

CFA/VISHNO 2016

Le paradoxe du clavicorde

C. D'Alessandro

LIMSI-CNRS, Campus universitaire bât 508 Rue John von Neumann, 91405 Orsay,
France
cda@limsi.fr



LE MANS

La corde du clavicorde est contrôlée directement par le doigt par le moyen d'un clavier à balancier. Le mouvement de la touche est arrêté par le contact entre le tangent et la paire de cordes. La vitesse du tangent au moment de l'impact contrôle la dynamique du son produit. La hauteur du tangent après le contact contrôle le déplacement de la corde, donc sa tension, et finalement la hauteur mélodique du son produit. Le jeu du clavicorde demande donc un contrôle paradoxal (que nous nommons « le paradoxe du clavicorde ») : à l'instant du contact tangent-corde, il faut contrôler la dynamique, jouer vite pour jouer assez fort, mais aussi jouer juste, c'est à dire ne pas déplacer la corde. Il faut produire un mouvement avec une vitesse d'impact importante, sans déplacement de la corde. Dans la pratique, ce type de mouvement est impossible à réaliser exactement, mais le musicien peut développer une technique de jeu adaptée. Après une étude théorique du rapport entre mouvement, volume sonore et intonation, une étude expérimentale a été menée sur 4 instruments, en mesurant la vitesse du tangent, le son rayonné, le contact entre cordes et tangent pour toutes les notes du clavier. De ces mesures sont déduits la vitesse et le déplacement des tangents en relation avec le niveau de pression sonore. On peut ainsi établir la relation entre dynamique et changement de hauteur. En termes d'interaction musicien-instrument, ces mesures permettent d'étudier les limites pratique entre « jouer fort » et « jouer juste ». Les modes de jeu particuliers historiquement développés pour minimiser le paradoxe, tels qu'ils sont décrits dans des sources anciennes sur le jeu des claviers sont reproduits sur un des instruments. Les mesures montrent que le geste paradoxal demandé par la constitution mécanique du clavicorde peut être, dans une certaine mesure, réalisé par un mouvement circulaire de l'extrémité du doigt.

1 Introduction

1.1 Jouer du clavicorde

Le clavicorde est apparu dès le bas moyen-âge en Europe [Brauchli (1998)]. C'est un instrument souvent loué pour ses qualités pédagogiques: son volume sonore est plutôt faible, ce qui permet une utilisation intensive et discrète; mais surtout, le contrôle du mouvement de la touche doit être particulièrement précis. Le mécanisme très simple du clavicorde, la doigt étant en contact avec la corde par l'intermédiaire du levier de la touche et du tangent, implique que la moindre nuance d'enfoncement ou de vitesse change la qualité du son. La corde sonne tant que corde et tangent restent en contact. Un changement d'enfoncement de la touche entraîne un changement de tension de la corde, et donc de hauteur tonale. Cette propriété permet des ornements comme le vibrato ou des nuances d'attaque, mais révèle également tout défaut de contrôle.

Le contrôle du clavicorde diffère donc de celui de l'orgue ou du clavecin. A l'orgue ou au clavecin, la vitesse du doigt influence peu le son, sauf pour changer légèrement l'attaque. Par contre, le mécanisme de pincement de la corde ou d'ouverture de la soupape induit une résistance qui cède sous la pression du doigt. Une fois la résistance passée, la pression du doigt ne change plus rien, on peut même utiliser des doigtés de substitution. Le toucher du clavicorde diffère aussi de celui du piano. Comme pour le piano, le principal paramètre de jeu est la vitesse de la touche. Mais contrairement au piano, l'enfoncement de la touche change l'intonation: le poids doit donc être contrôlé pendant toute la note. Finalement, le seul équivalent du clavicorde est le clavier de synthétiseur avec "aftertouch".

1.2 Le paradoxe du clavicorde

Nos études sur la dynamique du clavicorde ont montré que le principal paramètre de contrôle de l'intensité sonore (en terme de niveau de pression sonore, SPL) est la vitesse d'impact du tangent V_p . On trouve une relation linéaire entre le logarithme de la vitesse et le SPL [d'Alessandro (2010)]. On note que l'accroissement de vitesse du tangent s'accompagne d'un accroissement de tension, et donc de F_0 .



Figure 1: Les quatre clavicores de l'étude. De haut en bas: BM, ZK, BS, DH

Le jeu du clavicorde demande donc un geste paradoxal (que nous nommons « le paradoxe du clavicorde ») : à l'instant du contact tangent-corde, il faut jouer vite pour jouer assez fort, mais aussi jouer juste, c'est à dire ne pas déplacer la corde. Il faudrait donc transmettre toute la quantité de mouvement à la corde sans la déplacer, ni perdre le contact. Dans la pratique, ce type de mouvement est impossible à réaliser exactement. Ce paradoxe s'énonce de plusieurs façons: du côté du tangent, il s'agit de se mouvoir avec une grande vitesse, mais sans grand déplacement après le contact. Pour le musicien, il s'agit de jouer avec une grande gamme dynamique, mais aussi avec une intonation stable et juste, donc un mouvement de doigt rapide mais avec un enfoncement contrôlé. Une contrainte supplémentaire est de conserver le contact entre tangent et corde, la moindre séparation entraînant une corde qui frise, avec un bruit inacceptable.

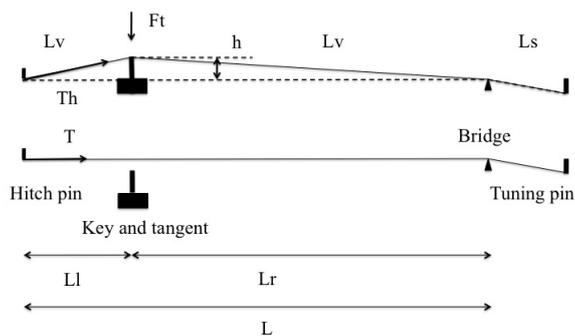


Figure 2: Vue d'artiste de la géométrie d'une corde de clavicorde.

1.3 Contenu de l'étude

La première partie de cet article établit les relations entre les paramètres de jeu (vitesse des tangents), l'intonation et le volume sonore du clavicorde, en faisant des hypothèses simplificatrices (cordes parfaitement souples, mouvement vertical de la corde, etc.) La seconde partie est expérimentale: des mesures sont effectuées sur quatre instruments assez différents, et comparées aux prédictions de la théorie. La troisième partie se concentre sur le geste du musicien. De nouvelles mesures sont effectuées, en utilisant différentes techniques de jeu du clavier, une technique de "tire" décrite dans certains traités anciens, et la technique ordinaire avec un mouvement vertical du doigt.

2 Etude théorique

Le mécanisme du clavicorde est aussi simple que possible pour un cordophone à clavier. La touche est un balancier muni d'une lame de métal, le tangent, avec d'un côté le doigt, et de l'autre la paire de cordes. En appuyant sur la touche, le tangent monte et entre en contact avec le chœur de cordes, qui sonne sur sa partie droite. En relâchant la touche, un étouffoir absorbe la vibrations des cordes et le son.

Les cordes du clavicorde vont en général par paire, ce qui est préférable à la fois pour le son et le toucher. Le son d'une double corde est plus complexe et dure plus longtemps (c'est bien connu pour le piano [Weinreich (1977)]), en raison du couplage au niveau du chevalet. D'autre part, le contact plus ferme fourni par deux cordes permet un meilleur contrôle de la touche. Les principaux paramètres sonores étudiés ici sont la fréquence fondamentale et le niveau de pression acoustique. Pour le musicien, cela correspond principalement à hauteur perçue et à la nuance dynamique. Dans des travaux antérieurs, nous avons montré que la dynamique du clavicorde induit principalement une variation de SPL, et marginalement une variation spectrale (contrairement au piano, pour lequel la richesse spectrale varie avec la dynamique).

2.1 Hauteur de tangent et F0

Toutes les notations correspondent à la Figure 2. La partie vibrante de la corde est entre le chevalet et la tangente. La partie entre pointe d'accroche et tangente ne sonne

pas. la partie entre chevalet et cheville vibre par sympathie.

- L longueur de la corde au repos
- L_v longueur vibrante, tangent à hauteur h
- L_d longueur étouffée, tangent à hauteur h
- L_r longueur vibrante, au repos
- L_l longueur étouffée, au repos
- L_s longueur sympathique
- h hauteur de tangent
- T tension au repos
- T_h tension, tangent à hauteur h
- F_t force totale sur le tangent à hauteur h
- F_v force sur le tangent à hauteur h , de la partie vibrante
- F_d force sur le tangent à hauteur h de la partie étouffée

Pour une corde idéale, F_0 est donnée par la formule de Mersenne:

$$F_0 = \frac{C_s}{2L_v} = \frac{1}{dL_v} \sqrt{\frac{T_h}{\pi\rho}} \quad (1)$$

avec C_s la vitesse de propagation dans la corde (m/s), ρ (kg/m^3) la densité d (m) le diamètre de la corde, T_h sa tension. Les cordes du clavicorde sont fines et relativement peu tendues. Elles montrent beaucoup moins d'inharmonicité que celles du piano par exemple. Cette simple formule semble donc une approximation acceptable.

Lorsque la touche est baissée, la corde monte au dessus de sa position de repos, ce qui entraîne un accroissement de tension, donc de F_0 . Soit λ le module d'élasticité de la corde (produit du module d'Young par la section). Par rapport à la position de repos, la corde soulevée par la tangente d'une hauteur h s'accroît d'une longueur $L_v + L_d - L$, ce qui donne un accroissement de tension ΔT_h de la corde :

$$\Delta T_h = \frac{\lambda(\sqrt{L_r^2 + h^2} + \sqrt{L_l^2 + h^2} - L)}{L} \quad (2)$$

Ce qui donne :

$$F_0 = \sqrt{\frac{T + \frac{\lambda(\sqrt{L_r^2 + h^2} + \sqrt{L_l^2 + h^2} - L)}{L}}{d^2(L_r^2 + h^2)\pi\rho}} \quad (3)$$

pour une corde de $L_l = 0.15m$, $L_r = 0.84m$, en laiton ($\rho = 8470kg/m^3$) de diamètre $0.51mm$, qui sonne $do = 123Hz$, la tension est de $73.96N$. Avec un module d'Young de ($103 \cdot 10^9 Pa$), une montée de $1mm$ porte F_0 à $123.07 Hz$, soit 1 Cent, une augmentation non perçue. Une hauteur de $5mm$ correspond à $124.72Hz$, soit r 24 Cent, ce qui est nettement perceptible.

Lorsque la tangente touche le chœur de cordes, une résistance est ressentie, c'est la dureté du toucher [Bavington (1998)]. Pour une tangente de hauteur h , la force exercée par les cordes est (en utilisant la Figure 2):

$$F_t = hT_h \left(\frac{L_d + L_v}{L_d L_v} \right) = hT_h \left(\frac{\sqrt{L_r^2 + h^2} + \sqrt{L_l^2 + h^2}}{\sqrt{(L_r^2 + h^2)(L_l^2 + h^2)}} \right) \quad (4)$$

En reprenant l'exemple précédent, pour une paire de cordes, la force sur la tangente est d'environ $0.65 N$ par mm de hauteur. On peut négliger dans ce calcul la tension supplémentaire due à l'élévation de la tangente (le calcul donne une variation de 5 % environ).

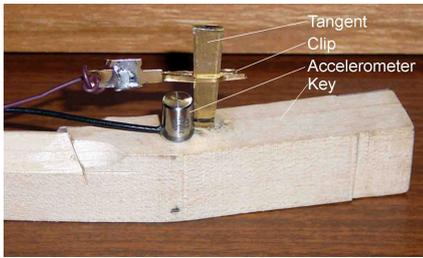


Figure 3: Accéléromètre et broche pour la mesure du contact corde/tangent, près du tangent.

2.2 Vitesse du tangent et SPL

L'impact du tangent sur les cordes génère une onde qui se réfléchi au chevalet et produit le mouvement d'oscillation de la corde. Cette vibration transverse domine le mouvement de la corde, les vibrations en compression et en rotation [Välimäki et al. (2003)] ne jouent qu'un rôle secondaire dans le cas du clavicorde. Le mouvement horizontal de la corde sur le tangent est également négligeable, comme on peut le constater par l'usure verticale ponctuelle du sommet des tangents: la corde "scie" les tangents verticalement, mais ne les frotte pas. Dans une étude précédente, nous avons montré que le SPL en dB dépend linéairement du logarithme de la vitesse maximale, à l'impact du tangent. La force exercée par la corde sur le chevalet (et donc sur la table d'harmonie) est donnée par (voir [d'Alessandro (2010)] Equation 8, $Z_0 = T/C_s$ étant l'impédance caractéristique de la corde, et y la vitesse du tangent) :

$$F_s = 2Z_0\dot{y}(t)$$

La force au chevalet, et donc l'intensité sonore dépend de la tension de la corde et du rapport entre vitesse du tangent à l'impact et vitesse de propagation dans la corde (et non de la longueur de la corde ou d'autres facteurs). Après l'impact initial, la vitesse du tangent décroît exponentiellement [Thwaites & Fletcher (1981)] (ou plus exactement comme une oscillation amortie [d'Alessandro (2010)]).

2.3 Hauteur de tangent, vitesse et intonation

F_0 dépend de la hauteur du tangent. Cette hauteur dépend de la vitesse maximale d'impact V . Si la décroissance de la vitesse est exponentielle après l'impact (avec une constante de temps a):

$$\dot{y}(t) = V \exp(-at)$$

la hauteur de la tangente au temps T est :

$$h(t) = \frac{V}{a}(1 - \exp(-aT)) \quad (5)$$

comme $\exp(-aT)$ tend vers 0, h est proportionnel à V . En reportant dans l'équation 3 et en considérant que $t(L_r^2 + h^2) \approx L_r^2$ au dénominateur, il apparaît que l'accroissement de F_0 en fonction de la dynamique du jeu dépend essentiellement de la racine carrée de la vitesse d'impact.

3 Etude expérimentale

Le niveau de pression sonore (SPL), la fréquence fondamentale (F_0) et la vitesse d'impact (V) des tangents

sont mesurés pour toutes les notes de quatre clavicordes (voir la Figure 1 et la référence [d'Alessandro et al. (2008)] pour une description de ces instruments). La vitesse des tangents est proportionnelle à celle du doigt, puisque la touche peut être considérée comme un levier rigide.

3.1 Méthodologie de mesure

La méthodologie appliquée dans [d'Alessandro (2010)] pour un des instruments (BS) est reprise. Les instruments sont enregistrés dans une cabine insonorisée et quasi-anéchoïque. Quatre signaux sont enregistrés numériquement de façon synchrone à 48 kHz/16 bits: le signal acoustique (microphone de mesure omnidirectionnel B&K 3265, placé 30cm au dessus du centre de la table d'harmonie); signal de contact corde/tangent pour chaque corde (en 0 ou 1. Les cordes et les tangents étant en métal, un signal est envoyé à la cheville et récupéré à la tangente, lorsqu'il y a contact, il n'y a pas de signal si le circuit est ouvert); la vitesse du tangent est mesurée avec un accéléromètre miniature B&K 4374, et un amplificateur de charge B&K 2692. La masse de l'accéléromètre est faible (≈ 0.75 g) comparée à celle de la touche (≈ 20 g), ce qui permet de négliger son effet sur les mesures. Le dispositif installé à l'arrière de la touche est représenté sur la figure 3.

Plusieurs quantités sont calculées à partir de ces signaux. Pour le signal de vitesse, le pic de vitesse V au moment de l'impact semble la mesure la plus représentative du mouvement. Cette mesure représente, à un facteur de levier près, la vitesse verticale maximale du doigt. Le volume sonore est représenté par le SPL "plat", sans pondération. Il s'agit de la moyenne quadratique du signal de pression (avec une référence de $20 \mu\text{Pa}$), en utilisant un temps d'intégration de 125 ms. Ce temps court est choisi afin de donner du poids à l'attaque, en raison de l'extinction exponentielle du son du clavicorde. F_0 est calculé à partir du signal acoustique, en utilisant l'algorithme YIN [de Cheveigné et al. (2002)] algorithm, toutes les 0.7 ms, moyenné sur une fenêtre de 250 ms, afin de mesurer principalement la hauteur perçue au début de la note.

3.2 SPL et V

La figure 4 montre le SPL en fonction du logarithme de V pour les quatre clavicordes. Les mesures ont été effectuées pour toutes les notes, mais seulement les "do" et les "fa" sont représentés, pour des raisons de place. On retrouve des résultats similaires à ceux déjà obtenus pour un seul instrument [d'Alessandro (2010)]. Ces figures montrent un bon accord avec la théorie, pour tous les instruments: une dépendance de type linéaire entre le logarithme de V et le SPL en dB. La pente varie d'une note à l'autre et d'un instrument à l'autre.

Cette pente pourrait donner une indication de la gamme dynamique possible sur un instrument particulier et une note particulière, et finalement de la qualité dynamique d'un instrument.

3.3 F_0 et V

Le logarithme de F_0 (demi tons) est représenté en fonction du logarithme de V dans la figure 4. De même seules les notes "do" et "sol" sont représentées. La hauteur



Figure 4: Clavicordes BS (colonne 1, 2), DH (3, 4), ZK (5,6) et BM (7, 8). F0 (demi tons) et SPL (dB) en fonction du logarithme de V pour les notes do1, sol1, do2, sol2, do3, sol3, do4, sol4, do5

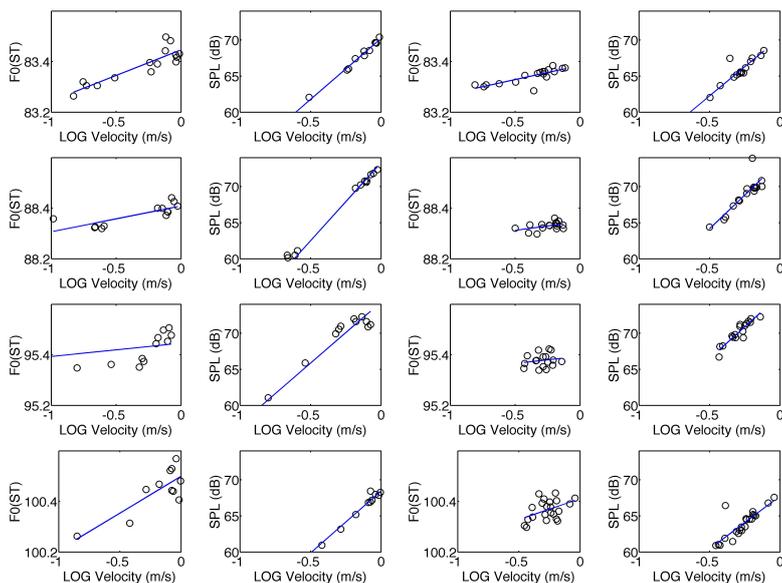


Figure 5: Clavicorde DH. Toucher vertical (à gauche) et rond (à droite), F0 (demi tons) et SPL (dB) en fonction du logarithme de V pour les notes do2, fa2, fa3, do3.

des tangents n'a pas été mesurée directement dans ce travail (un accéléromètre n'étant pas bien adapté pour cela). Cependant l'équation 5 montre que la hauteur des tangents et V_p sont en relation linéaire, ce qui donne une dépendance de F_0 en racine carrée du pic de vitesse. Donc la hauteur musicale (sur échelle logarithmique) doit dépendre à un facteur $1/2$ près du logarithme du pic de vitesse. Cette relation linéaire est bien observée dans les mesures, avec cependant moins d'évidence que la relation entre SPL et V . Les résultats précédents montrent que la vitesse des tangents agit en même temps sur le volume sonore et sur l'intonation. Cette dépendance, avec de coefficients variés, implique une contrainte dans le jeu de l'instrument: jouer vite signifie jouer fort mais aussi jouer haut, au moins à l'attaque. Des différences entre instruments et entre notes du même instrument sont notables [d'Alessandro et al. (2006)].

4 Résoudre le paradoxe: le toucher du clavicorde

4.1 Toucher rond, toucher droit

Le paradoxe du clavicorde demande simultanément une grande vitesse d'attaque et un déplacement minimal de la corde. Des effets comme le vibrato, "bebung" en allemand, sont parfois notés dans le répertoire pré-classique, ainsi que les effets d'attaque secondaire, ou enfoncement après l'attaque, que l'on nomme aujourd'hui "aftertouch" dans les instruments numériques, ou "tragen" de la note dans le répertoire ancien. Ce jeu sur la profondeur du toucher est unique au clavicorde, c'est le seul instrument à clavier qui l'autorise, mis à part les claviers électroniques d'aujourd'hui. La liaison maintenue entre la corde et le doigt est une des difficultés spécifiques de l'instrument, en même temps qu'une de ses richesses. Notons que l'enfoncement du clavier du clavicorde est peu profond, environ 4 mm. Une façon de limiter le déplacement du tangent est d'augmenter la dureté du toucher. Dans certains instruments, un étouffoir rigide est disposé afin de diminuer la longueur et la souplesse des cordes à gauche des tangents. Ainsi, le toucher devient dur, et l'instrument plus difficile à jouer, moins souple et agréable sous les doigts. Ce n'est pas forcément une bonne solution.

Plutôt que de durcir le toucher, il est possible de développer des gestes qui développent une certaine marge dans les variations vitesse/déplacement du tangent. On peut utiliser ces gestes pour minimiser le déplacement, en maximisant la vitesse, tout en maintenant le contact corde/tangent. Par le maintien du contact corde-doigt, toute l'histoire du geste pendant qu'une note sonne a de l'importance. Contrairement au piano par exemple, pour lequel dès que le marteau est libre, en perdant le contact avec le pilote, le doigt ne peut plus rien modifier au son qui va être produit, le geste au clavicorde peut à tout moment changer le son [d'Alessandro (2010:2)].

Ainsi, la pratique de l'instrument a amené le développement de gestes digitaux particuliers, auxquels différentes sources anciennes ont allusion. Plutôt qu'un mouvement strictement vertical du doigt, plusieurs auteurs décrivent un mouvement rotatif, avec un retrait du doigt vers l'arrière de la touche après le contact. Le doigt est comme tiré en arrière, ce qui est rendu en France par la terminologie "tire" [Geoffroy-Dechaume (1986)]. Dans le

monde germanique, en particulier l'entourage de J.S. Bach et son école (ses fils et élèves), probablement aussi chez Mozart, jusqu'à Czerny, ce type de toucher porte le nom de [Van Delft (2003)] "Schnellen". Il est sous-entendu dans la technique du piano jusqu'au début du XIX^{ème} siècle, quand un autre type de virtuosité commence à prendre le pas sur la délicatesse de toucher permise au clavicorde.

4.2 Mesures avec des toucher différents

Afin d'étudier l'influence du musicien sur le son du clavicorde, telle qu'elle est décrite dans la littérature ancienne, un nouvel ensemble de mesure a été enregistré. Il s'agit de reproduire un toucher "rond" qui utilise le retrait vers l'arrière du doigt après le contact avec la touche, dans un mouvement de rotation. Cette "tire" permet d'obtenir une articulation particulière, comparable au son "t'nt", plutôt que l'articulation comparable au son "t't" résultat d'un toucher vertical, comme cela est enseigné dans un traité du 18^{ème} siècle [Van Delft (2003)]. Le contrôle du tangent pendant la note devrait permettre, par le mouvement de retrait du doigt, de contrôler la tension de la corde, donc la variation mélodique, et ainsi de réaliser le geste paradoxal désiré.

Pour les mesures, deux types de toucher (le toucher ordinaire, vertical ou "droit" et un toucher rond ou "tire", avec un retrait du doigt vers l'arrière après le contact) ont été réalisés sur le clavicorde DH par un musicien entraîné dans ce type de technique pour les instruments anciens. La consigne était de jouer avec différents niveaux dynamiques, en contrôlant au mieux la justesse, avec les deux types de gestes.

Des mesures de vitesse, volume et intonation en utilisant différents touchers sont portées dans la figure 5, pour 4 notes sur le clavier (do2, fa2, do3, fa3). Les résultats montrent que des dynamiques comparables sont obtenues avec les deux conditions de toucher pour une même note. Les deux types de geste permettent de jouer avec des vitesses comparables, et obtiennent des volumes sonores comparables. En effet, le volume sonore dépend peu de l'histoire du geste, mais essentiellement de la vitesse d'impact. C'est elle qui détermine (en rapport avec la vitesse de propagation dans la corde), l'angle de la déformation initiale de la corde, et donc la force du son. Pour l'intonation, au contraire, la variation est continue tant que le son est audible. Donc l'histoire du geste peut changer la hauteur perçue, ce que l'on constate bien sur les mesures. Alors que les volumes sonores sont comparables, du point de vue de l'intonation, les valeurs sont plus basses et plus concentrées pour le toucher "tire" ou "rond", que pour le toucher "droit". Rappelons que les valeurs de F_0 sont obtenues comme la moyenne sur le début de la note de la fréquence fondamentale, donc une évolution de la tension peut influencer sur la valeur de F_0 . Le mouvement circulaire associé au retrait du doigt lors de la "tire" amène un léger relâchement de la tension. Il semble donc que le travail particulier sur le toucher du clavicorde permette effectivement de résoudre, pour partie, le paradoxe du clavicorde.

4.3 Conclusion

Le clavicorde est le seul cordophone à clavier qui maintienne un contrôle continu de la corde par le doigt. Cela implique que les variations de pression sur la touche

changent le son, mais aussi qu'il y a une limite fondamentale entre dynamique et intonation, puisque jouer plus fort entraîne forcément une élévation du tangent, donc de l'intonation. Jouer fort sans trop élever l'intonation demande un travail particulier, et paradoxal. Cependant, la clé pour résoudre ce paradoxe est donnée par la temporalité différente du volume sonore et de l'intonation: tandis que le volume dépend essentiellement de la vitesse d'impact, l'intonation dépend davantage de la moyenne des évolutions de la tension dans les premières dizaines de millisecondes du son. Ainsi un geste rapide de "détente" de la corde est à même de diminuer le changement d'intonation. Ce type de geste est effectivement décrit dans des sources historiques sur le jeu du clavier, et en particulier dans le jeu de J.S. Bach (voir la citation de Quantz dans [Geoffroy-Dechaume (1986)]). Son fils aîné Carl Philip Emmanuel donne un nom à cette technique "Schnellen" et la décrit avec quelques détails. Les mesures rapportées ici semblent confirmer l'effet des différentes techniques de jeu sur l'intonation du clavicorde, relativement indépendamment de son volume sonore. En ce sens les vertus pédagogiques qui ont longtemps été reconnues au clavicorde pourraient être objectivées par les mesures conjointes que nous proposons. La sensibilité ainsi développée semble pouvoir se transposer au jeu des autres instruments à clavier.

Les limites du travail présenté doivent également être discutées. Tout d'abord, les modèles théoriques développés sont simples, peut-être trop. La raideur de la corde, le mouvement transverse sur le tangent, sont négligés. L'observation directe du mouvement de la corde, par exemple à l'aide de cinéma ultra-rapide, serait certainement un outil expérimental de choix.

Les mesures que nous montrons pour des touchers différents sont assez réduites, et mériteraient d'être confirmées, en les étendant à plusieurs instruments, et à plusieurs musiciens. Des modèles mécaniques de ce toucher, en utilisant des doigts robotisés, ou de simples cames de profils variés pourraient permettre une étude systématique des différents touchers. En plus du volume sonore et de l'intonation, le timbre du clavicorde varie en fonction de la dynamique (dans des proportions moindre cependant que pour le piano). La question de la perception de l'intonation, du volume sonore et du timbre en fonction de la dynamique se pose donc, et elle devra être abordée dans des études spécifiques.

Notons enfin que la question du réglage des instruments est également cruciale, et relativement peu discutée dans les publications sur le clavicorde. En effet, il suffit de changer l'enfoncement du clavier, par exemple, pour changer la gamme de vitesse possible pour le tangent, donc le volume sonore, mais pas forcément l'intonation, si le geste est bien contrôlé.

References

- [Brauchli (1998)] B. Brauchli, *The Clavichord*, (Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1998).
- [Thwaites & Fletcher (1981)] S. Thwaites and N. H. Fletcher 'Some notes on the clavichord', *Journal of the Acoustical Society of America* **69**, 1476-1483 (1981).
- [Välimäki et al. (2003)] V. Välimäki, M. Laurson, and C. Erkut, "Commutated waveguide Synthesis of the Clavichord", *Comp. Mus. J.* **27**, 71-82 (2003).
- [Bavington (1998)] P. Bavington "Keylever, tangent and string - a preliminary analysis of clavichord touch and action" in *De Clavicordio III*, Proc. of the 3rd Int. Clavichord Symp, Magnano, Italy, 61-99 (1997).
- [d'Alessandro et al. (2008)] C. d'Alessandro, C. Besnainou, L. Ginieis "Acoustic portrait of four clavichords : tangent velocities, loudness and decay times " *De Clavicordio*, VIII, Proc. of the 8th Int. Clavichord Symp, Magnano, Italy, 201-213 (2008)
- [Weinreich (1977)] G. Weinreich, "Coupled piano strings", *J. Acoust. Soc. Am.* **62**, 1474-1485 (1977).
- [d'Alessandro et al. (2006)] C. d'Alessandro, B.F.G. Katz, and F. Boudet "On the acoustics of the clavichord" in *De Clavicordio VII*, Proc. of the 7th Int. Clavichord Symp, Magnano, Italy, 171-182 (2006).
- [de Cheveigné et al. (2002)] A. de Cheveigné and H. Kawahara, "YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music", *J. Acoust. Soc. Am.* **111**, 1917-1930 (2002).
- [Van Delft (2003)] Menno van Delft, 'Schnellen: a quintessential articulation technique in eighteenth-century keyboard playing', *The Keyboard in Baroque Europe*, ed. C. Hogwood (Cambridge: Cambridge University Press, 2003) pp.187-97
- [Geoffroy-Dechaume (1986)] Antoine Geoffroy-Dechaume, *Le Langage du clavecin*, éditions Van de Velde 1986
- [d'Alessandro (2010)] C. d'Alessandro, "On the dynamics of the clavichord : From tangent motion to sound" *Journal of the Acoustical Society of America* **128**(4), 2010, p. 2173-2181.
- [d'Alessandro (2010:2)] C. d'Alessandro "The acoustics of tangent-string interaction in the clavichord compared to hammer-string interaction in the fortepiano" *De Clavicordio*, XI, 2010, p. 83-90.