

Mémoire scientifique du projet CONSONNES

ANR-05-BLAN-0097-01 (décembre 2005 - mai 2009)

CONtrôle des SONs Naturels Et Synthétiques

Partenaires

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique LMA (UPR 7051 CNRS), Marseille; Sciences et Technologies de la Musique et du Son STMS (UMR 9912 CNRS, IRCAM), Paris; Laboratoire Traitement et Communication de l'Information LTCI (UMR 5141 CNRS, TELECOM Paris).

À ces partenaires officiels, s'ajoutent des participants actifs dont l'Université Pierre et Marie Curie, l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, l'Université d'Edimbourg, l'Université Libre de Bruxelles, l'Université Paris-Sud, l'INSA de Toulouse, l'ENS Ulm, et l'Université McGill (Montréal), qui a obtenu des financements complémentaires.

Enjeux et problématique, état de l'art

Les instruments de musique peuvent être classés en deux catégories selon le type d'oscillations qu'ils utilisent : *auto-oscillations* (instruments à vent : anches¹ ou flûtes; instruments à cordes frottées), ou oscillations libres (cordes frappées ou pincées, percussions). Ce projet s'intéresse à la première catégorie. Le fonctionnement en est *non linéaire* (une source d'excitation continue, ou lentement variable, comme le mouvement de l'archet, produit une oscillation), et il existe des *régimes* que le musicien doit *contrôler*. Pour un instrument traditionnel, il doit par exemple éviter les "canards" ou les sauts à l'octave, tout en contrôlant finement la fréquence de jeu et le timbre. Il le fait par apprentissage, et aussi en temps réel, grâce aux réactions qu'il perçoit (par l'oreille, les doigts, etc.). Quant aux instruments de synthèse, on cherche à les contrôler en temps réel à des fins d'expressivité musicale : ceci pose des problèmes de synthèse temps réel, mais aussi de contrôleurs (contrôleur de souffle, archet numérique, voire clavier). La problématique de CONSONNES est donc centrée sur les liens entre paramètres de jeu et paramètres du son. Les problèmes théoriques sont *directs* ou *inverses*, et les mesures peuvent porter soit sur des musiciens, soit sur des maquettes (artificielles). Un défi particulier que le projet s'est donné est l'étude des transitoires (attaques des notes ou transitions), sujet essentiel pour la perception des sons. Pour cela, la réalisation de l'asservis-

sement de bouches artificielles a constitué un noyau dur du projet.

Les travaux sur la production du son elle-même, par auto-oscillations, sont assez récents. Un article fondateur a été publié en 1983 (Mc Intyre, Schumacher et Woodhouse). On cherche autant à améliorer les modèles qu'à savoir les calculer de diverses façons selon les objectifs visés : calculs simplifiés pour la compréhension, précis pour la comparaison à l'expérience, rapides pour la synthèse. Il n'est pas exagéré de dire que la France est en pointe pour ces thématiques, notamment grâce au CNRS.

Les retombées attendues concernaient, outre le développement des connaissances, la facture et la pédagogie instrumentales, la composition, et la synthèse temps réel (matériels et logiciels).

Matériels et méthodes

Pour l'analyse théorique, la simplification des modèles (géométriques et physiques) et leur *réduction* est indispensable pour la synthèse temps réel et pour espérer résoudre des problèmes inverses. Dans ce but, tout l'arsenal des décompositions modales a été utilisé, y compris le concept de modes non linéaires, mais on utilise aussi des perturbations (et itérations). Du point de vue du problème inverse lui-même, les méthodes de l'automatique ont été utilisées. Plusieurs prototypes de bouches artificielles pour instruments à vent ont été réalisés, selon les objectifs (imitation d'un instrumentiste ou mesures acoustiques et optiques de paramètres), ou le type d'instrument (trompette, clarinette, flûte à bec). Par ailleurs la mesure du geste instrumental a été menée sur des "instrumentistes instrumentés". Il peut s'agir de la mesure directe des paramètres de jeu en cours de jeu (plus facile pour un violon, que pour une clarinette, car moins invasive). L'extraction des paramètres de jeu à partir du son, qui suppose la résolution du problème inverse, reste un verrou essentiel : les premiers pas sont faits en utilisant des signaux de synthèse. Pour tous les gestes, qu'ils soient *producteurs* ou *accompagnateurs* (comme les mouvements du buste), le projet a bénéficié de l'expérience de l'équipe de Mc Gill, grâce à sa connaissance de toutes sortes de capteurs.

¹Les lèvres d'un trompettiste sont des "anches lippales".

Résultats

I. Modèles : analyse et réduction

L'analyse approfondie des modèles de résonateurs d'instruments à vent en systèmes entrée-sortie a pour but la synthèse temps réel et la résolution du problème inverse.

L'équation des pavillons avec pertes visco-thermiques aux parois est dite de Webster-Loshkin, à dérivée fractionnaire en temps et coefficients variables en espace. L'existence, l'unicité et la stabilité asymptotique de la solution ont été démontrées. Une solution en guide d'ondes a été proposée, y compris dans le cas des courbures négatives qui posait encore des problèmes de stabilité. Par ailleurs, les modèles d'amortissement ont fait l'objet d'une optimisation numérique, les fonctions de transfert (de la transformée de Laplace) étant non standard avec pôles, points de branchement et coupures.

Les non-linéarités ne se rencontrent pas seulement là où le son est produit (interaction excitateur-résonateur), mais aussi dans le résonateur lui-même. Des équations d'ondes non linéaires ont été étudiées grâce aux séries de Volterra. Les applications sont les sons cuivrés et les cordes vibrantes (modèles de Kirchhoff-Carrier ou de poutre de Reissner). De nouveaux théorèmes sur les séries de Volterra donnent des rayons de convergence calculables et des erreurs garanties de troncature, pour des systèmes dynamiques à non-linéarité polynomiale.

Quant aux modèles d'auto-oscillations, ils ont d'abord été réduits à des systèmes d'équations différentielles ordinaires, par projection sur les modes du résonateur passif. Ces modes sont calculés par résidus ou numériquement. La simulation numérique montre l'apparition successive des modes avec le profil de pression dans la bouche pour un instrument à anche. Par ailleurs, l'étude des modes du système linéarisé a permis de réviser les résultats classiques de Wilson et Beavers (1974), expliquant le rôle de l'amortissement de l'anche. Ainsi l'introduction dans le modèle du débit produit par le déplacement de l'anche permet un très bon accord avec l'expérience pour les fréquences de jeu.

Une réduction considérable du modèle a consisté en l'application du concept de mode non linéaire à un système auto-oscillant, pour la première fois, avec une validation numérique (Fig. 1). De leur côté, les modes adaptés ("Proper Orthogonal Modes", POM) visent aussi à découpler les différents degrés de liberté du problème, ce que les modes (linéaires) du résonateur ne permettent pas. On cherche la famille de modes linéaires réels optimale pour approcher avec N modes le champ de référence. La trajectoire complète dans l'espace des configurations s'inscrit dans le mode non linéaire, mais le POM de valeur propre la plus élevée dirige la droite vectorielle qui minimise la somme des carrés des distances des points de la trajectoire à cette droite. Passer d'un type de mode à l'autre peut s'envisager comme un changement de variable linéaire ou non linéaire.

Au-delà du seuil d'instabilité du régime statique, l'ana-

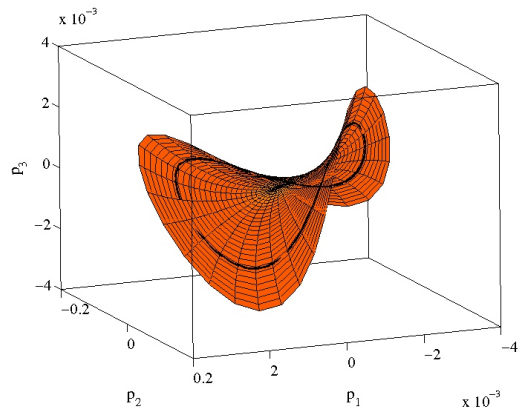


FIG. 1 – Mode non linéaire (variété invariante) d'une clarinette, calculé par la méthode amplitude-phase : la dynamique temporelle (ici un cycle limite) s'inscrit sur la courbe de l'espace des phases.

lyse des bifurcations permet la connaissance des régimes. Elle repose notamment sur l'équilibrage harmonique, et sur la méthode asymptotique numérique, mise au point pour calculer les solutions périodiques de ce type d'applications (le projet a été l'occasion de développer une nouvelle version de Manlab, qui permet les calculs de continuation interactive et d'analyse de bifurcation de problèmes non-linéaires, avec comme nouveauté la possibilité de faire des calculs en équilibrage harmonique). Ce qui est souvent appelé "théorème de Worman" a été démontré mathématiquement, pour des signaux continus et à dérivée continue (ce théorème indique l'évolution du spectre du son près du seuil quand le paramètre d'excitation varie).

II. Synthèse temps réel et problèmes inverses

La synthèse temps réel suppose encore des simplifications spécifiques. L'étude de résonateurs simplifiés a abouti à un modèle générique pour les bois (par ex. saxophone) et les cuivres (par ex. trompette), défini à partir de seulement 7 paramètres géométriques et aboutissant à un filtre numérique à moins de 20 coefficients. Le calcul des transitoires a été amélioré : l'effet non linéaire de la fermeture d'un trou a été introduit dans les programmes pour affiner les transitions entre notes, ainsi que l'effet du couplage du conduit vocal avec l'instrument, avec un modèle original qui considère à la fois régime permanent et transitoires. La *synthèse par modèles physiques*, qui reproduit la production du son à partir de la cause (la source d'énergie) se distingue traditionnellement de la *synthèse du signal*, qui reproduit l'effet (le son). Une première étude de contrôle d'un modèle de re-synthèse additive de clarinette (la synthèse du signal la plus élémentaire) à partir de grandeurs perceptives issues d'un modèle physique de fonctionnement a été menée.

Pour résoudre le problème inverse (trouver les paramètres de jeu à partir des sons), un observateur de l'état oscillant a été construit pour estimer la commande par moindres carrés récursifs, et a donné de premiers résultats dans des cas simples.

Enfin, le contrôle d'une variable de base du jeu, la fréquence, et a été appliqué à un instrument "simple", la flûte à coulisse : de la consigne en fréquence, il s'agit de trouver la pression d'alimentation et la longueur. Utilisant les modèles de flûtes, ils ont permis une réalisation expérimentale probante. Le modèle permet donc aussi le contrôle du résultat (le son) et pas seulement des paramètres de jeu, discuté au paragraphe suivant.

III. Bouches artificielles (BA) et robot-musicien

Le projet est parti de la bouche artificielle multi-instruments (MIAM) de l'IRCAM (en collaboration avec le LMA), avec réglage manuel de la pression de la bouche. L'asservissement en pression a été développé, avec une électrovanne et un contrôleur PID à gain adaptatif pour compenser le comportement non linéaire des instruments, grâce à des systèmes temps réel de prototypage rapide d'asservissements numériques. Pour la clarinette, une bouche spécifique avec une interface mécanique assurant une fonction de pince soignée et stable, permet des mesures de seuils reproductibles et précises, alimentée par un ballon asservi en pression avec une stabilité de quelques Pascal. Pour la flûte à bec, une bouche artificielle associée à des doigts électromécaniques, permet la caractérisation comparative d'instruments pour aide à la facture (nature des bifurcations, volume de jeu,...). Les asservissements destinés à la régulation fine sont opérationnels (et publiés). S'agissant de la restitution d'attaques, la reproduction d'un profil de pression a été étudiée dans le cas de la flûte à bec grâce à un asservissement couplé à un système d'apprentissage par commandes répétitives (Fig. 2).

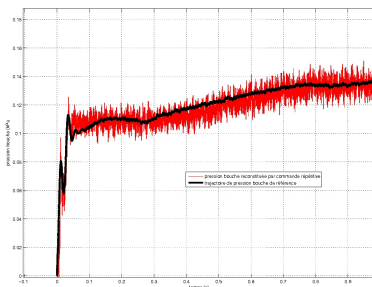


FIG. 2 – Reproduction d'un transitoire de flûte : en trait noir, la trajectoire de pression d'alimentation de référence, en trait fin (rouge), la pression reconstituée par commande répétitive. À noter les deux maximums, analysés comme essentiels pour une bonne attaque.

Les diagrammes de bifurcation sont mesurés grâce à une

montée (ou une descente) extrêmement lente en pression, qui permet l'inspection fine de la dynamique d'un instrument. En particulier, des régimes très difficiles à obtenir habituellement, les sons éoliens de flûtes, ont été observés au début et à la fin, ainsi que l'hystérésis dans les changements de régime entre la montée et la descente en pression (Fig. 3). Pour une clarinette, on peut asservir soit la pression dans la bouche, soit la pression dans le bec pour obtenir des diagrammes de bifurcation avec une plus grande précision.

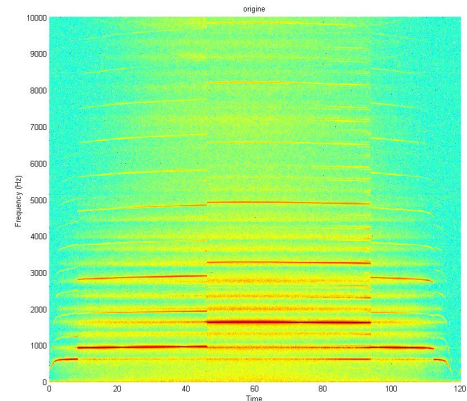


FIG. 3 – Schéma de bifurcation pour une flûte à bec alto en analyse temps-fréquence. C'est la pression d'alimentation qui croît puis décroît avec le temps.

Un projet Mécatronique de l'École des Mines, impliquant de nombreux étudiants, a visé la mise au point d'un robot-trompettiste. La finalité est directement musicale, puisqu'il répond à un intérêt de compositeurs, mais aussi scientifique. S'étalant sur la durée du projet, la robotisation de la BA a été menée à bien (collaboration ENSMP, Lycées Diderot, Paris, et Léonard de Vinci, Melun, Fig. 4). Le procédé de fabrication des lèvres a été amélioré. De premières notes de trompette (tenues, vibrées, de la nuance piano à forte) ont pu être jouées et pilotées.

Enfin une recherche expérimentale des paramètres de contrôle d'un trompettiste, comme la force d'appui des lèvres, a été menée, ainsi que la caractérisation du comportement des lèvres artificielles, et celle des sons émis par la trompette jouée par la bouche artificielle.

IV. Jeu instrumental, geste, capteurs et contrôleurs gestuels

Pour les instruments à vent, de nombreuses mesures des paramètres de jeu d'un instrumentiste (flûtes, anches, cuivres) ont été réalisées. La fréquence de jeu instantanée d'une clarinette a été mesurée, montrant que le contrôle et la perception de la hauteur par les instrumentistes demandent encore de nombreux travaux, mais plusieurs questions importantes ont pu être posées. Concernant le rôle du conduit vocal dans le jeu du saxophoniste, sujet scientifique d'actualité, les mesures de pression dans la

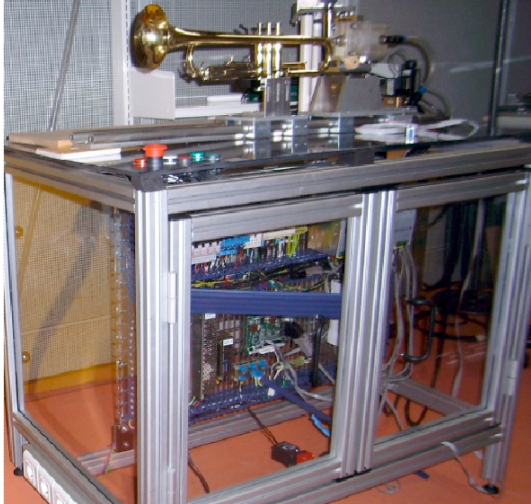


FIG. 4 – Robot-trompettiste (projet Mécatronique)

bouche et le bec ont donné de nouveaux résultats, grâce à des traitements adéquats.

La caractérisation de la famille des flûtes traversières a porté sur les variations des paramètres et l'expressivité. Une mesure de la vitesse du jet, grâce à plusieurs capteurs de pression et une caméra haute définition, donne accès à un paramètre sans dimension (Fig. 5), que l'on trouve maintenu constant par l'instrumentiste sur toute la tessiture d'un instrument de la famille. Il est identique pour trois des instruments, la flûte traversière standard montrant une singularité. Ce type de résultats est important pour comprendre le travail des facteurs, mais il reste à interpréter. D'autres types de mesures ont permis aussi de comparer des flûtistes débutants et expérimentés.

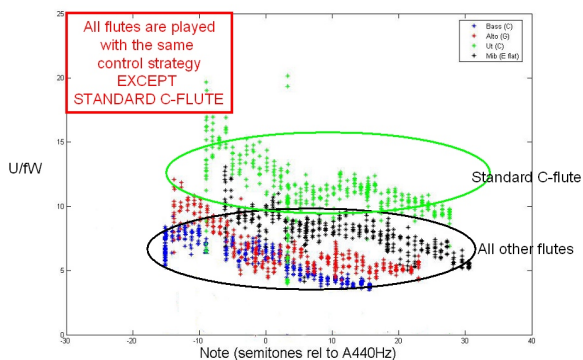


FIG. 5 – Paramètre sans dimension U/fW (U vitesse du jet, f fréquence, W distance du biseau) pour différentes notes de différentes flûtes.

Il n'est guère possible de détailler l'ensemble des mesures de gestes et leurs objectifs. Donnons ici un exemple d'acquisition indirecte, celle des gestes de flûtistes pour retrouver des doigtés utilisés lors des "overblowing" (changements de régimes, par ex. octavation). Puisque un flûtiste peut jouer plusieurs notes différentes avec un même doigté, l'utilisation de capteurs sur les clefs de la

flûte ne permet pas de différencier la note jouée (Fig. 6). L'analyse du bruit résiduel dans le spectre sonore de la note nous a permis, utilisant des techniques de classification de formes, de retrouver les doigtés utilisés avec des erreurs en dessous de 1.3%.

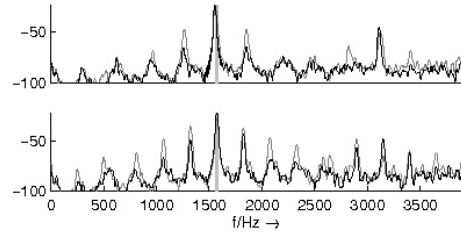


FIG. 6 – Transformées de Fourier sur les premières 100ms (noir) et sur les 100ms suivantes (gris) pour 2 doigtés permettant d'obtenir un Sol 6. Pour le Mi b 4 (en haut), le Sol6 représente le 5è harmonique, et pour le Do 4, le 6è. Le trait gris vertical indique la fréquence de jeu du Sol 6. L'attaque et le début de la tenue de la note présentent les mêmes résonances caractéristiques du doigté utilisé.

Pour la mesure du contrôle des instruments à cordes frottées, un dispositif (Fig. 7) capte les mouvements de violonistes en situation réelle de jeu. L'analyse montre certaines caractéristiques du contrôle moteur (phénomènes d'anticipation et de coarticulation gestuelle, par ex.) et permet de modéliser les trajectoires temporelles des paramètres de contrôle pour certains modes de jeu typiques. Les modèles de gestes ont été utilisés dans des approches paramétriques du jeu instrumental pour contrôler les modèles de synthèse de manière réaliste et améliorer la synthèse sonore du violon. L'implémentation du modèle pour la simulation en temps réel a aussi permis d'éprouver différentes interfaces de contrôle (capteur, tablette graphique) qui offrent une alternative intéressante pour l'étude du contrôle de l'instrument virtuel. Enfin la simulation numérique de l'instrument a permis d'interpréter les stratégies de contrôle de l'instrumentiste et la manière dont il utilise l'espace de contrôle disponible, en particulier pendant les transitoires.

Éléments de bilan et conclusions

L'intérêt de ce projet a été de franchir une étape en la construisant de façon coordonnée, de pouvoir organiser simplement des réunions fructueuses, d'offrir aux chercheurs en formation une ouverture, de permettre aux chercheurs et étudiants français de développer une fructueuse collaboration internationale avec le Canada, avec échange de données et de méthodes, en plus de fréquentes visites de recherche entre les institutions participantes. Le franchissement de cette étape a été rendu possible par l'appel de l'ANR à des projets blancs. Il reste maintenant à exploiter tout le potentiel mis en place, si possible avec des crédits de base (ce serait hautement souhaitable), en attendant de définir une autre étape.

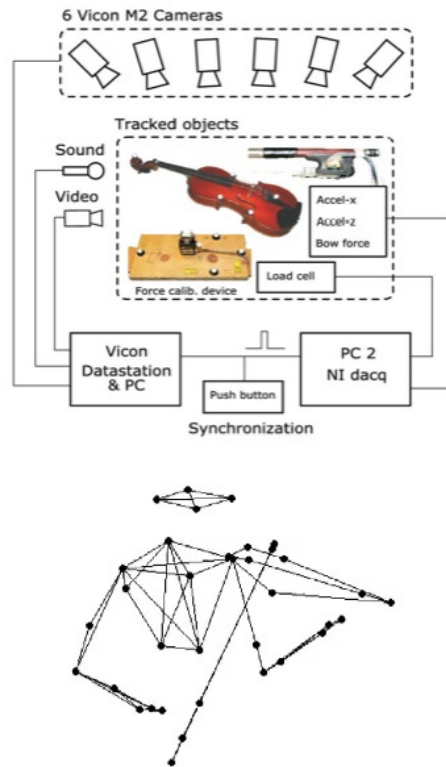


FIG. 7 – Mesure du geste du violoniste. Haut : Dispositif de mesure combinant six cameras et des capteurs placés sur l’archet. Bas : Visualisation de la position des marqueurs placés sur l’instrumentiste.

Le projet a permis de faire fructifier les compétences complémentaires des nombreux participants, surtout français et canadiens. L’apport en matière expérimentale est très riche, et les collaborations vont continuer. Le projet était ambitieux et vaste, allant de la production de théorèmes aux mesures sur instrumentistes, des instruments naturels (“acoustiques”) aux contrôleurs de son. Les lettres d’industriels qui soutenaient le projet à ses débuts laissent espérer des valorisations en matière de synthèse, mais les retombées en matière de facture instrumentale ou de pédagogie musicale existent aussi.

On peut affirmer que ce projet a complètement atteint les objectifs expérimentaux, et en réalité les a même dépassés, grâce à des synergies qui n’avaient pas été imaginées. Du point de vue théorique et numérique, de grands progrès ont été accomplis, notamment en ce qui concerne les méthodes. Autant que les résultats eux-mêmes, le projet a donc permis d’étayer une problématique et des méthodes, avec une volonté de les faire connaître. La problématique générale “Contrôle” apparaît aujourd’hui plus importante à beaucoup dans la communauté d’acoustique et synthèse musicales. L’organisation de sessions spécialisées sur ce thème lors de grands congrès d’acoustique et d’automatique en 2008 a mis en contact des spécialistes des deux domaines, et en outre un numéro spécial de la revue *Acta Acustica-Acustica* est programmée pour 2010 sur le thème “Natural and vir-

tual instruments : control, gesture and player interaction.”, avec une responsabilité importante des participants à CONSONNES. Nous notons aussi que dans le même esprit, les réunions générales ou spécialisées de CONSONNES ont été ouvertes à des invités.

De façon plus générale, certains verrous demeurent. En voici quelques-uns :

- la déduction des paramètres d’excitation à partir du son sera un pas considérable en avant concernant l’interprétation, mais les progrès de leur mesure directe ont été significatifs, comme le montre l’exemple remarquable des résultats sur le violon. Les progrès des méthodes très variées de mesures de gestes, non moins variés, iront aussi dans ce sens.
- La compréhension plus fine des transitions entre notes doit être l’objet d’études théoriques et expérimentales de ce que l’on appelle les bifurcations dynamiques, mais la mesure extrêmement précise de seuils est maintenant possible.
- Le contrôle de la justesse pour la synthèse temps réel d’instruments à vent avec certains contrôleurs (de souffle ou à clavier, par exemple), reste aussi un beau sujet d’études.

Parmi les projets expérimentaux, la régulation fine (flûte et clarinette) ayant donné des résultats convaincants, les développements futurs concerneront l’asservissement de la pince de clarinette, l’étude du contrôle de transitoires du jeu de cet instrument pour une meilleure restitution des attaques et transitoires tels que mesurés in situ sur musicien grâce à des bords instrumentés. Dans ce cadre, et pour partir d’un instrument plus simple, le développement d’un banc complet de caractérisation de flûtes à bec doit aboutir à un véritable robot flûtiste destiné à reproduire le geste préalablement acquis et mesuré sur musicien. En ce qui concerne les cuivres, on cherchera à mettre au point des asservissements de la force d’appui des lèvres sur la trompette. À noter que la question du rôle de la langue reste ouverte pour les instruments à anche, y compris les cuivres.

Parmi les projets théoriques, l’emploi des séries de Volterra pour la propagation non linéaire est maintenant solidement établi, et doit être utilisé pour la synthèse temps réel ; quand aux modes non linéaires, il reste à élargir leur étude à d’autres instruments, et résoudre quelques difficultés restantes liées sans doute aux modèles employés, et à la variation dans le temps des paramètres d’excitation. Tout ceci, répétons-le, a à voir avec la question des transitoires.

La liste de publications est donnée en annexe.