

Compte-Rendu des Travaux Accomplis par l'Equipe Acoustique Instrumentale de l'I.R.C.A.M. dans le Cadre du Projet de "Design Sonore" de la Voiture Electrique TULIP

Présentation

Le projet d'ensemble, commandité par PSA - Peugeot Citroën, est mis en oeuvre par Espaces Nouveaux - Atelier de Recherches Acoustiques Appliquées, sous la direction de Louis Dandrel (voir Annexe I). Il débute par une mission préliminaire portant sur la "création d'un son prototype de la voiture TULIP". La tâche de l'I.R.C.A.M. s'inscrit en phase III de cette mission et se définit en termes de "modélisations informatiques et formalisation en sons de synthèse" (voir Annexe II).

La réalisation du travail implique initialement l'utilisation du logiciel de synthèse modale *Modalys* développé par l'équipe Acoustique Instrumentale de l'I.R.C.A.M. . Cet outil est employé comme un moyen d'assister et de prolonger le travail de création qu'effectue Sylvain Ravasse, luthier, en permettant des 'modifications virtuelles' sur les éléments qu'il construit afin d'explorer leurs possibilités sonores.

Concrètement, l'activité s'est adaptée à l'évolution des prototypes en s'orientant, à plusieurs reprises, vers différents compléments théoriques pour les besoins d'une modélisation plus approfondie ou pour répondre à des interrogations suscitées lors de la conception d'un 'instrument'.

Description des travaux

a/ Le 'bol tibétain'

L'une des premières voies de recherche du son prototype s'est intéressée aux instruments fonctionnant sur le principe du 'bol tibétain'. Cette appellation générique désigne, en fait, un procédé de production du son qui consiste à faire entrer en résonance une structure grâce à une excitation régulière de type frottement.

Dans le cas du bol tibétain, il s'agit d'une structure en métal, hémisphérique, dont on frotte le bord supérieur, de manière circulaire, à l'aide d'un bâton de tissu afin de favoriser l'adhérence (voir Annexe III); après une longue phase transitoire, le son entretenu est généralement assez aigu et son rayonnement présente la caractéristique d'être très diffus. C'est le même principe qui est à l'origine du 'chant' d'un verre de cristal frotté sur sa circonférence avec un doigt mouillé; cet exemple a d'ailleurs servi de base expérimentale à une tentative de modélisation du phénomène par synthèse modale (voir Annexe IV).

L'examen préalable de la littérature fait apparaître l'existence de plusieurs recherches sur le sujet ayant quasiment toutes en toile de fond l'étude d'un instrument de musique à part entière pour lequel, entre autres, Mozart et Beethoven ont composé : l'harmonica de verre [*"Acoustics of the glass harmonica"*, Thomas D. Rossing, J. Acoust. Soc. Am. **95** (2), Feb. 1994 - *"A study of wineglass acoustics"*, A. P. French, Am. J. Phys. **51** (8), Aug. 1983]. Ces études montrent, d'une part, que le comportement vibratoire d'un 'verre chantant' est très semblable à celui d'une cloche et, d'autre part, que le mouvement du doigt sur le bord du verre, qui à l'origine du son, s'apparente au mouvement de l'archet sur la corde, c'est-à-dire du type adhérence-glissement.

Il s'avère que l'utilisation de *Modalys*, dans ce cas précis, nécessite de créer, en termes de données modales, un nouvel objet qui simule la réponse vibratoire d'un 'bol tibétain'. Car, même en simplifiant le problème et en remplaçant dans un premier temps le verre par un cylindre, les résonateurs du type structure vibrante déjà existants dans *Modalys* sont soit des plaques, soit des membranes (on peut aussi envisager de créer un nouveau type de structure vibrante pour *Modalys*, mais cela dépasse les objectifs de la mission).

En s'appuyant donc sur la théorie vibratoire du cylindre vibrant [*"Theory of plates and shells"*, S.P. Timoshenko & S. Woinowsky-Krieger, McGraw-Hill International Ed. - *"Sound and structural vibration"*, F. Fahy, Academic Press - *"Rayonnement acoustique des structures"*, C. Lesueur, Ed. Eyrolles], l'écriture d'une application dans *Matlab* permet de visualiser et sauvegarder dans un fichier lisible par *Modalys* les déformées modales d'un cylindre pour un ensemble de points de discrétisation et un nombre de modes choisis.

Cet objet externe peut alors être excité suivant toutes les possibilités offertes par *Modalys* (marteau, plectre, archet, voire anche simple). D'après les conclusions des études mentionnées précédemment, l'excitation de type *bow* (archet) semble a priori la plus pertinente pour rendre compte du phénomène physique qui permet de faire 'sonner' le bol tibétain ou le verre de cristal.

Ainsi, en réutilisant le modèle d'archet décrit dans l'exemple n° 6 du guide de d'apprentissage de *Modalys*, nous tentons d'appliquer une force de frottement au cylindre vibrant. Cependant, le caractère 'virtuel' de cette interaction impose une démarche assez intuitive dans le réglage des paramètres physiques du système (géométrie du résonateur, valeur et répartition de la force excitatrice, etc ...) et ne nous a pas permis, jusqu'à présent, d'obtenir une synthèse sonore intéressante du point de vue de la ressemblance avec la réalité acoustique d'un instrument de type 'bol tibétain'.

b/ Multiphoniques d'un tuyau d'orgue

Un autre champ d'investigation exploré par S. Ravasse, se concentre autour de l'utilisation du mouvement rotatif de certains éléments, notamment les roues, pour générer un débit d'air continu.

Une maquette est construite à partir de cette idée : le montage comprend une roue à aubes, solidaire de la jante, qui produit le courant d'air suffisant pour alimenter un système acoustique de type tuyau d'orgue, possédant donc un excitateur à 'embouchure de flûte' (lame d'air/biseau) et un résonateur, en l'occurrence, de section carrée. Le son émis est relativement puissant, directif et possède une tonalité très marquée. En outre, ce principe de production sonore présente l'atout majeur d'être dynamique c'est-à-dire en relation directe avec l'allure de la voiture, les variations de vitesses se traduisant au niveau perceptif par une modulation d'amplitude, de timbre et de fréquence fondamentale.

En revanche, dans le cadre imposé par le projet, la présence d'une tonalité trop marquée apparaît vite comme un obstacle au confort acoustique de l'objet TULIP et doit donc être largement atténuée. Pour cela, les recherches s'orientent vers l'émission de sons multiphoniques qui, par nature, possèdent une plus grande richesse de timbre.

Une étude bibliographique met à jour des documents assez complets qui abordent différents aspects de la multiphonie : principe physique sous-jacent, nomenclature et caractéristiques des différentes familles de sons multiphoniques, moyen d'obtention au niveau du doigté ou de l'embouchure, etc ... [*"Multiphonic tones in the woodwind instruments"*, John Backus, J. Acoust. Soc. Am. **63** (2), Feb. 1978 - *"Sons multiphoniques aux instruments à vent"*, Michèle Castellengo, Rapport IRCAM 34/82]. Cela étant, toutes ces études se réfèrent solidement à un ou plusieurs instruments de musique réels (flûte, hautbois, clarinette, etc ...) et ne s'intéressent quasiment jamais au problème général de la production d'un son multiphonique pour un résonateur quelconque.

Notre tâche sur ce sujet qui peut se formuler par "quelle modification faut-il apporter sur la maquette du tuyau d'orgue de S. Ravasse pour émettre un son plus coloré que le son harmonique initial ?" semble donc nécessiter une étude approfondie pour aboutir à des résultats exploitables; et ceci, d'autant plus que l'emploi de *Modalys* se heurte au fait que le seul mode d'excitation déjà implémenté pour les instruments à vent correspond à une embouchure de type anche simple.

Néanmoins, le tuyau d'orgue expérimental construit peut être en partie modélisé grâce au logiciel *Resonans*, également développé par l'équipe Acoustique Instrumentale de l'I.R.C.A.M. . A partir des données géométriques de la maquette, cet outil fournit des informations concernant la fréquence et l'amplitude des résonances, le degré d'harmonicité, la directivité du rayonnement, etc Il est également possible de prévoir l'effet, sur toutes les grandeurs mentionnées ci-dessus, de la perce d'un trou ou d'une modification de la géométrie.

Malgré cela, l'interprétation de ces résultats théoriques, pour l'étude de la multiphonie, reste délicate car il s'agit d'un phénomène relativement instable dépendant beaucoup de l'action complexe de l'embouchure qui constitue l'élément le plus délicat à prendre en compte dans ce genre de calculs.

c/ Exploitation de la 1^{ère} prise de son

Les travaux qui suivent sont mis en oeuvre à partir de données sonores recueillies à l'atelier de S. Ravasse ou dans le studio de Espaces Nouveaux. Les 'instruments' du moment sont enregistrés sur cassette DAT et constituent les références pour les travaux de synthèse effectués à l'I.R.C.A.M. .

La première séance fournit deux directions de travail : un son d'aspect percussif réalisé à partir d'une paille en plastique coudée dont on actionne en compression/détente le soufflet faisant office de coude, et un son 'soufflé' obtenu en aspirant par l'orifice d'un bouchon de cocote-minute. Pour cette phase d'approche, il est important de préciser que le rendu sonore importe davantage que la manière plus ou moins 'anecdotique' d'obtenir ces sons, le but étant d'abord d'illustrer les principes susceptibles de constituer la structure du son prototype.

Cette remarque est également valable pour la modélisation informatique : à ce stade, le but n'est pas de construire un modèle de paille ou de bouchon de cocote-minute mais de trouver des équivalents à ces objets, en terme de modèles physiques et, à fortiori, d'instruments réalisables.

Le travail s'articule donc en une première phase d'analyse des sons - essentiellement avec le logiciel *AudioSculpt*, développé à l'I.R.C.A.M. - et une seconde de modélisation en vue d'obtenir des sons de synthèse pouvant se comparer à ceux d'origine.

L'étude du son percussif utilise, dans un premier temps, des éléments déjà existants de *Modalys*, en l'occurrence un marteau semblable à celui de l'exemple n° 4 du guide d'apprentissage de *Modalys* et une plaque circulaire ou rectangulaire. Les premiers résultats s'avèrent médiocres car, malgré un travail sur le profil de frappe du marteau, l'impulsion reste trop franche et ne donne pas la consistance de l'attaque 'bruitée', contenue dans le son de référence. De plus, les résonateurs choisis (*rect-plate* ou *free-circ-plate*) ont un timbre assez éloigné de celui évoqué par la référence acoustique qui s'apparenterait davantage à une baguette de bois.

Ces constatations nous amènent, de nouveau, à envisager le résonateur comme un objet externe. Pour ce faire, on utilise les récents résultats d'un stage effectué à l'I.R.C.A.M. autour du xylophone qui a abouti, entre autre, à la mise au point d'une application *Matlab* permettant d'éditer le fichier modal d'une barre libre dont on détermine les dimensions géométriques et les propriétés mécaniques. Ainsi, plusieurs baguettes sont modélisées et sont excitées, dans un premier temps, par l'objet de type marteau utilisé précédemment.

On s'intéresse ensuite au mode d'excitation : parmi les divers possibilités de *Modalys*, le *controller noise* - correspondant à un générateur de bruit blanc - paraît être un choix pertinent pour transcrire l'aspect 'bruité' de l'attaque dont il est question plus haut. Ce contrôleur possède plusieurs paramètres de réglages qui jouent essentiellement sur le filtrage et le gain du signal qu'il produit. Après de nombreux essais pour mieux cerner l'effet de ces paramètres sur le résultat de l'excitation, on aboutit finalement à des rendus sonores correctes vis-à-vis de la référence fixée.

Par la suite, à partir de certains de ces modèles élémentaires de percussion, une amélioration permet de rendre l'effet de répétition et de stéréophonie existant dans le son de référence; elle relève essentiellement de l'écriture d'un algorithme *Scheme* plus performant et de la possibilité offerte par *Modalys* de jouer sur plusieurs canaux.

L'étude du son 'soufflé' exploite, quant à elle, les objets disponibles dans *Modalys* et notamment les différents tubes acoustiques (*closed-open-tube*, *closed-closed-tube*) mais également de manière moins évidente, les plaques ou les membranes. Il

s'avère, par ailleurs, que le mode d'excitation traduisant le mieux le souffle reste, au sein de *Modalys*, le générateur de bruit blanc déjà utilisé lors de l'étude précédente.

Bien entendu, en se plaçant toujours dans l'optique d'un son de référence, le réglage des paramètres de l'excitateur est totalement différent et nécessite d'opérer, d'une part, un filtrage supplémentaire sur le bruit blanc grâce au *controller constant-second-order-filter* et de modifier, d'autre part, l'amortissement modal de certaines résonances d'un tube acoustique grâce à la fonction *set-mode-loss!*.

Finalement, la configuration intégrant toutes ces données génère un son satisfaisant mais le caractère virtuel assez marqué du modèle - notamment, à cause de la modification de l'amortissement modal - empêche, dans l'immédiat, de fournir un équivalent instrumental réalisable par S. Ravasse.

d/ Exploitation de la 2nde prise de son

Les enregistrements effectués au cours de la séance révèlent deux nouvelles avancées dans la recherche du son de TULIP.

D'une part, le bruit de souffle est concrétisé par un montage s'inspirant du principe de l'appeau. Cet instrument, destiné à l'origine à imiter le cri des oiseaux se présente sous la forme de deux diaphragmes incurvés et couplés à une 'pompe à air', généralement un soufflet en caoutchouc. Les appeaux classiques sont souvent de petite taille et produisent donc un son relativement aigu. A partir d'expériences effectués avec un instrument du commerce, S. Ravasse réalise, sur une base de boîtes métalliques cylindriques, la même technique mais à plus grande échelle. La pompe à air est remplacée par un compresseur qui insuffle de l'air à débit constant dans le système. La maquette présente plusieurs possibilités d'écartement entre les deux parois et de perçage des diaphragmes. Par ailleurs, il apparaît rapidement intéressant de coupler cette source à un résonateur adéquat.

Le second instrument est né d'une volonté d'obtenir un mécanisme acoustique qui produise le son d'une bille d'acier descendant le long d'un ressort libre en s'enroulant autour de ses spires. Cette référence très précise permet de caractériser une qualité 'électrique' du son semblable, par exemple, à celle que l'on peut entendre au niveau des caténaires juste avant le passage d'un train à grande vitesse ou, plus simplement, lorsque l'on frappe un ressort libre avec un objet en métal.

Partant de cela, S. Ravasse met au point un système mécanique constitué d'un roulement à bille solidaire d'un axe moteur, sur sa bague intérieure, et soudé à un ressort libre, sur sa bague extérieure : le frottement des billes sur les bagues est alors transmis au ressort qui est excité suivant un mode de vibration propice à générer la caractéristique 'électrique' recherchée. De plus, le système admet le couplage avec un élément amplificateur telle qu'une membrane, un gong ou une plaque de métal.

Pour ce dernier élément, il apparaît évident que la complexité de fonctionnement d'un tel dispositif représente un obstacle quasi insurmontable à sa modélisation physique stricto sensu. L'objectif est donc identique à celui fixé précédemment, à savoir dégager un modèle physique ayant les mêmes caractéristiques sonores mais certainement pas la même configuration mécanique.

Ceci étant, la difficulté est accrue ici car le son de référence possède une intensité très faible et certaines caractéristiques acoustiques sont difficilement discernables avec un outil d'analyse classique comme *AudioSculpt*.

Malgré tout, des essais de modélisation sont tentés, surtout sur le système couplé. L'une des synthèses accomplies provient de l'excitation par un archet d'une

corde posée sur un chevalet dont les pieds sont fixés sur un amplificateur de type tambour (une membrane tendue à l'extrémité d'un tube acoustique). Cependant, même si dans l'absolu le résultat sonore est intéressant, il ne s'approche pas de manière significative de la référence enregistrée; on conçoit aisément que le frottement de l'archet sur la corde ne produit pas les mêmes effets que le frottement de la bille sur les spires du ressort.

Quant à l'instrument issu du principe de l'appeau, il n'a pas suscité tel quel un effort de modélisation mais a plutôt orienté la tâche vers l'étude d'un résonateur possible. Pour ce faire, la réflexion s'est focalisée autour des principes fondateurs de la machine parlante de Wolfgang von Kempelen.

En effet, nous nous sommes intéressés à un article scientifique du "Journal of Acoustical Society of America" qui rend compte des travaux entrepris au 18^{ème} siècle par W. von Kempelen pour construire une machine capable d'émettre distinctement des voyelles, des consonnes, voire des mots ou des bouts de phrase ["*The speaking machine of Wolfgang von Kempelen*", H. Dudley & T.H. Tarnoczy, J. Acoust. Soc. Am. **22** (2), March 1950].

Succinctement, le principe de fonctionnement est le suivant : un soufflet actionné à la main assure des conditions de pression favorables à la vibration d'une anche; cette anche débouche sur un ensemble de résonateurs commutables qui recréent les différents aspects de la parole (chuintement, roulement, sifflement, etc ...); enfin, le son est émis par l'intermédiaire d'un résonateur souple en cuir que l'utilisateur module suivant la syllabe qu'il veut obtenir.

Dans le cadre de notre étude, l'intérêt se situe davantage au niveau des prédécesseurs de W. von Kempelen et notamment de Kratzenstein qui est mentionné dans ce même article pour avoir élaboré une géométrie de résonateur adaptée à chacune des voyelles. L'étude faite de ces résonateurs, par le logiciel *Resonans*, montre que certains d'entre eux réagissent comme des systèmes multi-modes et présentent, de surcroît, une nette inharmonicité qui peut être intéressante dans l'optique présentée plus haut à propos des sons multiphoniques.

Finalement, l'élément représentant la voyelle U, selon Kratzenstein, est adopté comme résonateur expérimental pour le dispositif de soufflerie de S. Ravasse. De plus, afin de comparer les résultats de modélisation issus de *Resonans* (voir [Annexe V](#)) et les données expérimentales, une maquette du résonateur est construite à l'I.R.C.A.M. : excitée, dans un premier temps, par un générateur de bruit blanc, elle est mesurée en terme de pression rayonnée et de fonction de transfert pression rayonnée / pression d'entrée (voir [Annexe VI](#)). Les mesures font apparaître une bonne corrélation entre théorie et expérience ce qui permet de s'appuyer solidement sur cet outil de modélisation pour la modification ou l'élaboration future d'un résonateur de ce genre.

e/ Exploitation de la 3^{ème} prise de son

Ce résonateur 'U expérimental' couplé au système d'appeau de S. Ravasse fait principalement l'objet de la dernière séance d'enregistrement. Plusieurs configurations de soufflerie constituent les sons de référence d'un nouveau travail de modélisation informatique.

L'approche du problème passe, encore ici, par la construction d'un objet pour *Modalys*. En effet, les résonateurs de type tube acoustique qui y sont implantés ne

permettent pas, à priori, de simuler des géométries complexes comportant des sections différentes et variables.

Pour palier cette contrainte, on part d'un tube acoustique droit existant que l'on choisit de même longueur que le résonateur complexe; puis, grâce à la fonction *set-mode-freq!*, on déplace les fréquences de résonance de cet élément pour les faire coïncider avec celles du résonateur expérimental, calculées grâce à *Resonans*. La sauvegarde externe de ce nouvel objet par la fonction *save-object* permet, en outre, d'avoir accès aux amplitudes modales des points de la structure que l'on peut pondérer en fonction des informations tirées de l'analyse des sons de référence (émergence de certaines résonances, allure de l'enveloppe spectrale, etc. ...).

Une fois ces opérations effectuées, on dispose d'un modèle dont le comportement acoustique est similaire à celui du résonateur conçu pour l'expérimentation. Ce modèle est alors, dans un premier temps, couplé à un générateur de bruit blanc, ce qui permet d'ajuster les pondérations effectuées sur les amplitudes modales. Puis, grâce à la fonction *make-controller sound-file*, il est possible d'exciter le modèle directement avec l'un des excitateur de S. Ravasse, par l'intermédiaire du fichier son correspondant enregistrés au cours de la seconde séance de prise de son.

Cette dernière configuration donne des résultats assez satisfaisants du point de vue de la synthèse sonore ce qui tend à valider le procédé quelque peu hétérodoxe qui a permis de modéliser le résonateur 'U' expérimental. Ceci étant, comme pour la synthèse du son 'soufflé' consécutive à la première prise de son, le modèle physique final s'avère être relativement 'virtuel' dans la mesure où la modification des données modales est importante et intervient aussi sur les amplitudes vibratoires de chaque point de la structure. Or, dans ce cas précis, la démarche inverse qui consiste à utiliser la modèle physique informatique pour concevoir le système réel équivalent, est rendue difficile par le fait que la signification de la valeur des amplitudes modales est abstraite du point de vue de la construction de l'objet.

Conclusion

La tâche de l'équipe Acoustique Instrumentale de l'I.R.C.A.M. dans le cadre du prototype de "design sonore" de la voiture électrique TULIP s'est effectuée en liaison étroite avec les évolutions et les développements du travail de création accompli par l'équipe en charge du projet, et plus particulièrement Louis Dandrel et Sylvain Ravasse. De fait, l'utilisation de *Modalys* - initialement prévue - s'est enrichie de travaux annexes (études théoriques, conception d'un résonateur acoustique) ayant néanmoins tous pour finalité la synthèse par modèles physiques.

D'un point de vue plus général, l'utilisation de la synthèse modale pour ce genre d'études se révèle fructueuse.

D'une part, les éléments implantés dans *Modalys* (résonateurs, excitateurs) permettent, en l'état, de répondre à des besoins de modélisation, relayés, si nécessaire, par la capacité que présente *Modalys* de lire des fichiers de données externes qui constituent autant d'objets supplémentaires utilisables pour la synthèse.

Certes, il est vrai, par ailleurs, que les procédés employés pour générer certains de ces objets extérieurs leur confèrent une caractéristique 'virtuelle' et empêche *Modalys* de fonctionner comme une réelle aide à la conception (la déduction

des paramètres de construction devient alors très difficile). Mais, dans ce cas, ce logiciel informatique devient un outil de réflexion à part entière et permet le développement, à partir de références sonores réelles, de modèles qui s'approchent correctement de la réalité et qui, par extension, produisent des échantillons sonores exploitables dans le cadre d'une activité de "design sonore" comme celle concernant la voiture électrique TULIP.

ANNEXE I

ANNEXE II

ANNEXE III

ANNEXE IV

ANNEXE V

ANNEXE VI