

Modélisation physique de la vibration d'une anche d'accordéon

Nicolas Misdariis, Denis Ricot, René Caussé
IRCAM – 1, place Igor Stravinsky – 75004 Paris, France

Résumé

Un modèle physique non-linéaire d'auto-oscillation de l'anche d'accordéon est proposé pour des applications en synthèse sonore. Ce modèle est dérivé de l'étude expérimentale *in vitro* de la lame et de la caractérisation de la géométrie de l'écoulement par visualisation dans l'eau. Deux régimes d'auto-oscillation sont observés se caractérisant par deux lois d'évolution différentes de la fréquence en fonction de la pression d'alimentation. Il est mis en évidence que la force d'excitation de la lame est créée par les effets d'inertie du fluide présent en amont de la lame et non par les instabilités turbulentes du jet. Le modèle permet de reproduire les comportements caractéristiques des lames observés lors de l'étude expérimentale et de synthétiser des sons de lames d'accordéon d'un grand réalisme.

Introduction

L'instrument est né vers 1829 en Allemagne (inventeur : C. Demian). A la même époque, en Angleterre, le scientifique C. Wheatstone crée le *concertina* alors que le bandonéon apparaît un peu plus tard, vers 1850, en Allemagne (inventeur : H. Band).

Les anches utilisées dans l'accordéon sont des lames métalliques rivées sur une plaquette (*platine*) en aluminium percée d'une ouverture (*rigole*) dans laquelle la lame peut vibrer librement. C'est un écoulement d'air à travers l'anche, lié à la différence de pression de part et d'autre de la plaquette, qui est responsable de l'auto-oscillation. A chaque plaquette est associé un couple de lames identiques, montées en inverse, et qui permettent ainsi de jouer en *poussé* ou en *tiré* selon la direction du soufflet, une petite lamelle de cuir empêchant la lame non sélectionnée de vibrer.

Les anches sont de type +E et -I selon la classification de H. Bouasse et à la suite de l'analyse de H. von Helmholtz [1] ; c'est à dire que la lame tend à fermer l'ouverture lorsque l'on souffle (+) de l'extérieur (E) ou que l'on aspire (-) de l'intérieur (I) de l'anche. Ces anches sont de plus libres (elles peuvent pénétrer à l'intérieur de la rigole et sont donc non battantes), et fortes (c'est à dire que la fréquence propre de la lame fixe la fréquence d'oscillation).

L'objectif de l'étude est de mettre au point un modèle physique de vibration de la lame pour des applications en synthèse sonore [2].

Le son de l'accordéon : caractéristiques majeures

Ces caractéristiques sont déduites d'analyses, à la fois des sons de lames *in vivo* (montées sur un instrument) et *in vitro* (montées sur un réservoir et mises en vibration par une soufflerie artificielle). Les caractéristiques

principales observables sur tout le registre et pour des conditions normales de jeu se traduisent par une forme d'onde de pression acoustique très "accidentée" (figure 1a). Cette forme sur laquelle se détachent des zones de dépression (1) et de surpression localisées (2, 3 et 4), se retrouve pour le jeu *poussé* et *tiré*, à l'inversion près.

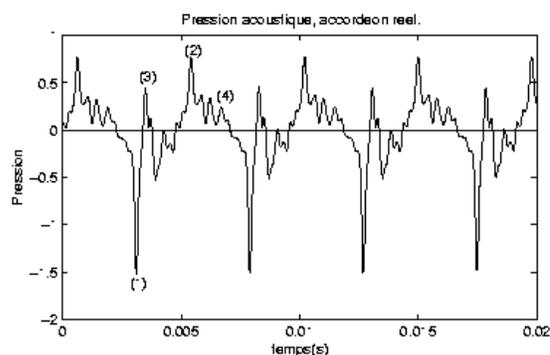
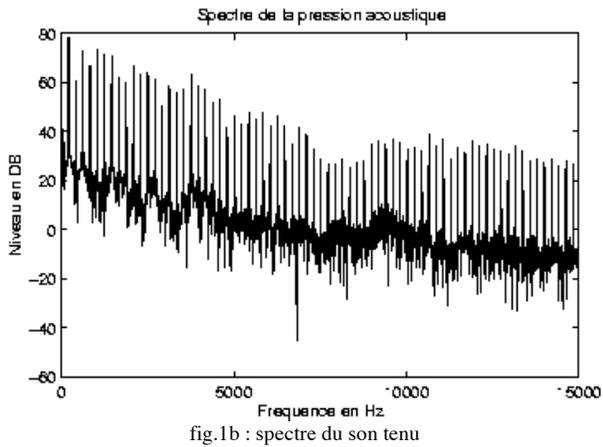


fig.1a : évolution de la pression acoustique

Le spectre correspondant (figure 1b) est large et riche en harmoniques. Pour les premiers partiels, les harmoniques de rang pair ont une amplitude beaucoup plus faible que les harmoniques impairs. Il apparaît de plus que les résonateurs (*réservoir* ou petites *cavités* propres à chaque lame), en amont ou en aval de l'anche, ont une influence négligeable sur le spectre.



La visualisation stroboscopique de la vibration de l'anche permet d'établir une correspondance entre ces caractéristiques et l'ouverture ou la fermeture de la plaquette par la lame. Celle-ci vibre sur son premier mode (lame encastree-libre) à une fréquence légèrement inférieure à sa fréquence propre [3].

Caractérisation physique de l'instrument

L'objectif de l'approche expérimentale de l'étude se résume en plusieurs points : arriver à une compréhension plus "fine" du fonctionnement du système, évaluer l'importance des différentes grandeurs physiques dans le fonctionnement, déceler "intuitivement" des relations entre les paramètres physiques importants et en dernier lieu valider le modèle. Pour cela, nous procédons à des mesures du déplacement relatif de la lame, de la pression hydrodynamique mesurée à quelques millimètres en aval de la lame (représentative de l'écoulement et du mouvement réciproque local du fluide) et de la pression acoustique en champ proche. Un enregistrement simultané de ces trois variables est reporté à la figure 2.

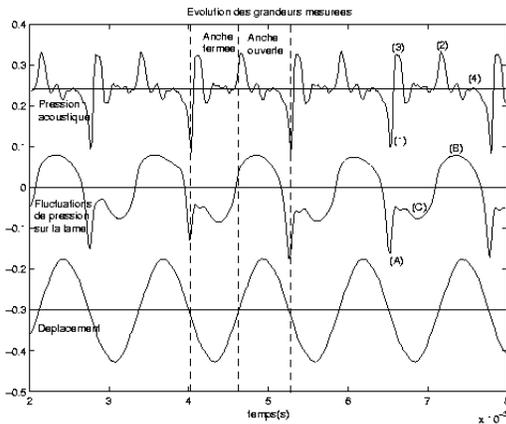


fig.2 : évolution des signaux de pression et de déplacement (mesure)

On constate :

- que le déplacement est sinusoïdal sur toute la plage de variation de la pression d'alimentation P_0 utilisée (10 à 6000 Pa). Précisons que la plage normale de jeu est située entre 10 et 300 Pa pour une lame du registre médium. Devant la non-linéarité liée à la faible dynamique de notre capteur de déplacement, une vérification assez fine du caractère sinusoïdal de la vibration a été effectuée avec un vibromètre laser. Un échantillonnage spatial de la lame avec le vibromètre conduit à la mesure de la déformée.

- qu'il existe deux régimes de fonctionnement aux formes d'onde différentes et dont le comportement en fréquence, en fonction de P_0 , est inversé. Pour le premier la fréquence décroît linéairement en dessous de la fréquence propre de la lame. Alors que pour le deuxième cette fréquence augmente rapidement, pouvant même passer au-dessus de la fréquence propre (voir figure 3). Ces deux régimes correspondent à deux positions d'équilibre de la lame par rapport à la plaquette, respectivement à l'extérieur et à l'intérieur. Le deuxième régime est observable pour certaines lames dans les conditions normales de jeu. On remarque également que le changement de régime est soumis à des effets d'hystérésis.

- que le tracé de la pression acoustique en fonction de la plage utile de P_0 , non reporté ici, nous renseigne directement sur la dynamique de jeu qui est de l'ordre d'une quarantaine de décibels.

Pour connaître la force exercée par la pression hydrodynamique (pression excitatrice) sur la lame, il reste à décrire le plus précisément possible l'écoulement. Pour cela, des visualisations ont été réalisées, dans l'eau après une tentative infructueuse dans l'air. La réalisation de traceurs, à l'aide de panaches de colorant, est plus facile à réaliser dans l'eau que dans l'air. Ces visualisations nous renseignent sur le caractère laminaire ou turbulent des jets qui se forment en aval de la lame.

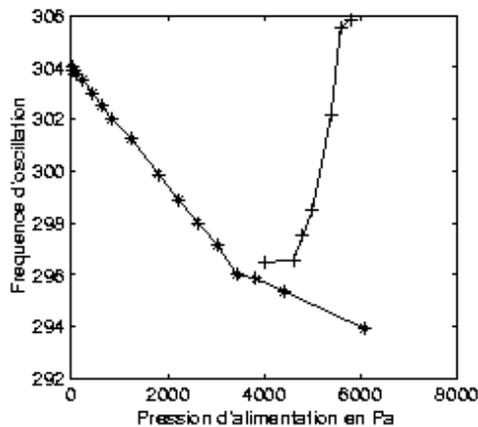


fig.3 : fréquence d'oscillation en fonction de P_0
 (*) : régime 1 ; (+) régime 2

Caractérisation de l'écoulement

Nous observons avec étonnement que les lames, prévues pour un fonctionnement dans l'air, oscillent également sur leur premier mode lorsqu'elles sont soumises à un écoulement d'eau.

Les vitesses d'écoulement sont d'environ 15 m/s dans l'air et de 2 m/s dans l'eau, ce qui donne des nombres de Reynolds du même ordre de grandeur et qui valide donc l'analogie entre l'eau et l'air pour l'étude de l'écoulement.

Les visualisations permettent de caractériser les écoulements :

- en amont, il est laminaire et de type "puits". Près de la lame, l'écoulement est bidimensionnel : le fluide envoyé dans un plan perpendiculaire à la grande dimension de la lame sera "aspiré" par la fente se trouvant dans le même plan.
- l'écoulement aval est de type "jet", unidirectionnel. Son étude pourra être faite dans une hypothèse de bidimensionnalité. Cet écoulement reste "collé" à la paroi de la rigole ; ce n'est donc pas tout à fait un jet libre mais plutôt un écoulement laminaire sur un plan.

L'eau est un fluide lourd. La fréquence d'oscillation des anches dans l'eau est bien plus basse que dans l'air, respectivement 142Hz et 330Hz pour l'une des lames. Cependant, malgré les différences de milieu le comportement de la fréquence en fonction de P_0 reste semblable.

Les visualisations permettent de conclure, comme l'avait montré l'étude de St Hilaire [4], que les instabilités turbulentes qui peuvent se développer dans le jet ne sont pas à l'origine de l'auto-oscillation de la lame. D'autres arguments nous conduisent à la même conclusion. Parmi eux, le fait que ces instabilités ne soient pas très efficaces ou que la fréquence d'oscillation soit stable pour une plage de variation très importante de la vitesse de l'écoulement (pour les dimensions et la

géométrie de l'ensemble lame/platine, le nombre de Strouhal correspondant à une telle configuration est de l'ordre de 0,15).

La force d'excitation est créée par les effets d'inertie du fluide présent en amont de la lame comme l'avait entrevu H. Bouasse [1]. Les forces de pression s'appliquent seulement sur la face amont de la lame bordée par les deux jets. La face aval est une zone de fluide "mort". Les paramètres importants du système sont P_0 , la pression d'alimentation, et K_0 , la quantité de fluide disponible dans le réservoir et qui rentre en jeu dans les phénomènes d'inertie.

Modèle physique de la vibration de l'anche

A la différence de la clarinette [5], l'auto-oscillation est le résultat du caractère instationnaire de l'écoulement. Ici le jet est "libre" et n'a pratiquement aucun contact avec la face aval de la lame.

Le modèle est basé sur une représentation simple de la lame de type masse/ressort/amortissement et sur le calcul d'un écoulement potentiel bidimensionnel instationnaire. Le fluide (air) est supposé parfait (non visqueux) et les caractéristiques de l'écoulement seront : potentiel, irrotationnel, incompressible, bidimensionnel et instationnaire. L'écoulement amont est de type "puits" et l'écoulement aval de type "jet".

On calculera la pression qu'exerce l'écoulement sur une section de la lame en fonction de sa position. C'est cette dernière qui fixe la surface d'ouverture de l'anche.

Le modèle ne permet pas de résolution analytique et les équations différentielles sont fortement non-linéaires. Une résolution numérique du problème est donc mise en œuvre. La complexité du modèle vient en partie du fait que la géométrie de l'écoulement varie au cours du temps : le "puits" a une longueur variable. Afin de simplifier on négligera ce point et on supposera que le "puits" est ponctuel et que les variations d'intensité de l'écoulement prédominent dans l'établissement des forces.

Sur la figure suivante (fig. 4) sont reportés plusieurs résultats de la simulation obtenus à partir du modèle simplifié. Ainsi le déplacement, la pression hydrodynamique et de la pression acoustique pour un couple (P_0 , K_0) donné peuvent être comparés avec les mesures respectives de la figure 2.

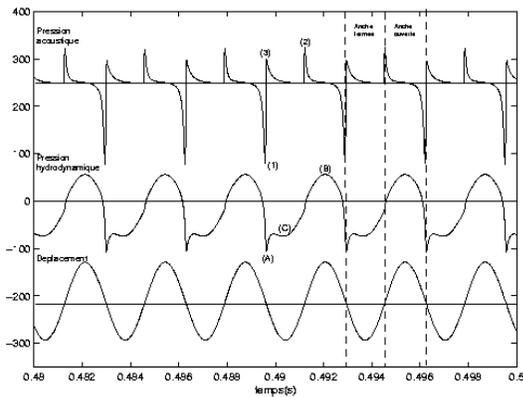


fig.4 : évolution des signaux de pression et de déplacement (simulation)

La valeur de la pression acoustique est obtenue par la combinaison linéaire d'une source monopolaire et d'une source dipolaire et du calcul du débit donné par le modèle d'écoulement précédent.

Malgré la solution simplifiée choisie pour la simulation, les résultats obtenus sont très encourageants tant au niveau du réalisme des sons synthétisés qu'au niveau de la similitude du comportement physique comme les courbes de la figure 4 le soulignent.

Conclusion-Perspectives

Nous avons étudié la lame d'accordéon à la fois du point de vue mécanique, aéroacoustique et acoustique. Suite à cette étude, nous proposons un modèle physique d'oscillation de la lame d'accordéon, non-linéaire et très complexe. Un modèle simplifié est dérivé de ce dernier qui donne des résultats très prometteurs, même si sa validation est incomplète. Cependant des améliorations seraient à apporter en particulier sur le modèle de génération de la pression acoustique.

Des questions fondamentales restent toujours ouvertes comme par exemple l'influence de la taille du réservoir sur les effets d'inertie et donc sur la vibration.

Pour la synthèse sonore, des mesures *in vivo* de l'évolution temporelle de P_0 au cours du jeu, du comportement des lames en fonction du registre ou de l'influence des petites cavités conduiraient certainement à des sons encore plus proches de la réalité.

Remerciements

Nous tenons à remercier C. Valette et C. Cuesta (LAM/ParisVI) de nous avoir fait bénéficier au départ de l'étude de leur expérience sur les anches libres, M. Hirschberg (Université de Eindhoven) pour ses nombreux conseils, A. Chaigne (Télécom-Paris) pour le prêt du vibromètre laser, enfin A. Maurel et A. Petitjeans (ESCPI)

pour leur aide très précieuse dans la visualisation dans l'eau.

Bibliographie

- [1] D. Ricot, Modélisation physique de la vibration d'une anche d'accordéon, Mémoire de fin d'études, Ecole Centrale de Lyon, 1999.
- [2] H. Bouasse, Instruments à vent (T.1) et Tourbillons (T.2), Ed. Delagrave, Paris, 1929 et 1932.
- [3] P.D. Koopman and J.P. Cottingham, Acoustical Properties of Free Reeds, ROS Bulletin, Vol.XV, N°3-4, 1996.
- [4] A.O. St Hilaire, T.A. Wilson and G.S. Beavers, Aerodynamic Excitation of the Harmonium Reed, J. Fluid Mech, 49, 803-816, 1971.
- [5] A. Hirschberg, J. Gilbert, A.P.J. Wijnands and A.M.C. Valkering, Musical Aero-Acoustics of the Clarinet, Journal de Physique IV, Colloque C5, supplément au Journal de Physique III, Vol.4, 1994.