviscid stability of a jet, application to sound production in a recorder", soumis à *EUROMECH'00*, Eindhoven, Pays-Bas.
- A 4. GOORMAN K., LAGREE PY., SEGOUFIN C., VAN DEN TILLAART J., (2000), "Flow in the flue channel of a recorder : theory and experiments", soumis à *EUROMECH'00*, Eindhoven, Pays-Bas.
- A 5. GUYOT F., CASTELLENGO M., VOGEL C., MAFFIOLO V., (1996) Une méthode d'étude de la qualité acoustique des sons réels complexes. *Acoustique et Techniques*, **7**, p 23-26..
- A 6. GUYOT, F., CASTELLENGO M., Fabre B.; Etude de la catégorisation d'un corpus de bruits, in *Catégorisation, Représentation et Systèmes Symboliques* édité par D.Dubois, Kimé Ed., Paris, p 41-58. (1997).
- A 7. MAFFIOLO V., CASTELLENGO M., DUBOIS D., Qualité sonore de l'environnement urbain : Sémantique et intensité. *Acoustique et Techniques*, **16**, 14-21, (1998).
- A 8. MAFFIOLO, V., VOGEL, C., POLACK, J.D., CASTELLENGO, M., DUBOIS, D., DAVID, S. (1998), Caractérisation des ambiances sonores urbaines. *Journées Ville & Acoustique*, Les cahiers du PIR-Villes, CNRS Paris.
- A 9. NATHANAIL, S., LAVANDIER, C., POLACK, J.D., WARUSFEL, O.; (1999) Influence of sensory interactions between vision and audition on the perceptual characterisation of room acoustics. *Forum Acusticum 1999*, Berlin, Paper 2pAAb5
- A 10. POLACK, J.D., SIKORA D. (1996) "Rapport sur l'étude acoustique de la salle Olivier Messiaen de Radio-France, Paris." *Rapport interne L.A.M.*, Déc.96; 58 p.
- A 11. SEGOUFIN C., FABRE B., HIRSCHBERG A. (2000), "Jet visualization at the mouth of a recorder: influence of length and chamfering", soumis à *EUROMECH'00*, Eindhoven, Pays-Bas.
- A 12. VALETTE C., (1996), Chapter 4 : *The Mechanics of Vibrating Strings*, in *Mechanics of Musical Instruments*, Edited by A. Hirschberg, J. Kergomard, G. Weinreich, CISM Courses and Lectures n°355, International Center For Mechanical Science, Springer Verlag, Wien New York, pp. 115-183.
- A 13. VERGE M.P., HIRSCHBERG A. (1996), Time-domain simulation of aeroacoustic sources in flute-like instruments, *J. Acoust. Soc. Am.* **100** (4 Pt2), 2811.

3.4.2 Notes et ouvrages d'intérêt général:

St LAURENT, G. - contribution D. SCHÜLLER et JM FONTAINE : Storage and Care of Grooved Recordings". Traduction française J.M. FONTAINE, TCC - UNESCO, Ed G. BOSTON, 1996

St LAURENT, G. - contribution D. SCHÜLLER et JM FONTAINE : Storage and Care of Magnetic Tape Recordings. TCC - UNESCO, Ed G. BOSTON en cours de publication.

COLLECTIF - Ouvrage sous la direction de M.F.CALAS et J.M. FONTAINE : Conservation des enregistrements sonores. Ed. CNRS - Ministère de la Culture, juillet 1996.

COLLECTIF - Glossary of Terms related to the Archiving of Audiovisual Materials - termes français. Contribution J.M. FONTAINE 1997. UNESCO, Library of Congress - A paraître.

COLLECTIF - Précis de conservation préventive. Contribution J.M. FONTAINE - La préservation des documents sonores et audiovisuels S.F.I.I.C. à paraître en 2000.

COLLECTIF, contribution J.M. FONTAINE - Conservation préventive du patrimoine documentaire - documents sonores et audiovisuel. Documents photographiques. Révision. CD-ROM Ed. UNESCO - IFLA - MCC, 2000.

3.5 - RAPPORTS DE CONTRAT.

Boutillon X., David B., Guyot F. et Fabre B.(1999) Etude acoustique du carillon de Perpignan et de sa restauration. *Rapport d'étude pour la DRAC Midi-Pyrénées..* 33p. + 3 CD audio;

FONTAINE J.M. (1997) Etude préliminaire du comportement au Photovieillissement (Xenotest) des CD. *Essais menés avec le LRMH (Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques).*

FONTAINE J.M. (1998) Caractérisation de la dégradation des disques compacts Hyperion - Analyse d'un échantillon de disques prélevés dans les collections de la BnF - analyses comparatives de disques anciens et récents *Rapport d'étude et de recherche pour la Bibliothèque nationale de France.*

FONTAINE J.M. (1998) Les atteintes portées aux documents vidéo par les opérations de traitement, maintenance et consultation ; Partie 1 : Détermination des conditions climatiques dans l'emprise du robot et à l'intérieur d'un des magnétoscopes. *Rapport d'étude et de recherche pour la Bibliothèque nationale de France.*

FONTAINE J.M. (2000) Les atteintes portées aux documents vidéo par les opérations de traitement, maintenance et consultation ; Partie 2 : température des magnétoscopes qui équipent le système de consultation. Etude de solutions. *Rapport d'étude et de recherche pour la Bibliothèque nationale de France.*

FONTAINE J.M. (2000) Elaboration d'un cahier des charges portant sur les conditions techniques de numérisation du son. *Plan de Numérisation de documents sonores, MRT, Ministère de la Culture, 1999. contribution J.-L.PASCON .*

4 . Formation par la recherche et enseignement

4.1 - THESES ET MEMOIRES ENCADRES AU LAM

Thèses soutenues et habilitation

Boutillon X. (1996), *Caractérisations acoustiques d'instruments de musique*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris 6.

David B. (1999), *Caractérisations acoustiques de structures vibrantes par mise en atmosphère raréfiée*, Université Paris 6.

Faure C.A. (1997), *Mécanique des vibrations tridimensionnelles – Méthodes de mesure et calibration*, Université Paris 6.

Floc'h, C. (1999) *Modélisation du rayonnement acoustique de structures tridimensionnelles couplées à une cavité en moyennes et hautes fréquences*, Université Paris 6 (confidentielle)

Gaillard P (2000); *Etude de la perception des transitoires d'attaque de sons de Steel-drums : particularités acoustiques, transformation par synthèse et catégorisation*. Thèse de Musicologie, Université Toulouse II.

Guérard J. (1998), *Modélisation numérique et simulation expérimentale de systèmes acoustiques – Application aux instruments de musique*, Université Paris 6.

Maffiolo V. (1999); *Caractérisation sémantique et acoustique de la qualité sonore de l'environnement urbain.*, Université du Maine - 1999

Millot L. (1999) *Étude des instabilités des valves : application à l'harmonica diatonique*; Université Paris 6,.

Nathanail S. (1999); *Influence de la vision sur l'évolution de la qualité acoustique* Université du Maine.

Razafindrakoto J. ; (1997); *La valiha de Madagascar : tradition et modernité en Imerina de 1820 à 1995*. Doctorat de Musicologie, codirection Manfred Kelkel et Claude Valette, Université Paris IV.

Vogel C. (1999); *Etude sémiotique et acoustique de l'identification des signaux sonores d'avertissement en contexte urbain - Codir. D. Dubois*; Université Paris 6.

Chuberre B. (2000), *Les registres et passages dans la voix chantée*, Diplôme d'Etat de Docteur en Médecine, Université de Nantes.

Thèses en cours

Chollet R. [1999-2002], *Etude des propriétés musicales des instruments à cordes par l'utilisation du contrôle actif de leurs vibrations*, Université Paris 6.

Henrich N. [1998-2001], *Analyse acoustique et perception de la source en voix chantée.*, Université Paris 6.

Ségoufin C. [1997-2000], *Etude expérimentale et théorique de la génération de bruit par l'interaction entre écoulement et obstacle*, Université Paris 6.

Guastavino C. [1999-2002] *Perception des basses fréquences dans l'environnement urbain*
Mzali M. 1998-2001]; *Etude des phénomènes basses-fréquences à l'origine d'une gêne pour le voyageur* .

DEA et Fin d'études d'ingénieur

Aeberli G. (1997), *Modification de la résonance de Helmholtz de la guitare par contrôle actif*, mémoire de DEA ATIAM .

Baskind, A. (1999) *Etude de la puissance acoustique rayonnée en champ diffus*. DEA ATIAM, Université Paris 6

Chassot L., Giraud F. (2000), *Etude expérimentale et simulation numérique du comportement de jets oscillants sous l'effet d'une perturbation acoustique*, mémoire de fin d'étude ENSAM Paris.

Chollet R. (1996), *Contrôle actif d'une lame de xylophone, étude d'un contrôleur PID*, mémoire de DEA d'Electronique, Paris 6.

Coenca, J. (1999) *Méthode des orbites en acoustique des salles - Application au calcul des modes de vibration d'une plaque rectangulaire*. DEA d'Acoustique Appliquée, Université du Maine

Cohen G. (1999) *Données temporelles et spectrales dans l'identification des sources et des événements sonores: action et matière;* .DEA ATIAM

Deback R. (1998), *Etude d'un capteur - actionneur pour modifier le couplage entre la corde et le chevalet d'un violon par contrôle actif*, PFE INSA de Lyon

De Vigneral C. (1999) *Détection acoustique d'insectes xylophages : état de l'art*. Stage ENSTA

Faivre Ch. (2000) *Détection acoustique d'insectes xylophages - caractérisation des signaux émis par 2 espèces*. DEA ATIAM

Marquis E. (1998), *Dissipation dynamique dans une structure sandwich de composite de carbone*, stage de fin d'études de l'École des Mines de Paris.

Imbert, M. (1999) *Contrôle des premières résonances d'une cavité unidimensionnelle par procédé rétroactif*. Mémoire d'Ingénieur CNAM

Massabieaux M. (2000), *Poursuite et estimation des composantes du signal musical*, mémoire de fin d'étude ENSEA Cergy.

Maurel V. (1999), *Etude préliminaire au rayonnement d'une plaque précontrainte*, mémoire de DEA ATIAM.

Molinier N. 2000) *analyse-synthèse de la voix. application à l'étude perceptive du quotient d'ouverture*, DEA SETI (Orsay)

Nabor E. (1997), *Implantation du contrôleur PID sur une carte DSP pour le contrôle actif d'une lame de xylophone*, mémoire de DEA ATIAM.

Rioux V. (1996), *Etude expérimentale des sources aéro-acoustiques dans les instruments à embouchure de flûte*, mémoire de D.E.A. ATIAM, ,.

Saint Loubry B. (1996), *Perception de la qualité des archets de violons*, mémoire de DEA ATIAM.

Ségoufin C. (1997), *Etude expérimentale des sources aéro-acoustiques dans les instruments à embouchure de flûte*, mémoire de D.E.A. ATIAM.

Vilain E. (1997) *Evaluation de la pertinence des différents paramètres de mesure de l'intensité pour la caractérisation de la qualité des ambiances sonores urbaines*. DEA Acoustique Appliquée, Univ. du Maine.

Maîtrise et cycle d'ingénieur

Bœuf J. (1999), *Mise en place d'un banc de mesure acoustique - Application à la réflectométrie*, stage de maîtrise de l'Université Paris 6.

Charissoux D. (1998), *Contrôle actif des résonances d'un champ acoustique confiné unidimensionnel*, maîtrise ENS Ulm

Charlaix S. (1999), *Etude de la sourdine de violon*, mémoire de fin d'étude de la classe d'acoustique musicale du CNSM.

Combet C. Serié E. (2000) *Etude des micros de guitares électriques*. magistère physique fondamentale Orsay

Conçalves A. (2000) modélisation et simulation numérique de la mécanique du piano. maîtrise de mécanique (paris 6)

Garcia L. (1996), *Rôle de l'embouchure dans la sonorité des flûtes à encoches*, mémoire de fin d'études, classe d'Acoustique Musicale au CNSMDP.

Geisler A. (1997), *remise en état d'étuve*. stage de technicien IUT evry -

Lochard J. (1997) *l'harmonica diatonique : etude des sensibilités et synthèse*. Maîtrise paris6

Louvain C. (1996), *Etude mécanique et perception de la qualité d'archets de violons*, mémoire de maîtrise Université St Quentin en Yvelines.

Menant E. 2000 DEUST université du maine

Pardo L.F. 1997 etude acoustique d'une salle d'écoute et d'amphithéâtres d'enseignement. DESS acoustique architecturale et urbaine;

Peter E. (1999), *Etude comparative de différentes marques de cordes de violons*, mémoire de fin d'étude de la classe d'acoustique musicale du CNSM.

Thiria B. (2000), *Etude expérimentale de jets oscillants : instabilité et production acoustique*, stage de maîtrise de l'Université Paris 7.

4.2 - THESES ET MEMOIRES ENCADRES HORS DU LAM

Thèses

Daniel J. (soutenance 2000); *Techniques de reproduction multicanale - optimisation des matriçages pour la prise de son et sa restitution*;

Jeanjean S. (en cours) *Caractérisation vibro-acoustique d'un habitacle automobile*

Picaut, J. (1998) *Modélisation des champs diffus par une équation de diffusion - Application à l'acoustique des salles et à l'acoustique urbaine*. Thèse de l'Université du Maine

Rioux V. (soutenance prévue hiver 2000-2001), *Organ pipe voicing : objective and subjective analysis*, Thèse de Doctorat réalisée en co-tutelle entre l'Université Paris 6 et l'Université Technique de Chalmers Suède.

Mémoires

Facchinetti M. (1999), *Etude des vibrations de l'anche de clarinette*, mémoire de fin d'études à l'École Polytechnique et *Analisi di un comportamento dinamico di un clarinetto* pour le mémoire au Politecnico de Milan.

Bodin P., (1997) *Phonétogrammes des mécanismes vibratoires laryngés; Mémoire pour la capacité d'orthophonie*. Univ. Paris 6-Salpêtrière.

Ragot M. (1998) *Phonétogrammes des mécanismes vibratoires laryngés et champ de liberté de la voix chantée chez l'adulte et chez l'enfant*. Mémoire pour la capacité d'orthophonie. Univ. Paris 6-Salpêtrière.

4.3 - ENSEIGNEMENT DE L'ACOUSTIQUE

<i>Etablissement et formation</i>	<i>libellé du cours</i>	<i>nom de l'enseignant</i>	<i>période</i>	<i>nbre d'h tot. ou hebdom</i>
Univ.Paris6 DEA Atiam	Psychoacoustique	M. Castellengo	depuis 1993	9h
	Acoustique des instruments de musique.	B. Fabre	depuis 1994	15h
	Vibrations et acoustique	C. Valette	depuis 1993	21h
	Acoustique fondamentale	J.D. Polack	1999	15h
Univ P6 Institut des Sciences et Technologie	Techniques de l'audiovisuel	B. Fabre	depuis 1993	15h
CNSMP/Fsms	Acoustique musicale	L. Millot	depuis 1999	150 h
CNSMP	Classe d'Acoustique Musicale (3 années) et DFS	M. Castellengo	depuis 1993	5h/hebdo
ENSL	Traitement du signal, acoustique physique et acoustique musicale	C. Valette	1997-1999	120 h
Ecole Polytechnique (Humanités et Sciences Sociales)	Acoustique et Sciences musicales	X. Boutillon	depuis 1993	20h
CNR Aubervilliers-La Courneuve	Acoustique Musicale et Techniques du Son	B. Fabre	depuis 1992	3h/hebdo
CNAM/Cycle B d'Acoustique	Acoustique des salles	J.D. Polack	1997-1999	12h

ENSL = Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière

CNSMP = Conservatoire National Supérieur de Musique de Paris; Fsms = Formation supérieure aux métiers du Son; DFS = Diplôme de Formation Supérieure.

4.4 - AUTRES ENSEIGNEMENTS

<i>Etablissement et formation</i>	<i>libellé du cours</i>	<i>nom de l'enseignant</i>	<i>période</i>	<i>nbre d'h tot. ou hebdom</i>
Ecole Polytechnique (Mécanique)	Travaux expérimentaux	X. Boutillon	depuis 1995	60
ENSEA	Traitement du signal, Physique, Acoustique	B. David	Pr. ENSEA depuis 1997	330
IFITEP – Université Paris 6	Électronique, Traitement du signal	J. Guérard	PRAG depuis 1997	384
Univ P6, Institut de Sciences et Technologie	Télécommunications; Systèmes Electroniques,	B. Fabre	depuis 1992	environ 120h annuelles
Université Paris XII- Créteil	Electro-acoustique, Capteurs, Mécanique Vibratoire.	Ch. Cuesta	1981;1990 1999.	230h
Univ. P6/Maîtrise de Mécanique	Ondes et Vibrations (cours et TD)	J.D. Polack	1996-1999	6h/hebdo
	Traitement du signal (TD)	id	1998-1999	2h/hebdo
	TP de Mécanique	id	1998	30h
Univ. du Maine/DEA d'acoustique	Acoustique des Salles	J.D. Polack	1996-1999	12h

5 . Collaborations

La collaboration avec l'équipe Langage, Cognition, Pratique, Ergonomie (LCPE) de D.Dubois s'est mise en place en 1994 et s'est développée avec le recrutement de S. David Linguiste. Toutes les recherches développées dans les thèmes de la perception des sons musicaux et de l'environnement sont menés en commun.

Plusieurs interactions avec les chercheurs du Laboratoire de Modélisation en Mécanique (LMM) sont entretenues soit par Benoit Fabre (P.Y. Lagrée etc) soit par Charles Besnainou (Joel Frelat)

Les relations avec l'équipe Traitement du Langage Parlé du LIMSI sont constantes et se développent avec l'élargissement des recherches sur la voix.

PSA Peugeot Citroën, Direction de la recherche : couplage structure/cavité (A.Bardot, C.Floc'h, X.Bohineust)

PSA Peugeot Citroën, Direction des achats : optimisation des haut-parleurs dans un habitacle automobile (Y.Hadjee, A.Vadé)

CCETT : technique de reproduction sonore multicanale, Ambisonics (J.B.Rault)

SNCF, Direction de la recherche : confort acoustique basse fréquence dans les TGV (P.E.Gautier, F.Létourneau)

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine : auralisation dans les maquettes de salles ; modélisation des champs diffus par la diffusion (X.Meynial, L.Simon)

IUT de Cergy-Pontoise : interaction vision audition dans les salles de concert (C.Lavandier)

Département de Technologie Acoustique, Université Technique du Danemark : disponibilité de Jean-Dominique Polack, titulaire de la chaire d'électroacoustique depuis août 1999

Laboratoire de dynamique des gaz de l'Université Technique de Eindhoven sur l'aéroacoustique des instruments à embouchure de flûte, dans le cadre du programme européen Van Gogh (A. Hirschberg)

Laboratoire de l'Université Chalmers (Suède) sur l'harmonisation des tuyaux d'orgue, dans le cadre d'un programme européen. (M. Kleiner)

Département de Physique de l'Université du Michigan, groupe d'acoustique musicale sur la physique des instruments de musique.(G. Weinreich).

Ecole Polytechnique sur les modes propres des anches et la simulation numérique de clarinette (A. Constantinescu, M. Fachinetti, M. Vach).

Institut de Paléontologie Humaine du Muséum d'Histoire Naturelle sur l'acoustique des instruments et lieux ornés paléolithiques (M. Dauvois).

Laboratoire de Simulation Numérique des Ecoulements Fluides – SINUMEF de l'ENSAM-Paris sur la modélisation numérique d'écoulement (P. Kuzzla).

IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique Musique), sur la synthèse sonore.

Facteurs d'instruments : Jean-Yves Roosen, Jean-Luc Boudreau, Henri Gohin (flûtes à bec), Munetaka Yokota (Orgues) sur l'application des recherches sur la flûte.

Société Applied Acoustic Systems sur la synthèse sonore par modèles physiques (M.P. Verge).

Collaboration avec Joseph Curtin, luthier à AnnArbor, Michigan, (Charles Besnainou) Les liens que nous avons tissés depuis 1995 avec ce luthier, un des meilleurs de sa génération, l'ont convaincu de l'intérêt des nouveaux matériaux dans la facture instrumentale. Dans un article retentissant publié par la revue internationale du violon "The Strad", il affirme sa vision de l'avenir de la lutherie utilisant les fibres synthétiques : "*I cannot believe a more exciting time to be a violin maker*", (avril 1999, pp.374-379).

Au cours de trois séjours (avril 98, juin 98 et décembre 99), on a aidé J. Curtin à assimiler les bases des techniques composites. Notre but étant la réalisation d'instruments de très haute qualité. Deux prototypes ont été depuis construits. En retour, la LAM a ainsi accès à des instruments très prestigieux (modernes et anciens) pour envisager des tests sur la qualité acoustique.