

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



L'effet acoustique des cordes mortes du clavicorde

J.-T. Jiolat^a, C. d'Alessandro^a et J.-L. Le Carrou^b

^aSorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut Jean Le Rond d'Alembert,
F-75005 Paris, France

^bSorbonne Université, CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Equipe LAM, F-75005 Paris, France
jean-theo.jiolat@heywood.dalembert.upmc.fr

Le clavicorde est un instrument à clavier particulièrement expressif, mais de faible niveau sonore. Lorsqu'une des touches du clavier est enfoncée, un élément de métal (appelé tangente) percute une paire de cordes et reste en contact avec elle, la tangente jouant le rôle à la fois d'excitateur et de sillet. La portion des cordes mortes, entre le chevalet et les chevilles d'accord est laissée libre dans le clavicorde. Ces cordes mortes sont assez longues, et elle entre en vibration par sympathie, à cause du mouvement du chevalet, venant ajouter de la réverbération et un renforcement du son. Le but de ce travail est d'étudier et de quantifier l'effet des cordes mortes. Les mesures sont conduites sous 2 conditions : avec cordes mortes libres et avec cordes mortes étouffées. Les résultats montrent la manifestation de deux phénomènes distincts : l'un est l'effet de réverbération, que l'on peut modéliser par un système vibratoire linéaire ; l'autre est l'effet de sympathie, caractérisé par le couplage entre les partiels des cordes jouées et mortes.

1 Introduction

1.1 Présentation du clavicorde

Le clavicorde est un instrument à clavier particulièrement expressif, mais dont le niveau sonore est assez faible (d'où son surnom "d'épinette sourde" au XVIII^{ème} siècle chez Marin Mersenne) [1]. La mécanique est simple : les touches à balancier sont équipées de lames de laiton, les tangentes, qui font office de sillet et excitent les cordes à leurs extrémités. Lorsque l'on relâche la touche, une bande de tissu située à droite de la tangente étouffe la vibration de la corde. Le niveau de pression sonore du clavicorde est faible, proportionnel au logarithme de la vitesse d'impact de la tangente, directement liée à celle du doigt (contrairement au piano qui multiplie la vitesse grâce à la mécanique) [6]. Le niveau mesuré 30 cm au dessus du centre de la table d'harmonie est au maximum de 60 dB SPL, pour l'instrument que nous étudions ici, ce qui est typique des valeurs mesurées pour d'autres clavicordes. On trouvera des mesures de niveau sonore et de durée pour toutes les notes de 4 clavicordes jouées avec diverses nuances dans [5]. Une façon d'augmenter la durée ou le niveau du son dans le clavicorde est d'utiliser les parties mortes des cordes, entre le chevalet et les chevilles d'accord (voir Figure 1) comme des cordes sympathiques, c'est à dire des cordes qui ne sont pas directement mises en vibration par l'excitation, mais qui sont entraînées par la vibration des cordes jouées [8].

1.2 Fonctionnement acoustique

Le clavicorde est muni d'un unique chevalet. Toutes les cordes sont toutes couplées par ce chevalet, qui les divise en deux segments : la partie "corde jouée", excitée par la tangente, entre la tangente (sillet) et le chevalet, et la partie "corde morte", entre le chevalet et les chevilles (voir figure 1). Lorsque les cordes jouées sont excitées, il y a un transfert d'énergie vibratoire vers les cordes mortes par le biais du couplage avec le chevalet. Ceci provoque la vibration des cordes mortes, de la table d'harmonie, et de la masse d'air sous la table d'harmonie (qui, jointe à la cavité forme un résonateur de Helmholtz). L'énergie vibratoire est transférée à la table d'harmonie qui rayonne le son dans la salle où se trouve l'instrument. (voir figure 2).

Les cordes mortes sont laissées libres dans le clavicorde, contrairement par exemple au piano (le piano carré est très proche du clavicorde du point de vue de la facture, et les cordes mortes y sont étouffées [4]). Des mesures acoustiques ont montré que ces cordes mortes apportent un halo sonore à l'instrument, un effet que l'on peut comparer à la réverbération d'une salle : ce premier

effet de vibration sympathique, que nous nommons ici "réverbération" ne privilégie pas de fréquence précise, mais une zone fréquentielle large (dans le gamme de 450 Hz à 1000 Hz environ pour l'instrument étudié dans [7]). Par ailleurs, lorsque les rapports de fréquence sont favorables, une ou plusieurs cordes mortes peuvent être susceptibles de renforcer la vibration d'une corde jouée, par couplage mécanique à travers le chevalet : nous réservons désormais le mot de "sympathie" pour ce couplage mécanique, effet qui a été observé et modélisé dans d'autres instruments.

Dans le cas de la harpe de concert, il a été montré que les harmoniques des cordes dont la fondamentale est en dessous de celle de la corde excitée viennent contribuer à la vibration par sympathie [9]. Dans certains modèles de pianos, au premier rang desquels les pianos à queue Steinway & Sons, se trouvent des cordes mortes dénommées cordes "duplex", localisées à l'avant et à l'arrière des parties jouées, pour l'ensemble de son ambitus. Ces cordes contribuent au timbre du son rayonné [10].

1.3 Positionnement du problème

Le présent travail est une première approche pour mettre en évidence et caractériser ces deux effets dans le cas du clavicorde, en mesurant les phénomènes vibratoires dues à la mise en vibration indirecte des cordes mortes. L'instrument étudié est une copie inspirée d'un clavicorde historique (Christian Gottlob Hubert, Ansbach, 1784, conservé dans la Russel Collection, Edimbourg) construit par un des auteurs en 2008 dans l'atelier Marc Ducornet. L'instrument présente 51 touches de Do1 à Ré5, les notes sont liées par 2 à partir de Mi2, et il possède donc 37 chœurs de 2 cordes, soit 74 cordes pour les 51 notes. Il est accordé à La3=415 Hz. Jouer une note met donc en vibration deux cordes jouées et 74 cordes mortes. L'approche expérimentale porte sur deux volets. Dans un premier temps, l'effet de réverbération est étudié, en négligeant le couplage au chevalet. En faisant l'hypothèse que les cordes mortes fonctionnent comme un système passif, ou système linéaire invariant dans le temps, c'est à dire qu'il n'y a pas de transfert d'énergie des cordes mortes vers les cordes jouées (donc pas de sympathie, mais seulement réverbération), une première expérience caractérise la réponse impulsionnelle de la table d'harmonie dans différentes configurations. Dans un second temps, les effets de couplage entre cordes jouées et cordes mortes sont étudiés en situation de jeu. Pour cela la réponse des cordes jouées avec les cordes mortes libres est comparée avec la réponse des cordes jouées avec les cordes mortes étouffées convoluée par la réponse impulsionnelle des cordes mortes libres. Dans l'hypothèse d'un couplage par sympathie, la première réponse devrait durer davantage que la seconde.

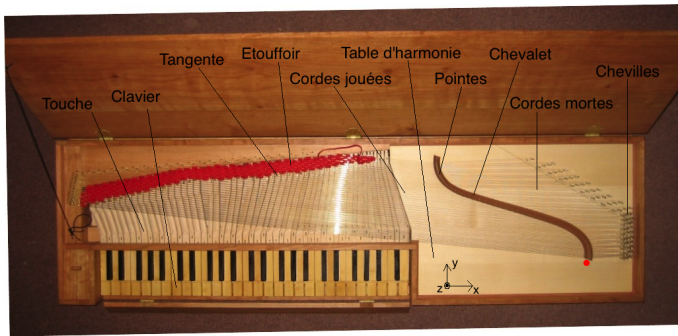


FIGURE 1 – Vue du dessus du clavicorde Hubert avec des légendes, le point rouge correspondant à la position où se trouve l'accéléromètre.

2 Réponse impulsionnelle

Des mesures acoustiques de réponses impulsionnelles ont été décrites dans [7]. Il s'agissait du son rayonné, en réponse à des impulsions par un marteau sur la table, en combinant toutes les conditions de cordes mortes étouffées, cordes jouées étouffées, cavité étouffée. Les résultats (sous l'hypothèse d'une réponse linéaire, sans couplages mécaniques au chevalet) montrent un effet de réverbération dans le son. De plus l'ensemble des cordes jouées contribue en basse fréquence, ce qui est connu des facteurs de clavicorde comme "effet tambour". Les cordes jouées sont en effet toutes couplées par la bande d'étouffoir, et un choc sur la structure les met en vibration, avec un son grave de "tambour". La cavité joue un rôle, avec une résonance de Helmholtz vers 50-200 Hz environ.

2.1 Protocole expérimental

Nous souhaitons mesurer la réponse impulsionnelle de la table d'harmonie en un point de la structure. Pour mettre en place cette mesure vibratoire, nous plaçons un accéléromètre (PCB M352C65) en bas du chevalet là où auront lieu les impacts effectués par le marteau d'impact (PCB 086C01) (voir figure 1). Le marteau d'impact envoie un signal E en entrée et on mesure le signal d'accélération a en sortie 3. Les mesures de réponse en fréquence seront donc co-localisées. Nous sommes à même d'étouffer les cordes mortes grâce à la disposition de feutres faisant office d'étouffoir. Par conséquent, nous pouvons mesurer la réponse impulsionnelle de notre système lorsque les cordes mortes sont libres et lorsque ces cordes sont étouffées. Nous ne nous intéresserons ici qu'à l'étouffement des cordes mortes, et pas à l'effet tambour.

2.2 Méthode d'analyse

Considérons le système vibratoire "cordes, chevalet, table". Nous faisons l'hypothèse que les sous-structures de notre système vibratoire sont découplées. Cela implique que nous pouvons décomposer notre système vibratoire en différents sous-systèmes, comme on peut le voir sur la figure 3.

Notre système d'étude est alors linéaire. On peut donc caractériser une réponse impulsionnelle pour chaque sous-structure de la figure 3. L'ensemble de ces différentes réponses impulsionnelles caractérise la réponse

impulsionnelle du système vibratoire globale. De plus, on considère que notre système vibratoire ne se déplace selon une seule direction, ici l'axe z (voir figure 1). Ce qui implique que notre système ne possède qu'un seul degré de liberté. Sous couvert de ces hypothèses, nous pouvons calculer nos fonctions de réponse en fréquence par simple division fréquentielle, et ainsi obtenir la réponse impulsionnelle correspondante par transformée de Fourier.

2.3 Analyse de la Réponse impulsionnelle des cordes mortes

Ayant mesuré les réponses impulsionnelles de notre système vibratoire selon que les cordes mortes soient libres ou étouffées, on effectue une déconvolution de nos signaux dans le domaine de Fourier. Ainsi, nous enlevons la contribution de tous les éléments vibrants dans le signal vibratoire si ce n'est celle des cordes mortes. Nous montrons ce que nous obtenons comme signal résultant sur la figure 4. On remarque que la bande de fréquence d'influence des cordes mortes va de 350 Hz à 4500 Hz. On montre sur la figure 5 la répartition des fréquences des cordes mortes et des cordes jouées selon le nom de la note de chaque corde. On remarque que les fréquences des cordes mortes vont de 350 Hz à 1200 Hz environ. La borne inférieure de 350 Hz pour la zone fréquentielle des cordes mortes est cohérente avec celle trouvée par le biais de la figure 4. Le reste de l'énergie spectrale au-dessus de 1200 Hz est dû aux harmoniques de toutes les cordes mortes. L'énergie spectrale au dessous de 350 Hz provient probablement de la vibration des cordes graves jouées, qui elles n'ont pas été totalement soustraites (cet effet, le "tambour" a été décrit dans [7], il est d'une amplitude notable dans le grave du spectre).

3 Étude en situation de jeu

3.1 Protocole expérimental

Nous voulons aussi analyser le comportement de la partie morte des cordes de notre clavicorde d'étude lors de la production de sons musicaux. Nous gardons la même disposition expérimentale que précédemment. Ici nous utilisons un doigt robotique (voir Figure 6) pour enfoncer les touches correspondant aux cordes Si2 et Sol4. Ce doigt peut effectuer une trajectoire programmée et la répéter de façon identique [3]. Cette trajectoire est programmée par la position et la vitesse du doigt robotisé selon le plan (y,z) (voir figure 1). Les mesures obtenues sont les réponses vibratoires de la table d'harmonie dues aux excitations de ces deux cordes en répétant la même trajectoire d'enfoncement de la touche. Une excitation particulière est considérée, celle où le doigt relâche directement la touche après l'avoir enfoncé. La trajectoire en question est effectuée de telle façon à ce que la touche soit enfoncée de 7 mm environ et que la vitesse d'enfoncement soit de l'ordre de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$. Cette valeur de vitesse d'enfoncement est équivalente à celle qui est utilisée dans [6], où c'est le doigt du musicien qui enfonce la touche. On considère alors que la trajectoire du doigt robotisé utilisée ici est équivalente à celle d'un musicien.

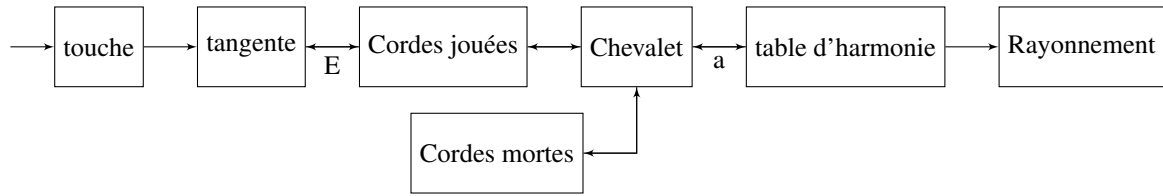


FIGURE 2 – Schéma bloc du fonctionnement acoustique du clavicorde, E représentant l'entrée du système vibratoire et a correspondant au signal vibratoire mesuré par l'accéléromètre.

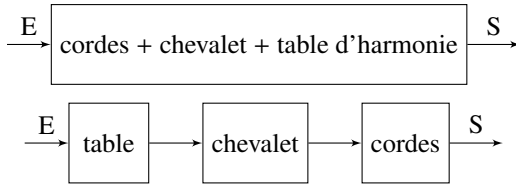


FIGURE 3 – Schéma bloc du système vibratoire linéaire, où E est le signal d'entrée et S est le signal de sortie.

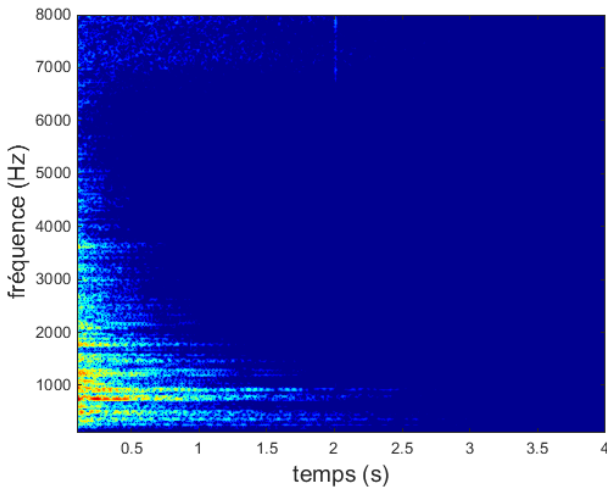


FIGURE 4 – Réponse impulsionnelle des cordes mortes du clavicordes.

3.2 Analyse temporelle

Nous effectuons une comparaison entre les formes d'onde des signaux mesurés dans des conditions différentes. Sur la figure 7 (haut), on montre les signaux vibratoires mesurés lors de l'excitation de la corde de Si2 lorsque les cordes mortes sont libres (bleu) et lorsqu'elles sont étouffées (rouge). Qualitativement, on peut remarquer que le signal correspondant à la condition "libre" dure plus longtemps que le deuxième signal. Cela met en exergue le fait que la contribution vibratoire des cordes mortes permet l'allongement du signal vibratoire. Aussi, nous effectuons sur la figure 7 (bas) la même comparaison lorsque l'on excite la corde de Sol4. On peut en tirer la même conclusion. En revanche, quantitativement, le signal correspondant à la situation où les cordes mortes sont libres dure encore plus longtemps que le deuxième signal. Cette différence de longueur en temps est plus accrue que dans le cas de l'excitation de la corde de Si2. Ceci peut s'expliquer par un effet de couplage. La corde de Sol4 est couplée avec certaines cordes mortes par le biais de relation fréquentielle entre leur première harmonique, ce qui n'est pas le cas pour la corde de Si2 (voir figure 5). Ceci a pour conséquence que

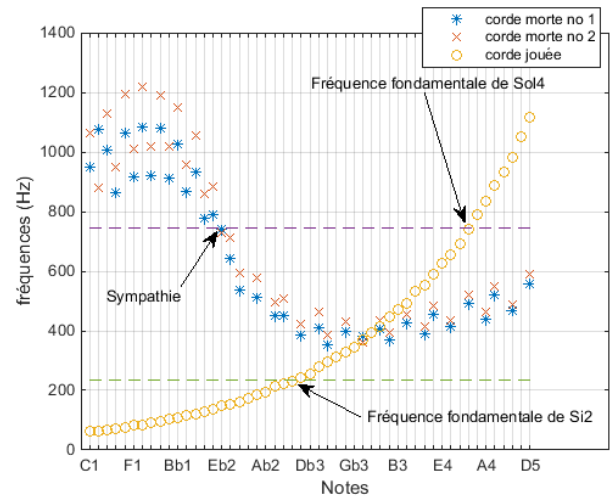


FIGURE 5 – Fréquences fondamentales des cordes mortes et des cordes jouées. Les fondamentales des cordes mortes se situent entre 350Hz et 1200 Hz environ. Deux zones fréquentielles apparaissent : un zone où les cordes jouées sont en dessous des cordes mortes, et une zone où elles sont dans la même gamme de fréquences fondamentales.

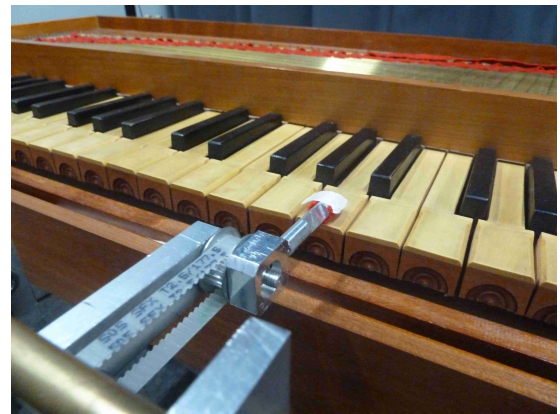


FIGURE 6 – Doigt robotisé pour le jeu automatique et reproductible du clavier.

le signal de Sol4 possède des composantes fréquentielles plus élevées en énergie que celles du signal de Si2.

La figure 8 représente les signaux du Si2 et du Sol4 dans les conditions cordes mortes libres (bleu) et cordes mortes étouffées convolués par la réponse impulsionnelle des cordes mortes libres seules (rouge). Pour la note Si2 les deux signaux se superposent bien. Cela indique que les cordes mortes jouent un rôle de système linéaire, puisque la convolution par leur réponse impulsionnelle du signal étouffé est proche du signal libre. Au contraire, pour la note Sol4, les deux signaux se superposent mal.

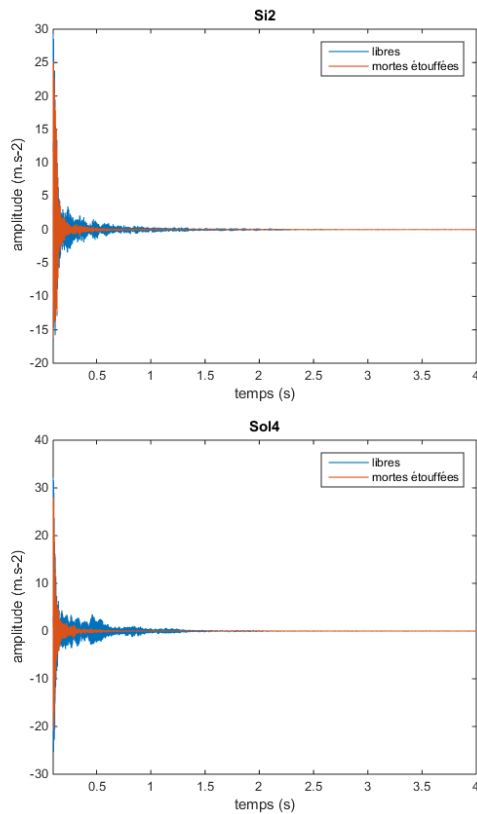


FIGURE 7 – Signal d'accélération sur la table, note jouée Si2 (haut) et Sol4 (bas), mortes étouffées et cordes mortes libres.

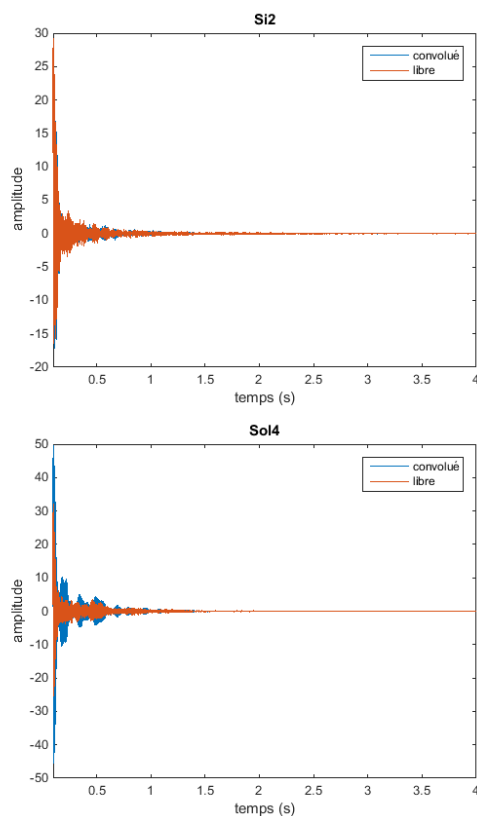


FIGURE 8 – Signal d'accélération sur la table, note jouée Si2 (haut) et Sol4 (bas) avec les cordes mortes mortes étouffées, et cordes mortes mortes étouffées convoluées par la réponse impulsionnelle de la table.

Donc une simple convolution ne suffit pas pour expliquer

l'effet des cordes mortes. Un phénomène non-linéaire, comme un couplage mécanique au chevalet entre les cordes jouées et les cordes mortes, prend certainement place dans l'interaction des cordes jouées et des cordes mortes. Une analyse temps-fréquence permet de visualiser cet effet.

3.3 Analyse spectro-temporelle

Sur la figure 9, on montre la comparaison entre le signal de la réponse du système vibratoire avec les cordes mortes étant libres et avec l'excitation de la corde de Sol4 (spectrogramme A), et le signal de celle où la corde de Si2 est excitée (spectrogramme B). Les harmoniques du premier signal possèdent plus d'énergie spectrale que ceux du deuxième. On remarque que les partiels de fréquences 1480 Hz, 2188 Hz, 2967 Hz, 3656 Hz, et 4468 Hz sont assez prépondérants dans le signal de la note Sol4. En revanche, peu de partiels se distinguent nettement sur le signal correspondant à la note Si2, si ce n'est légèrement les partiels 2553 Hz et 4688 Hz.

Toujours sur la figure 9, on fait une comparaison semblable à la précédente, tout en ayant étouffé les cordes mortes (spectrogramme C et D). Dans les deux cas, on remarque que toutes les hautes fréquences sont fortement atténuées. Les partiels susmentionnés des deux signaux ne sont plus présents. Seuls les partiels en deçà de 350 Hz restent inchangés par rapport à la situation précédente. Par comparaison entre les spectrogrammes A et C, on peut constater de nouveau que l'effet des cordes mortes se trouve principalement dans la bande de fréquence allant de 350 Hz à 4500 Hz.

3.4 Mise en évidence de la sympathie

Pour évaluer les contributions de la réverbération et de la sympathie, nous utilisons les signaux où l'on a convolué la réponse impulsionnelle des cordes mortes avec un signal vibratoire de la réponse de la table d'harmonie où les cordes mortes sont étouffées. Nous le faisons dans le cas où l'on excite la corde de Sol4 et celle de Si2. Les signaux obtenus sont affichés sur les spectrogrammes E et F de la figure 9. Dans le cas du spectrogramme E, on remarque la résurgence des partiels de Sol4 comme on l'avait noté sur le spectrogramme A. Par contre, ces partiels durent bien moins longtemps que dans le cas de notre mesure vibratoire où les cordes mortes sont libres. Dans le cas du spectrogramme F, le signal convolué est assez proche du spectrogramme B, tout en notant l'absence de la légère prééminence des partiels de hauteur 2553 Hz et 4688 Hz dans le signal convolué.

En ayant utilisé un système de filtre linéaire invariant dans le temps, on a montré que la convolution de la réponse impulsionnelle des cordes mortes du système avec le signal de la corde de Si2 donnait une réponse vibratoire cohérente. En revanche, cette modélisation ne semble pas satisfaisante dans le cas de la convolution avec le signal de la corde de Sol4. Or, cette modélisation implique qu'entre le chevalet et les cordes mortes, la transmission d'énergie vibratoire est unidirectionnelle seulement. Il n'y a pas de couplage entre la corde excitée et les cordes mortes, ne permettant pas une transmission vibratoire réciproque.

Par conséquent, dans le cas du signal de la corde de Si2, on a un transfert d'énergie vibratoire majoritairement à perte, où toute l'énergie est transférée à toutes les cordes

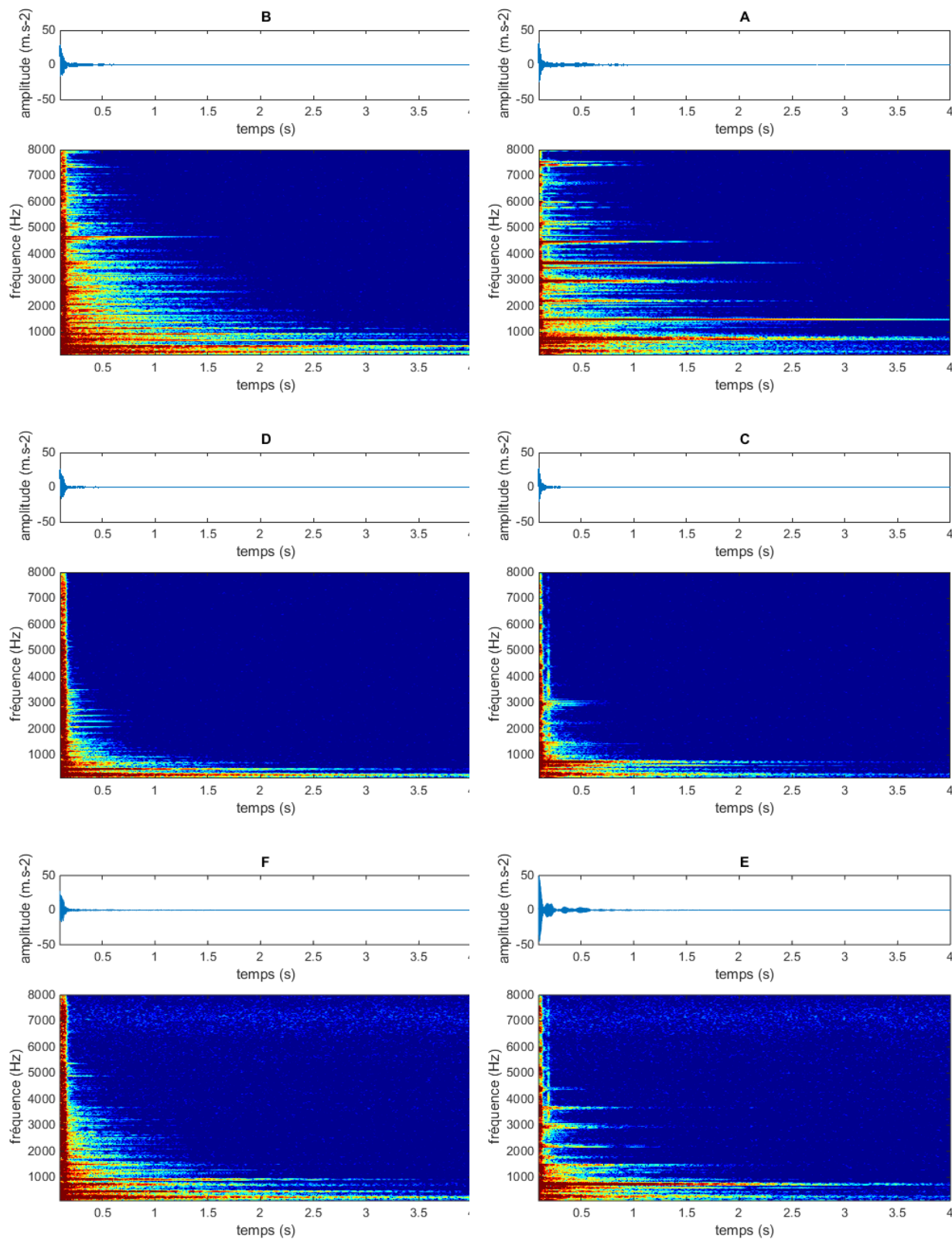


FIGURE 9 – Comparaison entre les spectrogrammes du signal de la réponse vibratoire de la table d’harmonie lorsqu’on excite les notes si2 et Sol4 : avec les cordes mortes libres (spectrogramme A et B) ; avec les cordes mortes étouffées (spectrogramme C et D) ; en ayant convolué avec la réponse impulsionnelle des cordes mortes (spectrogramme E et F).

mortes sans effet de couplage. Cette distribution directe à toutes les cordes mortes est responsable du halo sonore, résultant de l’ensemble des contributions vibratoires de toutes ces cordes. La création de ce halo sonore est ce que l’on appelle l’effet de réverbération. Cet effet se retrouve aussi dans le cas de l’excitation de la corde de Sol4. En revanche, Il y a en plus un effet de couplage entre certaines

cordes mortes et la corde de Sol4, où certains partiels de cette corde échangent de l’énergie avec d’autres partiels de même fréquence des cordes mortes concernées. Ceci permet à ces partiels d’obtenir plus d’énergie. Ce transfert d’énergie réciproque par effet de couplage se réfère à l’effet de sympathie.

4 Conclusion

Dans cette étude, nous avons mené une approche expérimentale afin d'étudier l'effet de sympathie du clavicorde, en particulier en prenant comme instrument d'étude une réplique d'un clavicorde Hubert. Deux expériences distinctes ont été effectuées : une qui consistait à mesurer la réponse impulsionnelle de la table d'harmonie de notre instrument dans deux configurations différentes, c'est-à-dire avec cordes mortes libres et puis avec ces cordes étouffées ; la deuxième consistait à mesurer la réponse de la table d'harmonie en enfonçant les touches Sol4 et Si2 du clavicorde par le biais d'un doigt robotique reproduisant la même trajectoire. La première expérience nous a permis de caractériser la réponse impulsionnelle de notre système vibratoire en utilisant un système de filtre linéaire invariant dans le temps. Lors de la deuxième, nous avons pu étudier les différentes réponses de notre système d'étude selon la fréquence fondamentale de la corde excitée et selon l'étouffement ou non des cordes mortes. Dans le cas de l'excitation de la corde de Si2, le système utilisé permet de donner une réponse semblable au signal mesuré. Par contre, ce système présente ses limites dans le cas de l'excitation de la corde de Sol4. Ceci nous permet de mettre en évidence l'existence d'un effet de couplage potentiel qui renvoie à l'effet de sympathie.

Dans le cas du clavicorde, les cordes mortes permettent d'allonger le signal et d'ajouter un halo sonore grâce à l'effet de réverbération, similaire à celui que l'on trouve en acoustique des salles [7]. Nos mesures confirment ces résultats, et les précisent : par déconvolution, la réponse impulsionnelle du filtre linéaire associé aux cordes mortes a été mesurée. On peut ainsi caractériser et comparer de façon simple cet aspect de la sonorité d'un instrument.

En plus de la réverbération un effet de sympathie a été mis en évidence. L'effet de sympathie se caractérise ici par la mise en vibration indirecte d'une corde par l'accord ou le couplage entre certains partiels de cette dernière et avec ceux de la corde excitée. La harpe de concert notamment présente ce phénomène de sympathie, et des travaux ce sont attachés à caractériser expérimentalement et théoriquement la sympathie sur cet instrument [2, 9]. Au delà de la mise en évidence du phénomène, nos travaux futurs porteront sur l'analyse fréquentielle des modes qui contribuent à la sympathie et sur la modélisation mécanique du couplage au chevalet.

Références

- [1] Bernard Brauchli. *The clavichord*. Cambridge University Press, 1998.
- [2] Jean-Loïc Le Carrou, François Gautier, Nicolas Dauchez, and Joël Gilbert. Modelling of sympathetic string vibrations. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(2) :277–288, 2005.
- [3] Delphine Chadeaux, Jean-Loïc Le Carrou, Marie-Aude Vitrani, Sylvère Billout, and Laurent Quartier. Harp plucking robotic finger. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4886–4891. IEEE, 2012.
- [4] Christophe D'Alessandro. The acoustics of tangent-string interaction in the clavichord, with a comparison to hammer-string interaction in the fortepiano. In *De Clavicordio IX*, pages 83–90, 2011.
- [5] Christophe D'Alessandro, Charles Besnainou, and Luc Ginieis. Tonal portrait of the clavichord. In *De Clavicordio VIII*, pages 201–213, 2008.
- [6] Christophe d'Alessandro. On the dynamics of the clavichord : From tangent motion to sound a. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(4) :2173–2181, 2010.
- [7] Christophe d'Alessandro and Brian FG Katz. Tonal quality of the clavichord : The effect of sympathetic strings. In *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics ISMA '04, Nara, Japan*, pages 21–24, 2004.
- [8] Charles Besnainou et Michèle Castellengo. De la résonance, une étude acoustique du phénomène sympathique. In Christophe Coin, editor, *Amour et sympathie*. Tenu à Limoge les 28 et 29 novembre 1992 (p. 53-61). L'ensemble baroque de Limoge.
- [9] Jean-Loïc Le Carrou, François Gautier, and Roland Badeau. Sympathetic string modes in the concert harp. *Acta Acustica united with Acustica*, 95(4) :744–752, 2009.
- [10] Fredrik Öberg and Anders Askenfelt. Acoustical and perceptual influence of duplex stringing in grand pianos. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1) :856–871, 2012.