

Titre: Contrôle automatisé de la fréquence d'une corde de clavecin
Title:

Auteurs: Luc Robillard
Authors:

Date: 2003

Type: Rapport / Report

Référence: Robillard, L. (2003). Contrôle automatisé de la fréquence d'une corde de clavecin.
Citation: (Rapport technique n° EPM-RT-2003-07). <https://publications.polymtl.ca/2609/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2609/>
PolyPublie URL:

Version: Version officielle de l'éditeur / Published version

Conditions d'utilisation: Tous droits réservés / All rights reserved
Terms of Use:

 **Document publié chez l'éditeur officiel**
Document issued by the official publisher

Institution: École Polytechnique de Montréal

Numéro de rapport: EPM-RT-2003-07
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:

EPM-RT-2003-07

**CONTRÔLE AUTOMATISÉ DE LA
FRÉQUENCE D'UNE CORDE DE CLAVECIN**

Luc Robillard
Département de génie mécanique
École Polytechnique de Montréal

Juillet 2003

Poly

EPM-RT-2003-07

CONTRÔLE AUTOMATISÉ
DE LA FRÉQUENCE D'UNE CORDE DE CLAVECIN

Luc Robillard
Département de génie mécanique
École Polytechnique de Montréal

Juillet 2003

Remerciements

La préparation de ce rapport a été rendue possible grâce aux suggestions de messieurs Pierre-Yves Asselin, spécialiste des tempéraments et Yves Beaupré, facteur de clavecins de Montréal. Je remercie également madame Caroline Traube, professeur à la Faculté de Musique de l'Université de Montréal pour ses conseils en acoustique musicale et son encouragement dans la poursuite de mes travaux. Enfin, mes remerciements s'adressent à monsieur Réjean Poirier doyen de la Faculté de Musique de l'Université de Montréal, claveciniste professionnel, pour avoir bien voulu apporter sa contribution au projet en donnant le point de vue de l'artiste (texte en annexe) sur les paramètres acoustiques du clavecin.

TABLE DES MATIERES

	Page
1. Introduction	1
2. Caractéristiques d'une corde de clavecin	5
3. Diminution de fréquence par chauffage électrique	6
4. Puissance dissipée par conduction-convection	6
5. Voltage et courant requis	8
6. Augmentation de fréquence par déflexion de la corde	10
7. Elongation requise	12
8. Force transversale requise	13
9. Choix des actionneurs	16
10. Choix d'un excitateur-détecteur de fréquence	17
11. Système d'asservissement	17
12. Asservissement en temps réel	17
13. Conclusion	18
Bibliographie	19
Annexe 1: Graphiques	20
Annexe 2: Programme Fortran	26
Annexe 3: Point de vue de l'artiste	29

1. Introduction

Le claveciniste professionnel doit souvent faire appel à un accordeur spécialisé, à moins qu'il n'ait lui-même l'habileté de le faire, pour obtenir un tempérament particulier différent du tempérament habituel du piano, plus spécialement adapté à des œuvres baroques ou de la renaissance. Tel que décrit par Asselin (1985), les changements de fréquence pour passer d'un tempérament à un autre sont minimes, d'ordre microtonal. Le développement d'un système automatisé permettant d'obtenir rapidement et de maintenir le tempérament désiré représente donc un grand intérêt pour le claveciniste.

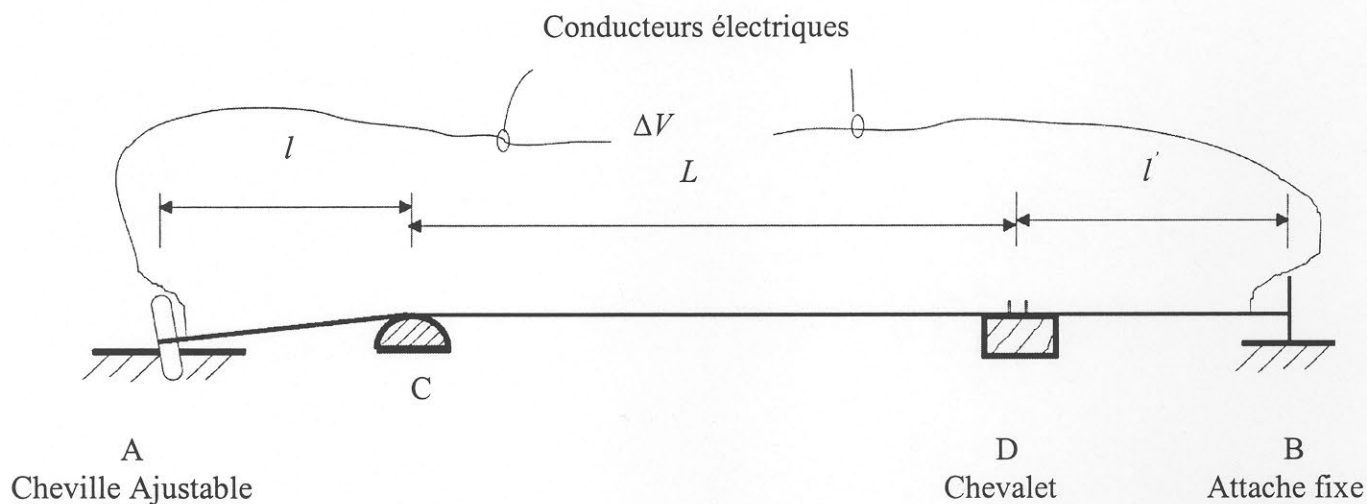
La fréquence de chacune des quelques 180 cordes dépend entre autres de la force de tension exercée, celle-ci étant contrôlée de façon standard par les chevilles autour desquelles s'enroule la corde. Tout comme pour le piano, l'accordeur ajuste de façon précise la tension en faisant pivoter plus ou moins cette cheville. A supposer que les fréquences de chaque corde sont déjà obtenues pour un tempérament donné, par exemple, le tempérament égal, nous voulons développer une technique permettant de modifier de façon microtonale chacune des fréquences sans retoucher aux chevilles, cette modification devant être accomplie automatiquement par un système approprié.

Deux approches définies schématiquement à la figure 1 sont envisagées :

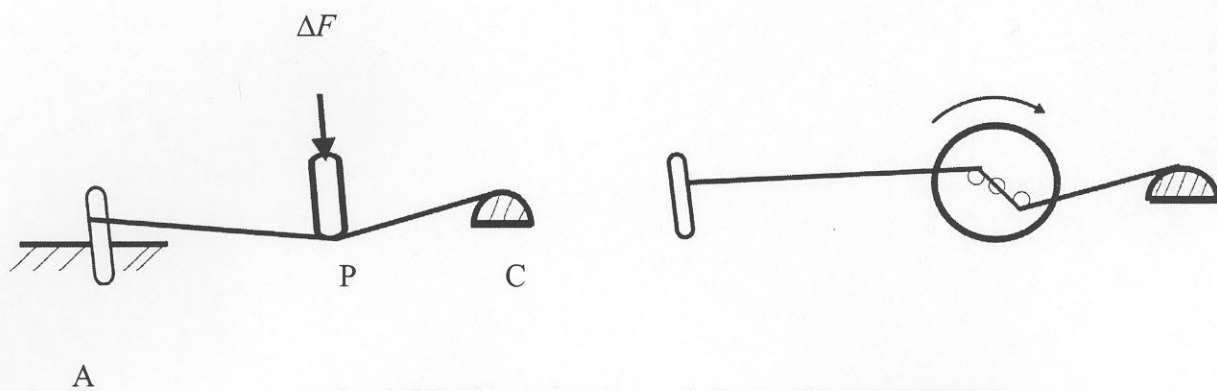
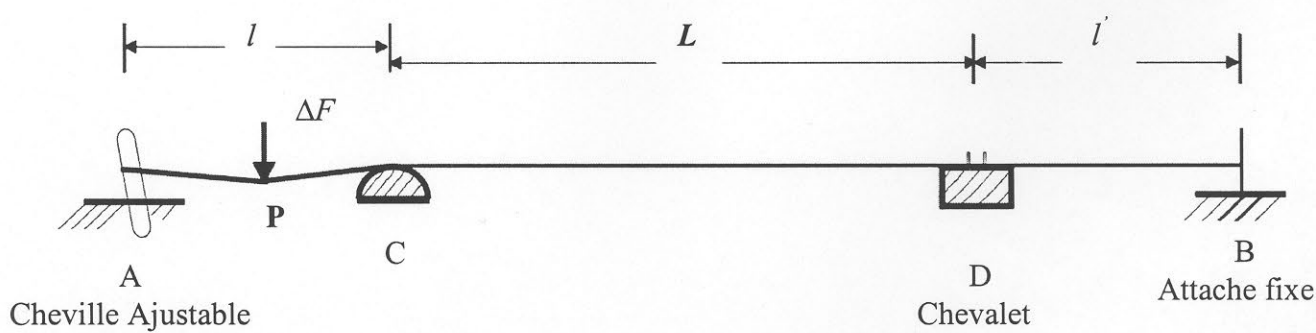
1. Le chauffage de la corde par courant électrique ;
2. L'utilisation d'un actionneur ('actuator') entre la cheville et l'appui C (sillet) ou entre le chevalet et la pointe d'accroche B.

La première approche augmente la température de la corde, ce qui a pour effet de diminuer sa force de tension et par conséquent sa fréquence. L'ajustement de la température est assuré par le contrôle du voltage appliqué aux extrémités de la corde. Un système de rétroaction ('feedback') détecte la fréquence et ajuste en conséquence le voltage. Cette approche a été proposée récemment et brevetée par D. A. Gilmore (2003). La compagnie QRS Story & Clark (2003) est en voie de commercialiser ce brevet dans la fabrication de pianos avec accordage automatisé (self-tuned pianos).

Dans la deuxième approche, l'actionneur ('actuator') mécanique exerce une force perpendiculaire sur la corde donnant la déflexion appropriée et augmentant ainsi sa force de tension. Comme



a - Chauffage par courant électrique



b - Déflexion mécanique de la corde par actionneur

Figure 1 - Modification de la tension d'une corde de clavecin

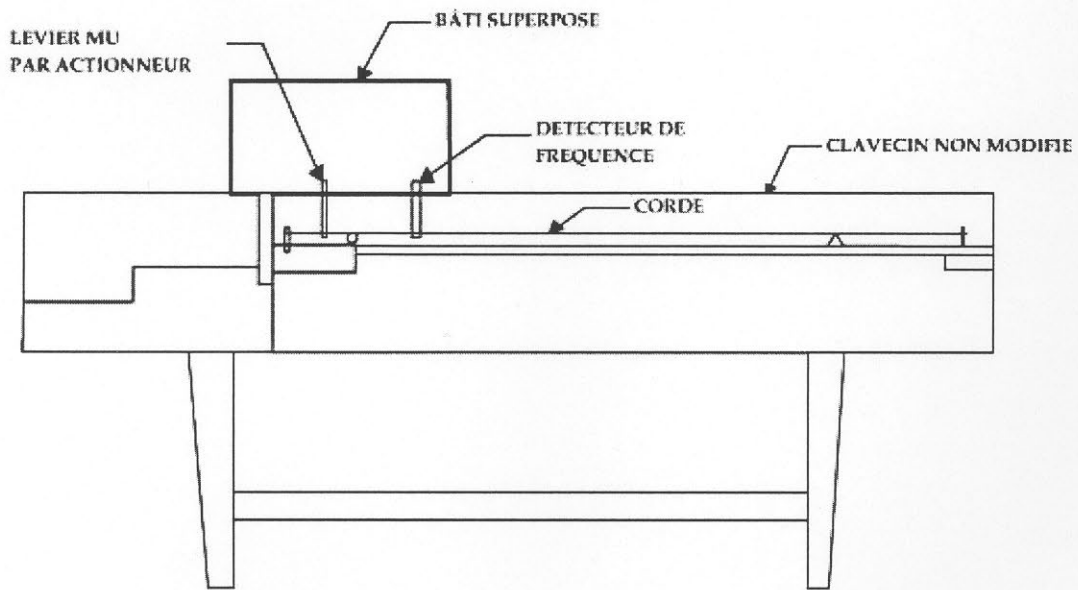
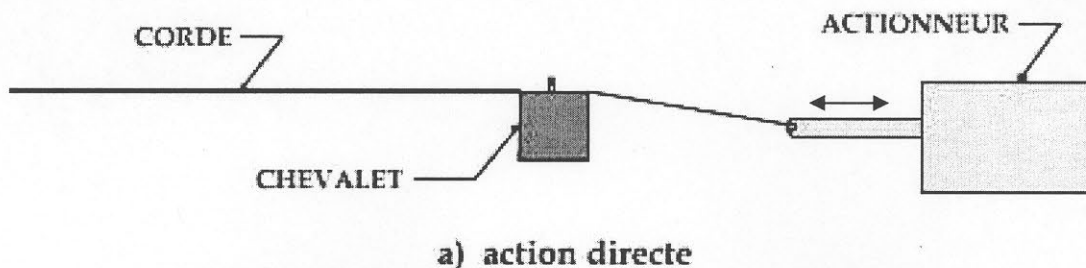


Figure 2: clavecin non modifié et bâti superposé

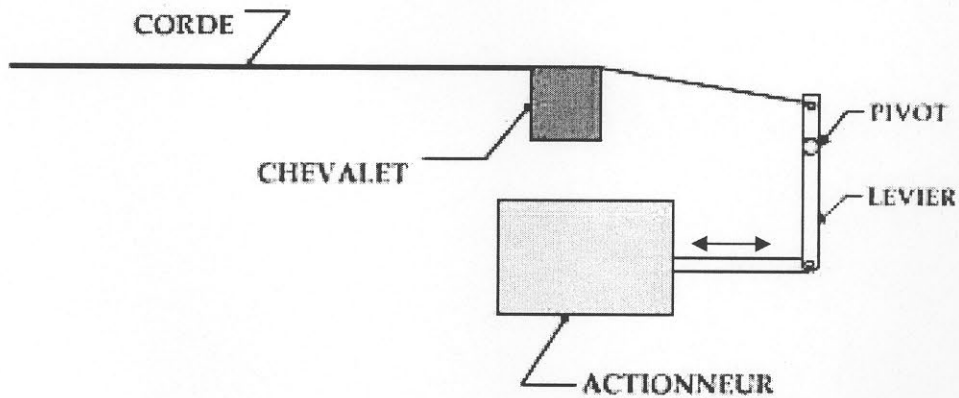
pour le cas précédent, un système de rétroaction est aussi nécessaire pour exercer un contrôle sur l'actionneur.

L'approche utilisant une déflexion de la corde pour augmenter la fréquence permettrait l'ajout d'un bloc d'actionneurs intégrés dans un bâti superposé à un clavecin existant (voir figure 2), sans modification de ce dernier. D'autres systèmes agissant sur la tension de la corde par le biais d'actionneurs sont aussi possibles (voir figure 3), mais ils nécessitent des modifications à apporter à la conception classique d'un clavecin.

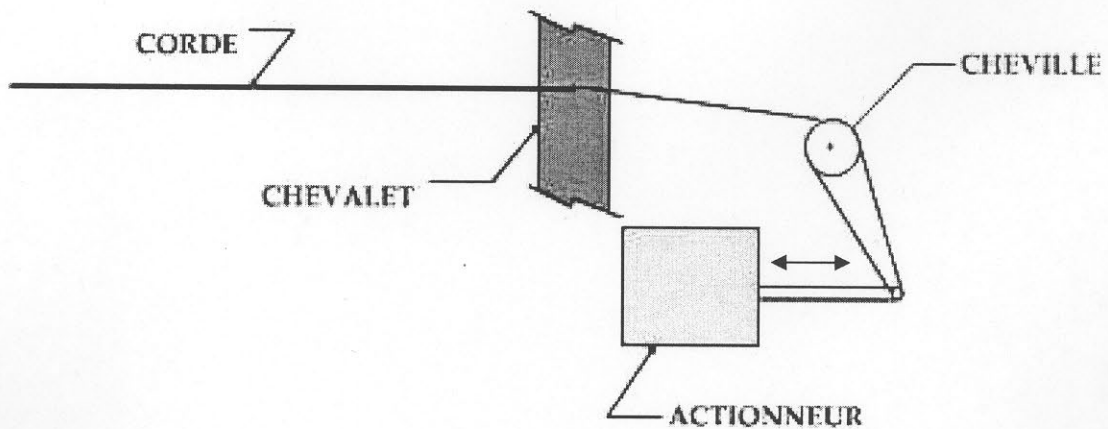


a) action directe

Figure 3 : clavecin modifié



b) levier pivotant



c) cheville pivotante

Figure 3 (suite) : Clavecin modifié

Avant d'aborder l'étude du système de détection de la fréquence et du circuit électronique nécessaire pour une rétroaction approprié à chacune des cordes du clavecin, il nous faut d'abord établir l'ordre de grandeur de certaines quantités physiques, voltages et courants dans le cas du chauffage, forces et déflexions dans le cas d'un actionneur.

2. Caractéristiques d'une corde de clavecin

Considérons la corde correspondant à la note do_4 , celle qui est à peu près au centre du clavier. Selon Benade (1990), les caractéristiques de cette corde sont les suivantes :

longueur de la partie vibrante entre le chevalet D et l'appui C, sur la figure 1 :	$L = 70 \text{ cm}$
longueur totale :	$L_t \approx 85 \text{ cm}$
diamètre :	$d = 0.32 \text{ mm}$
section :	$A = 8.0425 \times 10^{-8} \text{ m}^2$
fréquence de vibration selon le clavier tempéré avec la_4 à 440 Hz :	$f = 261.63 \text{ Hz}$

La corde est en acier, lequel, d'après Crandall et autres (1978) et Weast (1971), possède les propriétés suivantes :

module d'élasticité :	$E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
masse volumique :	$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$
coefficient d'expansion linéaire :	$\alpha = 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$
résistance ohmique :	$R/L_t = 0.0123 \text{ ohm/cm}$

La fréquence est donnée par l'équation suivante :

$$f = \left(\frac{T}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2L} \quad (1)$$

dans laquelle T , μ et L sont respectivement la force de tension (en abrégé, tension) de la corde en newtons (N), sa densité linéique en kilogrammes par mètre (kg/m) et sa longueur entre le chevalet B et le support A en mètres (m).

La densité linéique est reliée à la masse volumique ρ selon :

$$\mu = \rho A \quad (2)$$

A partir des données numériques de la corde do_4 on obtient $\mu = (7800)(8.0425 \times 10^{-8}) = 0.000627 \text{ kg/m}$. De l'équation (1), on obtient la tension en fonction de la fréquence :

$$T = \mu [2L]^2 f^2 = (0.000627)[(2)(0.70)]^2 f^2 = 0.00123 f^2 \quad (3)$$

Le cent (ζ) correspond à un rapport de fréquence donné par la formule

$$C = 1731.234 \ln \frac{f_2}{f_1} \quad (4)$$

Il y a 1200 ζ pour un octave (fréquence doublée) et 100 ζ pour un demi-ton tempéré.

Supposons qu'on veut accroître de 50 ζ la fréquence de la corde do_4 . Avec $f_1 = 261.63\text{Hz}$, on déduit de l'équation (4) $f_2 = 269.30\text{Hz}$. Les tensions correspondantes obtenues de l'équation (3) sont respectivement $T_1 = 84.2\text{N}$ et $T_2 = 89.2\text{N}$ pour une différence $\Delta T = 5\text{N}$. Si l'accroissement de fréquence est de 15 ζ , $f_2 = 263.9\text{Hz}$, $T_2 = 85.66\text{Hz}$ et $\Delta T = 1.46\text{N}$.

3. Diminution de fréquence par chauffage électrique

L'accroissement de température réduit la tension selon la formule :

$$\Delta T = -\alpha E A \Delta \theta \quad (5)$$

$\Delta \theta$ étant la différence de température en $^\circ\text{C}$. En utilisant les valeurs α , E et A données pour la corde do_4 , on obtient :

$$\Delta \theta = -\frac{\Delta T}{\alpha E A} = -\frac{\Delta T}{(10^{-5})(2 \times 10^{11})(8.0425 \times 10^{-8})} = -6.22 \Delta T \quad (6)$$

Pour des différences de 15 ζ et 50 ζ , on obtient respectivement $\Delta \theta = 9.1^\circ\text{C}$ et $\Delta \theta = 31^\circ\text{C}$. Une différence de température de $\sim 9^\circ\text{C}$ est donc nécessaire pour produire une différence de fréquence de 15 ζ , ce qui correspond à peu près à l'accroissement ou à la diminution de fréquence de la corde do_4 pour passer d'une tierce majeure tempérée à une tierce majeure juste avec le mi_4 ($f = 329.63\text{Hz}$) ou avec le la_3^b ($f = 207.65\text{Hz}$) respectivement.

4. Puissance dissipée par conduction-convection

Les cordes du clavecin ont une section cylindrique circulaire. Portées à une température supérieure à l'air ambiant, elles vont rejeter de la chaleur par conduction et convection. Cette puissance dissipée est celle qui doit être fournie sous forme d'énergie électrique à la corde.

Considérons le cas d'un cylindre circulaire horizontal porté à une température supérieure à l'air ambiant. Dans le cas d'un cylindre immobile, le transfert de chaleur vers l'air ambiant peut être obtenu de l'équation suivante tirée du livre de Bejan (1993) :

$$Nu_d = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_d^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (7)$$

dans laquelle :

$$Nu_d = \frac{q_w d}{\Delta \theta k} \quad (\text{nombre de Nusselt}) \quad (8)$$

$$Ra_d = \frac{g \beta}{\alpha \nu} \Delta \theta d^3 \quad (\text{nombre de Rayleigh}) \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{nombre de Prandtl}) \quad (10)$$

le transfert de chaleur en watts par mètre carré (W/m^2) est représenté par q_w ; $k = 0.026 W/(m.K)$ est la conductivité thermique de l'air ; dans le cas de l'air, le groupement $g\beta/(\alpha\nu)$ a pour valeur $90.7 (cm^3.K)^{-1}$ et $Pr = 0.72$.

L'expression (7) est valide pour $10^{-5} < Ra_d < 10^{12}$. Pour un $\Delta\theta = 9.1$ °C, le calcul du nombre de Rayleigh donne :

$$Ra = (90.7)(9.1)(.032)^3 = 0.0272$$

Le nombre de Nusselt est obtenu de l'expression (7) :

$$Nu_d = \left\{ 0.6 + \frac{(0.387)(0.027)^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / 0.72)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = 0.6027$$

Connaissant le nombre de Nusselt, on peut calculer q_w , le transfert de chaleur par unité de surface :

$$q_w = Nu_d \left(\frac{\Delta\theta k}{d} \right) = 0.6027 \frac{(9.1)(0.026)}{0.00032} = 446 \text{ W/m}^2$$

L'interface entre la corde et l'air est donnée par :

$$S = \pi d L_t = \pi(0.00032)(0.85) = 0.0008545 \text{ m}^2$$

où L_t est la longueur totale. La puissance dissipée P de la corde do_4 est donc :

$$P = (446)(0.0007036) = 0.383 \text{ W}$$

Les valeurs obtenues sont valides pour une corde immobile. La vibration de la corde aura pour effet d'accroître le transfert de chaleur dans des proportions qu'il est difficile d'évaluer étant donné qu'il n'existe, à la connaissance de l'auteur, aucune publication sur le sujet. De plus, les calculs effectués ne tiennent pas compte de l'interaction des cordes, lesquelles sont portées à des températures différentes, tout en étant très rapprochées les unes des autres.

5. Voltage et courant requis

Pour une différence de voltage appliquée aux extrémités A et B (voir figure1), la résistance ohmique de la corde do_4 est :

$$R = (0.0123)(85) = 1.045 \text{ ohm}$$

Le voltage V requis est :

$$V = \sqrt{PR} = \sqrt{(0.383)(1.0455)} = 0.633 \text{ volt}$$

Le courant correspondant est :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0.633}{1.045} = 0.605 \text{ ampère}$$

Un voltage de l'ordre de 0.5 volt élève la température de la corde do_4 de ~ 9 °C et diminue la fréquence de $\sim 15\%$. La puissance dissipée est de l'ordre de 0.4 watts.

Avec une diminution de fréquence de 50% ($\Delta\theta = 31$ °C), on trouve les valeurs suivantes :

$$Ra = 0.0925$$

$$Nu_d = 0.666$$

$$P = 1.43 \text{ watts}$$

$$V = 1.23 \text{ volts}$$

$$I = 1.17 \text{ ampères}$$

Si on considère une corde de laiton pour le do_5 , cette corde ayant pour caractéristiques :

$$L = 35 \text{ cm}$$

$$L_t = 50 \text{ cm}$$

$$d = 0.23 \text{ mm}$$

$$A = 4.155 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

$$E = 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 8400 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0.000349 \text{ kg/m}$$

$$\alpha = 0.00002 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$$

$$R / L_t = 0.018 \text{ ohm/cm}$$

$$f_1 = 523.26 \text{ Hz} \quad (do_5 \text{ tempéré})$$

on obtient:

$$T_1 = 46.82 \text{ N}$$

et pour une diminution de fréquence de 15% :

$$f_2 = 527.81 \text{ Hz}$$

$$T_2 = 47.638 \text{ N}$$

$$\Delta T = 0.818 \text{ N}$$

$$\Delta \theta = 9.73 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Ra_d = 0.0109$$

$$Nu_d = 0.565$$

$$P = 0.227 \text{ W}$$

$$V = 0.452 \text{ volt}$$

$$I = 0.502 \text{ ampère}$$

Les accroissements de température, voltages et ampérages requis semblent donc acceptables pour les cordes do_4 et do_5 du clavecin, à la condition de s'en tenir à des différences de fréquence microtonales de l'ordre de 15% .

Considérons pour fins de comparaison la corde do_4 d'un piano dont les caractéristiques sont les suivantes :

$$L = 62.5 \text{ cm}$$

$$L_t = 77.5 \text{ cm}$$

$$d = 1 \text{ mm}$$

$$A = 7.854 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$f = 261.63 \text{ Hz}$$

Cette corde est en acier dont les propriétés ont déjà été définies. Selon Weast (1971), on obtient la résistance ohmique $R/L = 0.0015 \text{ ohm/cm}$, c'est-à-dire $R = 0.116 \text{ ohms}$ pour la longueur de 77.5 cm. Des expressions (2), (3) et (6), on obtient :

$$\mu = 0.00613 \text{ kg/m}$$

$$T = 0.00958 f^2$$

$$\Delta\theta = 0.637 \Delta T$$

Des équations (9) et (7), on établit les nombres de Rayleigh et de Nusselt, la puissance dissipée et finalement le voltage et l'ampérage requis. Les résultats suivants sont donnés pour des changements de fréquence de 15¢ et 50¢ :

<u>15¢</u>	<u>50¢</u>
$\Delta T = 11.6 \text{ N}$	$\Delta T = 39.2 \text{ N}$
$\Delta\theta = 7.39 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\theta = 25.0 \text{ }^\circ\text{C}$
$Ra = 0.661$	$Ra = 2.25$
$Nu_d = 0.810$	$Nu_d = 0.937$
$P = 0.373 \text{ watts}$	$P = 1.47 \text{ watts}$
$V = 0.208 \text{ volts}$	$V = 0.413 \text{ volts}$
$I = 1.8 \text{ ampères}$	$I = 3.55 \text{ ampères}$

Le diamètre de la corde de piano étant plus important que celui de la corde correspondante du clavecin, la résistance ohmique avec comme conséquence un ampérage plus grand et la nécessité d'un filage d'alimentation électrique plus gros. Les accroissements de température sont légèrement supérieurs pour le clavecin, la dissipation d'énergie sous forme de chaleur demeurant à peu près la même dans les deux cas.

6. Augmentation de fréquence par déflexion de la corde

Soit la corde représentée à la figure 1b. Cette corde est attachée aux extrémités A (cheville) et B et supportée en D (chevalet) et C. Le support C (sillet) correspond à celui qui est désigné sous le nom de 'capo d'astro' pour le piano. On suppose pour simplifier le problème physique que le

support C laisse glisser la corde sans frottement. De plus, on néglige la rigidité de la corde. La tension de la corde est augmentée par l'application d'une force ΔF perpendiculaire à la corde (force transversale) au point P, à mi-distance entre A et C.

Supposons qu'il s'agisse de la corde do_4 dont la partie vibrante a une longueur $L = 70$ cm entre les points C et D. Les caractéristiques de cette corde sont :

Diamètre :	$d = 0.32$ mm	Section : $A = 8.0425 \times 10^{-8}$ m ²
Fréquence :	$f = 261.63$ Hz	
Acier :	$E = 2 \times 10^{11}$ N/m ²	
Longueur entre A et C :	$l = 10$ cm	
Longueur entre D et B :	$l' = 5$ cm	
Longueur totale :	$L_t = L + l + l' = 85$ cm	

La tension T déjà calculée pour la fréquence du do_4 est 84.2 N. On a également déterminé que pour une augmentation de fréquence correspondant à 50¢ l'augmentation de tension est $\Delta T = 5$ N. La figure 4 représente la déflexion Δh de la corde causée par la force perpendiculaire ΔF , laquelle est située à mi-distance le long de l' . A noter également que l' représente indifféremment l ou l' , ΔF pouvant aussi être appliqué entre le chevalet et la pointe d'accroche B.

L'élongation Δe de la corde due à la déflexion est reliée à la déflexion Δh selon l'expression :

$$\left(\frac{l}{2} + \frac{\Delta e}{2}\right)^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + \Delta h^2 \quad (11)$$

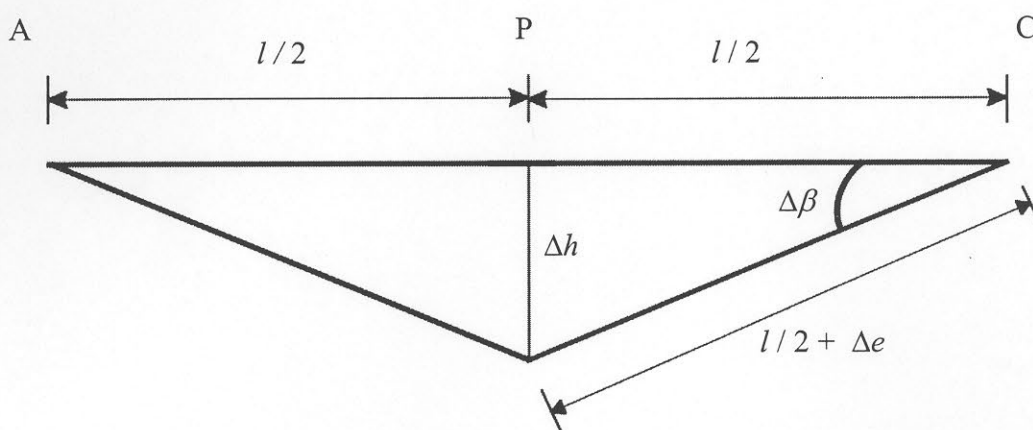


Figure 4 - Déflexion de la corde entre le support C et la cheville A

L'expression (11) suppose que le point P partage l en deux longueurs égales. Il s'ensuit que :

$$\frac{\Delta e}{l} = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta h}{l/2}\right)^2} - 1 \quad (12)$$

On peut aussi relier Δe à $\Delta\beta$ selon :

$$\sin \Delta\beta = \frac{\Delta h}{l/2 + \Delta e/2} \quad (13)$$

7. Elongation requise

la contrainte unitaire σ est reliée à l'élongation unitaire ϵ selon :

$$\sigma = E\epsilon \quad (14)$$

de sorte que :

$$T = A E \epsilon \quad (15)$$

L'élongation unitaire est reliée à l'élongation totale e selon :

$$\epsilon = \frac{e}{L_t} \quad (16)$$

de sorte que :

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta e}{L_t} \quad (17)$$

Des équations (12), (15) et (17), on trouve :

$$\Delta T = A E \left(\frac{l}{L_t}\right) \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta h}{l/2}\right)^2} - 1 \right] \quad (18)$$

Mettant en évidence $\Delta h/(l/2)$, on obtient :

$$\frac{\Delta h}{l/2} = \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta T}{AE} \right) (L_t / l) + 1 \right]^2 - 1} \quad (19)$$

Avec les valeurs numériques déjà données, on trouve :

$$\frac{\Delta h}{l/2} = \sqrt{\left[\left(\frac{5}{(8.0425 \times 10^{-8})(2 \times 10^{11})} \right) (75/15) + 1 \right]^2 - 1} = 0.0593$$

La déflexion est donc $\Delta h = (0.0593)(15/2) = 0.444$ cm. C'est la déflexion qui donnera une augmentation de fréquence de 50¢ (un quart de ton). Si $l = 5$ cm, on trouve $\Delta h = 0.242$ cm.

8. Force transversale requise

L'équilibre des forces est représenté à la figure 4. L'angle $\Delta\beta$ est donné par (voir figure 2) :

$$\Delta\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta h}{l/2} \right) = \tan^{-1} (0.0593) = 3.393^\circ \quad (20)$$

Selon la figure 5, on trouve :

$$\Delta F = 2 T \sin \Delta\beta = (2)(89.2) \sin 3.393^\circ = 10.56 \text{ N} \quad (2.37 \text{ lbs}) \quad (21)$$

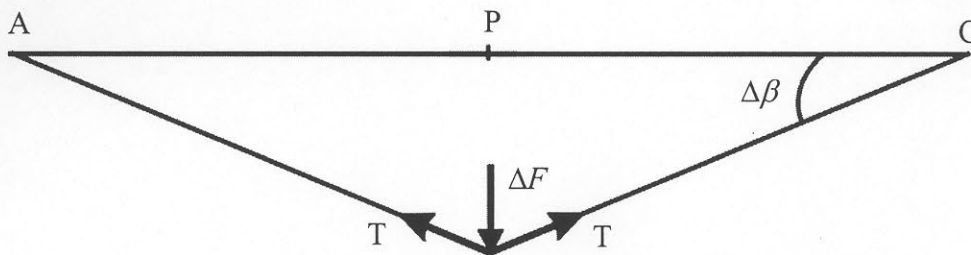


Figure 5 - Équilibre des forces

Pour $l=5$ cm, on trouve $\Delta\beta = 5.52^\circ$ et $\Delta F = 17.1$ N (3.8 lbs). La force transversale ΔF à appliquer et la déflexion résultante Δh paraissent acceptables.

La même approche peut être appliquée à la corde do_5 (corde en laiton) dont les caractéristiques sont :

$$L = 35 \text{ cm}$$

$$l = 5 \text{ cm}$$

$$l' = 10 \text{ cm}$$

$$L_t = L + l + l' = 50 \text{ cm}$$

$$d = 0.23 \text{ mm}$$

$$A = 4.155 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

$$E = 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 8400 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = (8400)(4.155 \times 10^{-8}) = 0.000349 \text{ kg/m}$$

$$f_1 = 523.26 \text{ Hz}$$

(do_5 tempéré)

L'équation (2) donne :

$$T = \mu (2L)^2 f^2 = 0.0001701 \text{ Hz} \quad (22)$$

d'où :

$$T_1 = 46.82 \text{ N}$$

Pour un accroissement de fréquence correspondant à 50¢, on détermine à l'aide de l'équation (4) la nouvelle fréquence à obtenir : $f = 538.59 \text{ Hz}$. La tension nécessaire est obtenue de l'équation (22) : $T_2 = 49.61 \text{ N}$, ce qui donne :

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 2.79 \text{ N}$$

Des équations (19), (20) et (21), on trouve $\Delta h = 2.55 \text{ mm}$, $\Delta\beta = 1.95^\circ$ et $\Delta F = 3.37 \text{ N}$ (0.75 lb). Dans le cas où $l = 5 \text{ cm}$, on trouve $\Delta h = 1.32 \text{ mm}$, $\Delta\beta = 3.02^\circ$ et $\Delta F = 5.22 \text{ N}$ (1.17 lb). De même que pour le cas précédent du do_4 , la force transversale et la déflexion sont acceptables et il semble possible a priori d'utiliser des actionneurs contrôlés par rétroaction qui puissent augmenter la tension de la corde au niveau souhaité.

Dans le cas où la force ΔF est appliquée à un point quelconque le long de l , nous obtenons les relations suivantes entre Δh et Δe_1 et Δe_2 :

$$\Delta h = 2 l_1 \Delta e_1 + \Delta e_1^2 \quad (23a,b)$$

$$\Delta h = 2 l_2 \Delta e_2 + \Delta e_2^2$$

Comme Δe_1 et Δe_2 sont des quantités petites, on néglige les termes au carré et on trouve :

$$\Delta e = \Delta e_1 + \Delta e_2 = \Delta h^2(1/l_1 + 1/l_2)/2 \quad (24)$$

et finalement :

$$\Delta h^2 = 2 \left(\frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2} \right) \Delta e \quad (25)$$

Avec les équations (15) et (17), on trouve :

$$\Delta h^2 = 2 \left(\frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2} \right) \frac{L_t}{AE} \Delta T \quad (26)$$

Les angles $\Delta\beta_1$ et $\Delta\beta_2$ (voir figure 6) peuvent ensuite être calculés :

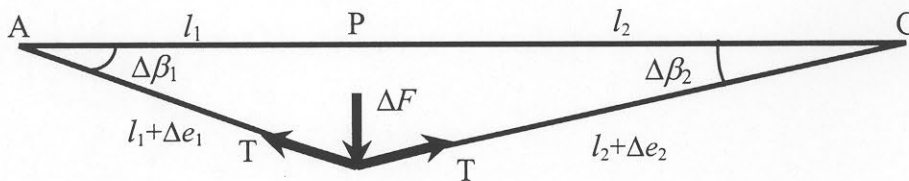


Figure 6 - Équilibre des forces; point P arbitraire

$$\tan \beta_1 = \Delta h / l_1 \quad \tan \beta_2 = \Delta h / l_2 \quad (27a,b)$$

La force à appliquer est obtenue de l'expression suivante :

$$\Delta F = T (\sin \beta_1 + \sin \beta_2) \quad (28)$$

9. Choix des actionneurs

Les caractéristiques des actionneurs dépendent de la façon dont on prévoit les utiliser, soit pour produire une déflexion de la corde (figure 1b), soit pour une action directe (figure 3a), soit pour une action indirecte (figures 3b, 3c).

Forces et déplacements impliqués

Dans le cas de la déflexion, un changement de fréquence de 50¢ nécessite une force relativement petite, de l'ordre de 9 N mais un déplacement du bras de l'actuateur relativement important de l'ordre de 10 mm.

Dans le cas d'une action directe, la force devient importante, de l'ordre de 90 N et le déplacement requis n'est que de 5 mm à partir d'une corde non tendue. Une augmentation de fréquence de 50¢ fait passer la tension de la corde de 84.2 N à 89.2 N pour la corde do_4 . Cette différence de tension correspond à un déplacement du bras de l'actionneur de 0.5mm. Un contrôle de 1 fréquence au cent (¢) près nécessite un contrôle du déplacement de l'ordre de 0.005mm (.0002 po.).

Dans le cas d'une action indirecte, le choix approprié de l'emplacement du pivot sur le levier (figure 3b) ou celui du rapport diamètre de la cheville/ bras de levier (figure 3c) permet d'obtenir des forces et déplacements intermédiaires par rapport aux deux cas précédents.

Autres critères de sélection

L'actionneur devrait en outre fonctionner sur le principe d'une vis sans fin de sorte qu'une fois la tension adéquate de la corde obtenue, l'alimentation en courant électrique de l'actionneur puisse être interrompue sans que la position atteinte soit changée. De plus le mouvement doit être réversible et les incréments de déplacement suite à une impulsion électrique doivent suffisamment petits. Par ailleurs, le temps requis par l'actionneur pour un déplacement donné a une importance secondaire, étant donné que suffisamment de temps, impliquant même quelques minutes, peut être alloué pour l'accordage des 180 cordes du clavecin.

Un type d'actionneur qui se rapproche des critères recherchés est le Bristol SG B2. Cet actionneur développe jusqu' 176 N avec une course, soit de 13 mm, soit de 17.5 mm soit de 26.6 mm. Le bras se verrouille en position lorsque l'alimentation est interrompue. Il se vend 52.78 \$US l'unité lorsque acheté en grand nombre.

Un autre type d'actionneur possible est le HSI 20000 Series produit par la compagnie Haydon Switch & Instrument Inc. C'est un actionneur linéaire captif d'un poids de 28gr (1once) ayant une course de 20 mm avec moteur pas à pas (stepping motor) donnant un incrément linéaire de 0.0254 mm (0.001 po.). Le choix d'un bras de levier approprié (figures 3b et 3c) permettrait un ajustement au cent près.

10. Choix d'un excitateur- détecteur de fréquence

La fréquence fondamentale de vibration de chacune des cordes doit en premier lieu être détectée avant de déterminer la correction nécessaire qui éventuellement sera transmise à l'actionneur. Il faut donc un système générant une vibration de la corde. Dans le cas d'une corde d'acier, une impulsion électrique dans un électro-aimant à proximité de la corde devrait suffire à générer une vibration. L'amplitude de la vibration peut être faible c'est-à-dire juste suffisante pour générer un signal dans un capteur. Ce dernier ne doit pas être un microphone à cause de l'interférence des nombreuses autres cordes générant des fréquences différentes dans l'air. La détection de la fréquence peut être basée sur les fluctuations de champ magnétique causées par la vibration de la corde d'acier. La compagnie QRS Story & Clark emploie cette technique dans son projet de piano avec accordage automatisé. Dans le cas d'une corde de laiton, il est possible d'entourer la corde d'un manchon d'acier sur une courte longueur, à l'endroit où se trouve l'excitateur-détecteur de fréquence.

11. Système d'asservissement

Le système d'asservissement comporte les fonctions suivantes pour chacune des cordes :

1. digitalisation du signal détecté;
2. calcul de la fréquence fondamentale par autocorrélation ;
3. comparaison avec la fréquence mémorisée d'un tempérament donné ;
4. détermination du nombre d'impulsions à envoyer au moteur pas à pas de l'actionneur ;
5. rétroaction nécessitée par les impondérables, c'est-à-dire répétition des étapes jusqu'à obtention de la fréquence désirée.

12. Asservissement en temps réel

La rapidité des microcircuits électroniques et le temps de réponse des actionneurs actuels rend possible un ajustement microtonal en temps réel. Le signal provenant de la vibration des cordes durant l'exécution d'une œuvre peut être analysé par le biais d'un microcircuit et la consonance optimisée à la manière dont le font les instrumentistes professionnels sur des instruments qui ne sont pas à frettes, comme par exemple la famille des violons ou même celle des instruments vents, cuivres, bois. L'analyse de la consonance par ordinateur ne demande qu'une fraction infime de seconde. La vitesse de réponse des actionneurs devient alors un critère important. Il s'agit ici d'une possibilité encore plus ambitieuse que l'accordage automatisé qui rendrait inutile l'accordage préalable selon un tempérament donné. Un code numérique déterminant le degré de consonance et basé sur les travaux de Sethares (1999) a déjà été développé par l'auteur de ce rapport.

13. Conclusion

L'accordage par chauffage électrique avec rétroaction présente l'avantage de ne comporter aucune partie mécanique. De plus, par comparaison avec le piano, la finesse des cordes du clavecin requiert un ampérage moins important. Enfin la puissance électrique totale requise pour le clavecin est moindre que pour le piano à cause du nombre plus restreint de cordes.

Une difficulté potentielle que présente le chauffage électrique des cordes est le maintien précis de la fréquence désirée. La dissipation continue de chaleur risque d'augmenter graduellement la température de l'air ambiant, ce dernier étant partiellement confiné par la table d'harmonie et les parois latérales. Il est à craindre que l'équilibre thermique final ne soit atteint qu'après un laps de temps pouvant durer plusieurs minutes. La puissance électrique particulière à chaque corde telle qu'établie lors de l'accordage automatisé, lequel ne dure que quelques dizaines de secondes, ne pourrait être maintenue telle quelle sous peine d'accroître avec le temps la température de l'air ambiant et, ce partant, de l'ensemble des cordes au-delà de la valeur désirée. Pour pallier ce problème ou en tout cas le réduire, il faudrait possiblement prévoir un système qui assure la circulation de l'air. Une aération appropriée permettrait en outre de contrer l'interaction thermique des cordes, lesquelles comportent des températures différentes les unes des autres.

Une autre difficulté potentielle associée au chauffage est l'augmentation de chaleur dissipée par la corde lors de sa vibration, et ce, dans des proportions qu'il est difficile d'évaluer. Sa température est alors diminuée avec comme conséquence une augmentation de sa fréquence.

Dans le cas de la déflexion de la corde par actionneur, le système de détection de la fréquence demeure le même que pour le chauffage électrique et le microcircuit électronique déterminant la rétroaction ne représente a priori pas plus de difficulté. Les problèmes potentiels associés à la dissipation d'énergie sous forme de chaleur sont absents, à la condition d'utiliser un actionneur approprié, ce dernier devant être capable de fournir une force maximale de 2 lbs (~9N) avec un déplacement maximum de 10 mm. Par ailleurs, au lieu du système de filage servant à l'alimentation électrique pour le chauffage, il faut prévoir la mise en place d'actionneurs multiples (180 actionneurs, c'est-à-dire un par corde) et leur alimentation individuelle en courant électrique.

Bibliographie

Asselin, P. Y., "Musique et tempérament", Editions Jobert, 1985.

Benade, A. H., "Fundamentals of Musical Acoustics", Second Revised Edition, Dover Publications, 1990.

Bejan, A., "Heat Transfer", John Wiley & Sons Inc., 1993

Crandall, S. H., Dahl, N. C. and Lardner, T. J., "An Introduction to Mechanics of Solids", Second Edition, McGraw-Hill, 1978.

Gilmore, D. A. "In Pursuit of the Self-Tuned Piano", <http://www.qrsmusic.com/Press/pr02032501.htm>

QRS Music technologies News, "To Develop Self-Tuning Piano System", <http://www.qrsmusic.com/press/pr02022401.htm>

Sethares, W. A., "Tuning, Timbre, Spectrum, Scale" Springer, 1999

Valette, C. et Cuesta, C., "Mécanique de la corde vibrante", Hermès, Paris, 1993.

Weast, R. C., "Handbook of Chemistry and Physics", The Chemical Rubber Company (CRC), 1971.

Annexe 1: Graphiques

Un programme Fortran basé sur les équations (1) à (28) et donné à l'annexe 2 a été conçu pour obtenir des résultats théoriques sous forme de graphiques.

Dans le cas de la corde sol_3 ayant pour caractéristiques :

$$L = 88.5 \text{ mm}; \quad l = 5 \text{ cm}; \quad l' = 20 \text{ cm}; \quad d = 0.254 \text{ mm (0.01 po.)} \quad f = 195.9977 \text{ hz}$$

$$\text{acier : } E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2; \quad \rho = 7800 \text{ kg/m}^3; \quad \alpha = 10^{-5} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}; \quad R/L_t = 0.0123 \text{ ohm/cm}$$

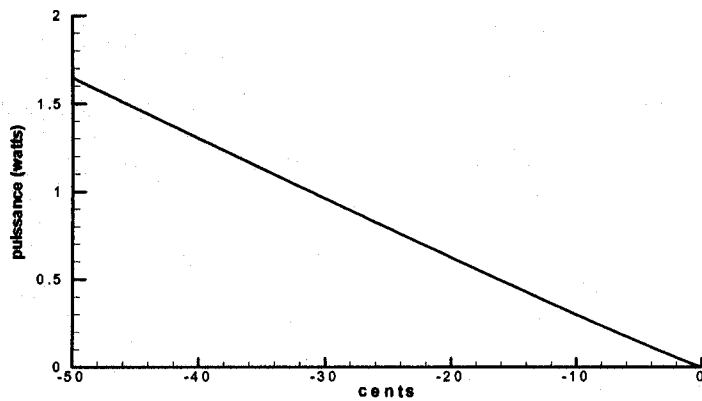
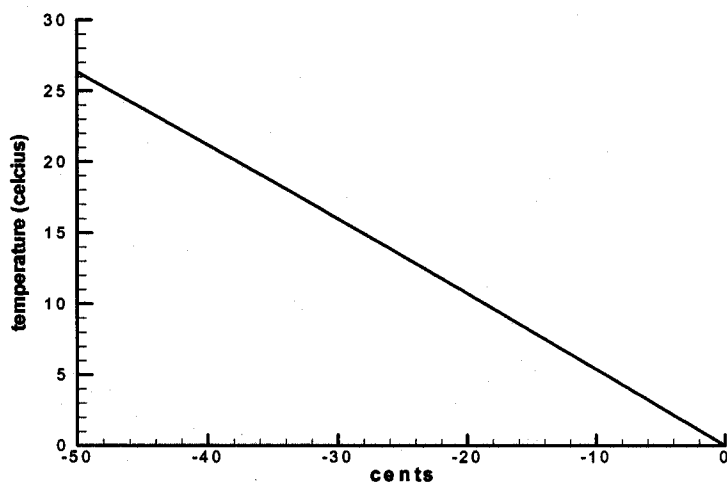
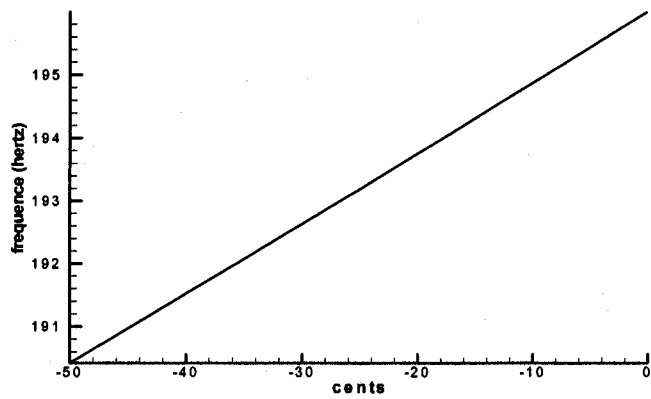
des graphiques ont été obtenus pour des écarts de fréquence allant jusqu'à -50ϕ .

L'interprétation des graphiques est la suivante. Dans le cas du chauffage par courant électrique, considérons le graphique au bas de la page 21. Si on suppose la corde à 0ϕ (valeur en abscisse) et qu'on veuille décroître la fréquence de 25ϕ , il faut alors fournir une puissance de ~ 0.8 watts (valeur en ordonnée correspondant à -25 sur l'abscisse). Dans le cas de la déflexion de la corde, considérons le graphique du bas de la page 23. Si la fréquence est de 25ϕ plus basse que la valeur désirée (0ϕ), il faut alors faire intervenir une force normale de ~ 0.64 lbs (valeur en ordonnée correspondant à -25 sur l'abscisse).

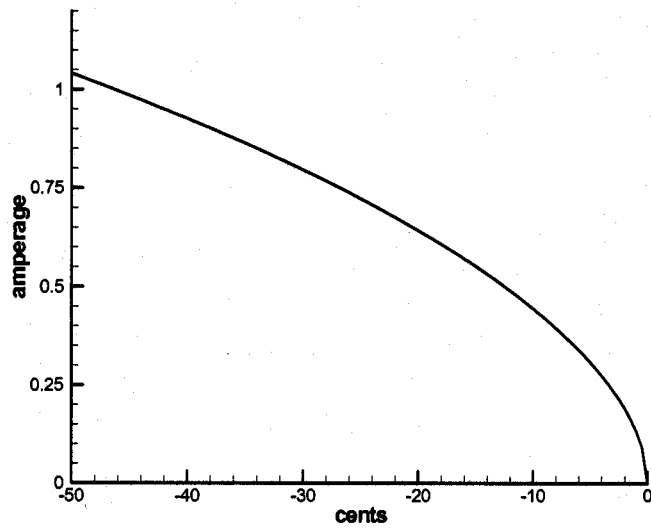
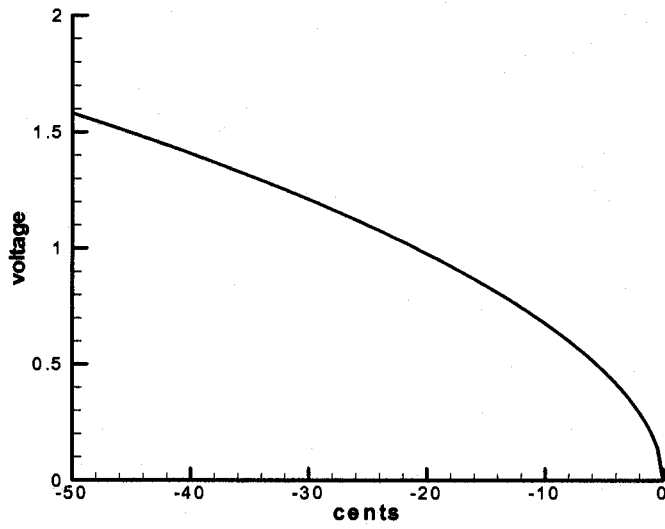
Les écarts de fréquence étant faibles, on obtient une variation presque linéaire de certaines quantités sur les graphiques comme ceux donnant la température et la puissance dissipée ; les autres quantités suivent une évolution quasi-parabolique.

Quelques mesures expérimentales très sommaires ont été faites pour connaître la force normale et la déflexion résultante nécessaires pour augmenter dans une certaine proportion (mesurée en cents) la fréquence. La corde sol_3 ayant les caractéristiques données précédemment a servi à cet effet. Ces valeurs expérimentales sont reproduites sur certains des graphiques suivants.

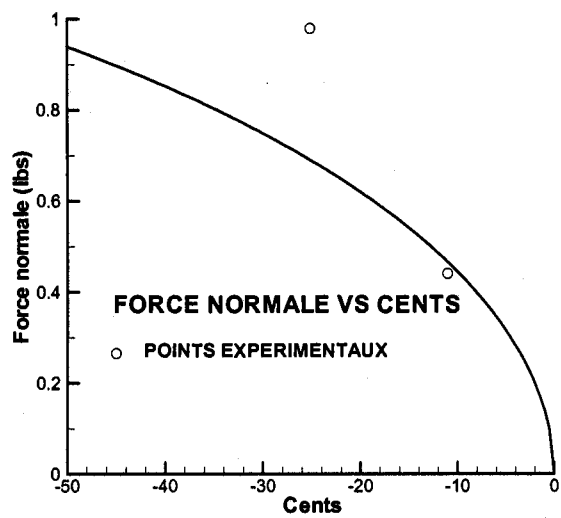
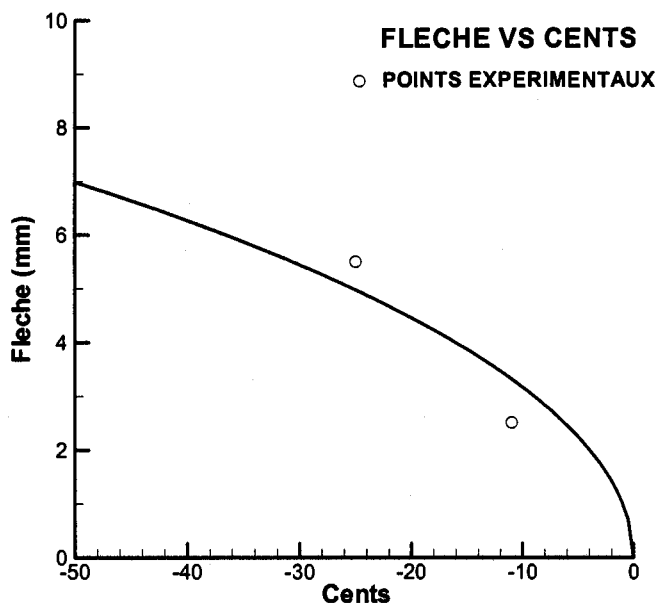
La dernière série de graphiques théoriques de cet annexe concerne la corde do_4 du piano dont les caractéristiques sont données à l'article 5 du présent rapport.



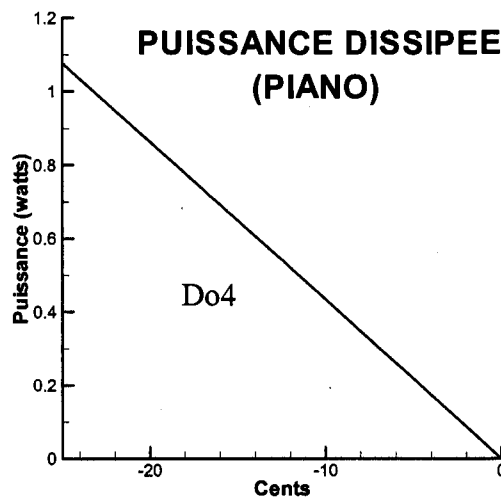
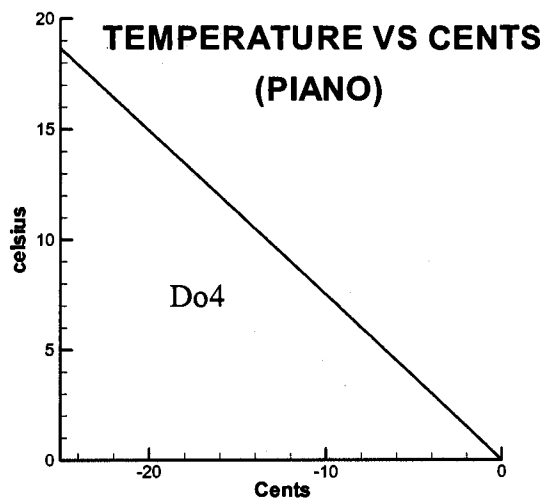
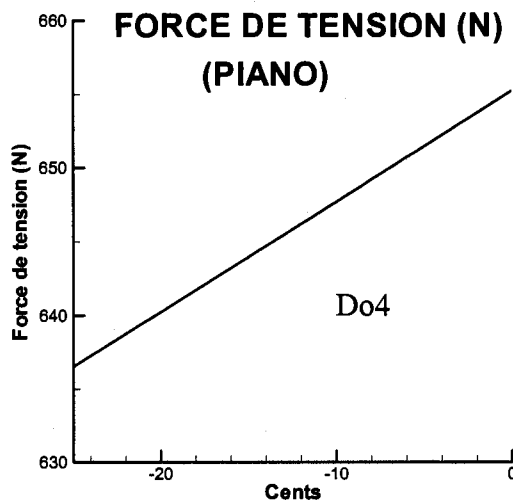
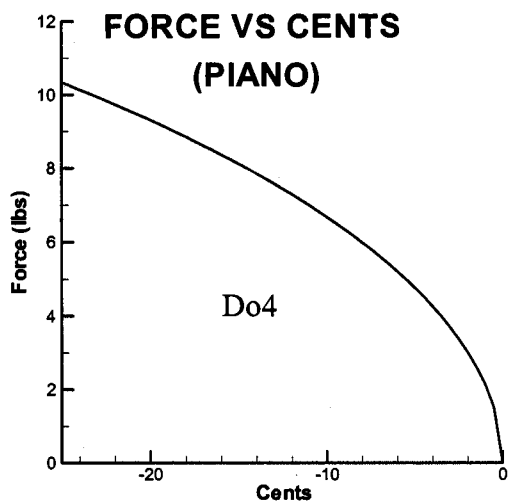
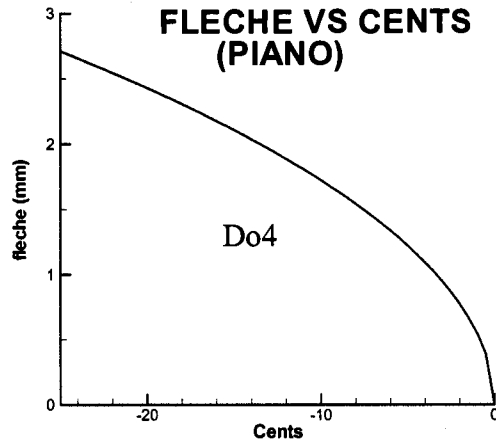
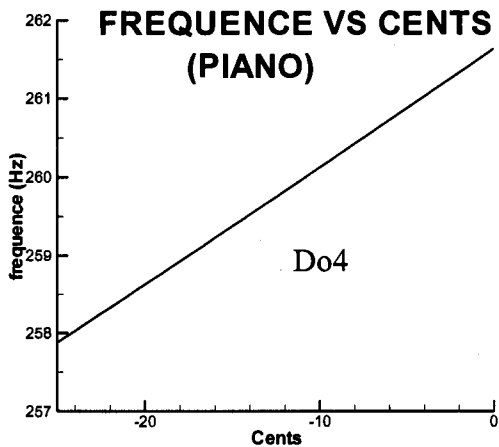
Courbes théoriques pour la corde sol_3 du clavecin



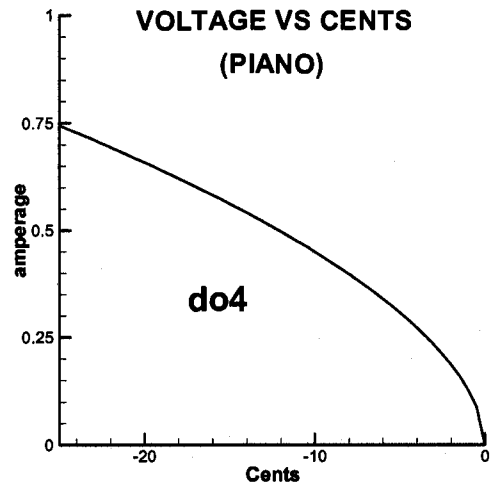
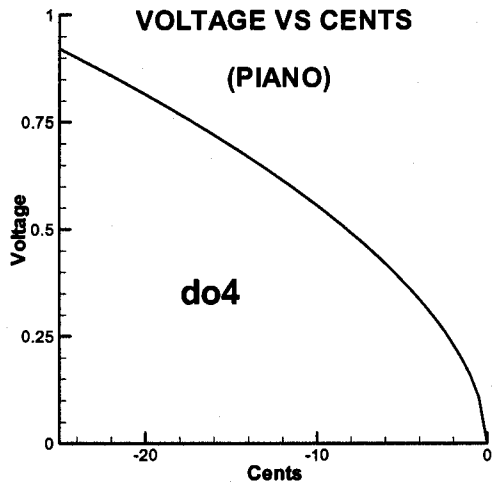
Courbes théoriques pour la corde sol_3 du clavecin (suite)



Courbes théoriques pour la corde *sol*₃ du clavecin (suite)



Courbes théoriques pour la corde do_4 du piano



courbes théoriques pour la corde do_4 du piano (suite)

Annexe 2: Programme Fortran

AUTOMATIZED CONTROL OF FREQUENCY FOR HARPSICHORD STRING

VOLTAGE VS CENTS
FORCE/DEFLECTION VS CENTS

DEFINITIONS

XL:	VIBRATING LENGTH OF STRING	(M)
XLAC:	LENGTH BETWEEN TUNING PIN AND CAPO D'ASTRO	(M)
XLDB:	LENGTH BETWEEN BRIDGE AND PIN	(M)
RP:	FRACTION OF LENGTH FOR POSITION OF NORMAL FORCE DFN	
XSL:	LENGTH USED FOR DEEFLECTION	(M)
XL1:	POSITION FOR NORMAL FORCE	(M)
XL2:	XSL-XL1	(M)
D:	DIAMETER	(M)
A:	CROSS AREA	(M**2)
AI:	INTERFACE STRING/AIR	(M**2)
XF:	FREQUENCY	(HZ)
E:	MODULUS OF ELASTICITY	(N/M**2)
RHO:	DENSITY	(KG/M**3)
ALP:	THERMAL EXPANSION COEFFICIENT	(1/CELSIUS)
RL:	ELECTRICAL RESISTANCE PER UNIT LENGTH	(OHM/M)
R:	ELECTRICAL RESISTANCE	(OHM)
RCOEF:	COEFFICIENT FOR AIR IN RAYLEIGH NUMBER (INCLUDES GRAVITY, KIN. VISC., THERM. DIFF. AND THERM. EXP. COEFF.)	(1/(K.M**3))
PR:	PRANDTL NUMBER FOR AIR	
XK:	THERMAL CONDUCTIVITY	(WATT/(M.S))
XMU:	LINEAR DENSITY	(KG/M)
C:	CENTS	
T:	TENSILE FORCE	(N)
TETA:	TEMPERATURE	(CELSIUS)
RA:	RAYLEIGH NUMBER	
XNU:	NUSSELT NUMBER	
XQ:	HEAT REJECTED BY UNIT AREA	(WATT/M**2)
P:	HEAT REJECTED	(WATT)
V:	VOLTAGE	(VOLT)
XI:	ELECTRICAL CURRENT	(AMPERE)
DE:	ELONGATION	(MM)
DH:	SAG	(MM)
DBETA1:	DEFLECTION ANGLE	(DEGREES)
DBETA2:	DEFLECTION ANGLE	(DEGREES)
DFN:	NORMAL FORCE	(N)
DFL:	NORMAL FORCE	(LB)

DIMENSION C(200),XF2(200),RA(200),XNU(200),DT(200)
DIMENSION T2(200),DTETA(200),P(200),V(200),XI(200)
DIMENSION DE(200),DH(200),DBETA1(200),DBETA2(200),DFN(200)
DIMENSION DFL(200)

OPEN(1,FILE='TEST.DAT', STATUS='UNKNOWN')
OPEN(4,FILE='HEAT.PLT', STATUS='UNKNOWN')
OPEN(5,FILE='FORCE.PLT', STATUS='UNKNOWN')

PI=3.141592654

AIR PROPERTIES

PR=0.72
RCOEF=90.7
XK=0.026

STRING GEOMETRY AND FREQUENCY

```

C      XF=261.6256
C      XF=523.2512
C      XF=195.997
      XL=0.625
      XLAC=0.05
      XLDB=0.15
      RP=0.5
      D=0.001
C
      XLT=XL+XLAC+XLDB
      DCM=D*100.
      A=PI*D*D/4.
      AI=PI*D*XLT
      XSL=XLDB
      XL1=XSL*RP
      XL2=XSL-XL1
C
C      MATERIAL PROPERTIES
C
      E=2.0 E11
      RHO=7800
      ALP=1.E-5
      RL=1.5
C
      XMU=RHO*A
      R=RL*XLT
C
C      COEFFICIENTS ENTERING THE EQUATIONS
C
      CT=XMU*4.*XL*XL
      CTETA=1./(ALP*E*A)
      CNU=0.387/((1.+((0.559/PR)**0.5625))**0.296296)
C
C      BEGINNING OF COMPUTATION
C
      XF1=XF
      XF2(1)=XF1
      T1=CT*XF1*XF1
      DTETA(1)=0.
      T2(1)=T1
      DT(1)=0.
      RA(1)=0.
      XNU(1)=0.
      P(1)=0.
      V(1)=0.
      XI(1)=0.
      DE(1)=0.
      DH(1)=0.
      DBETA1(1)=0.
      DBETA2(1)=0.
      DFN(1)=0.
      DFL(1)=0.
      C(1)=0
      DC=-0.5
      N=50
      N1=N+1
C
C      LOOP
C
      DO 1 I=2,N1
      C(I)=C(I-1)+DC
      XF2(I)=XF1*EXP(C(I)/1731.234049)
      T2(I)=CT*XF2(I)*XF2(I)
      DT(I)=ABS(T2(I)-T1)
C
C      COMPUTATION RELATED TO HEATING
C
      DTETA(I)=CTETA*DT(I)
      RA(I)=RCOEF*DTETA(I)*DCM*DCM*DCM
      XNU(I)=(0.6+CNU*(RA(I)**0.1666667))**2
      XQ=XNU(I)*DTETA(I)*XK/D
      P(I)=XQ*AI
C

```



```

V(I)=SQRT(P(I)*R)
XI(I)=V(I)/R
C
C
C
COMPUTATION RELATED TO DEFLECTION
DH(I)=SQRT(2.*DT(I)*XL*XL1*XL2/(A*E*(XL1+XL2)))
DE(I)=DH(I)*DH(I)*(XL1+XL2)/(2.*XL1*XL2)
DB1=ATAN(DH(I)/XL1)
DB2=ATAN(DH(I)/XL2)
DBETA1(I)=DB1*180./PI
DBETA2(I)=DB2*180./PI
DH(I)=DH(I)*1000.
DE(I)=DE(I)*1000.
DFN(I)=T2(I)*(SIN(DB1)+SIN(DB2))
DFL(I)=DFN(I)/4.4482
1 CONTINUE
C
C
C
DATA
PRINT *, ' CENTS DT DTETA RA XNU P
1 V XI'
DO 2 I=1,N1
2 WRITE(*,101) C(I),DT(I),DTETA(I),RA(I),XNU(I),P(I),V(I),XI(I)
101 FORMAT(F7.2,1X,F9.4,1X,F9.4,1X,F9.4,1X,F9.4,1X,F9.4,1X,
1 F9.4)
C
WRITE(*,102)
102 FORMAT(//)
PRINT *, ' CENTS DT DE DH DBETA1 DBETA2
1 DFN DFL'
DO 3 I=1,N1
3 WRITE(*,103) C(I),DT(I),DE(I),DH(I),DBETA1(I),DBETA2(I),DFN(I),
1 DFL(I)
103 FORMAT(F7.2,1X,F9.4,1X,F9.4,1X,F9.4,1X,F9.4,1X,F9.4,1X,
1 F9.4)
C
WRITE (1,200) XF1,D,XL,XLAC,XLDB,RP,E,RHO,ALP,RL
WRITE (6,200) XF1,D,XL,XLAC,XLDB,RP,E,RHO,ALP,RL
200 FORMAT(' XF1 =',F10.4,/, ' D =',F9.5,/, ' XL =',F9.4,/,
1 ' XLAC =',F9.4,/, ' XLDB =',F9.4,/, ' RP =',F9.4,/,
1 ' E =',E12.4,/, ' RHO =',F9.2,/, ' ALP =',E12.4,/,
1 ' RL =',F9.4)
C
WRITE(4,300)XF1,D,XL
WRITE(5,301)XF1,D,XL
C 300 FORMAT(' XF1 =',F10.4,' D =',F10.5,' XL =',F10.4,/, ' CENTS',
C 1 ' DT',' DTETA',' RA',' XNU',' P ',' V',' XI')
C 301 FORMAT(' XF1 =',F10.4,' D =',F10.5,' XL =',F10.4,/, ' CENTS',
C 1 ' DT',' DE ',' DH','DBETA1','DBETA2','DFN')
DO5 I=1,N1
WRITE (4,302) C(I),XF2(I),T2(I),DT(I),DTETA(I),RA(I),XNU(I),P(I),
1 V(I),XI(I)
WRITE (5,303) C(I),XF2(I),T2(I),DT(I),DE(I),DH(I),DBETA1(I),
1 DBETA2(I),DFN(I),DFL(I)
5 CONTINUE
302 FORMAT(F9.4,F9.4,F9.4,F9.4,F9.4,F9.4,F9.4,F9.4,F9.4,F9.4)
303 FORMAT(F9.4,F9.4,F9.4,F9.5,F9.4,F9.4,F9.4,F9.4,F9.4,F9.4)
END

```

Annexe 3: Point de vue de l'artiste

Projet de recherche sur les paramètres acoustiques du clavecin

- Sujet de recherche depuis 1985
- Le cas Delin-Jobin et l'expérience empirique
- Les types de son des diverses écoles de facture de clavecin
- Précision de la terminologie dans la qualification des types de timbre
- Vertus recherchées (cas Hill)
- Problèmes d'équilibre entre registres selon la distance
- Les phénomènes de tension/détente selon le tempérament
- Les partenaires
- Perspectives

Le point de vue du musicien

Les paramètres acoustiques du clavecin sont au centre de mes préoccupations de recherche depuis le début de ma carrière universitaire. En effet, déjà en 1975, je m'adonnais à la facture de clavecin dans le double but de disposer d'instruments adéquats pour interpréter les divers répertoires que je fréquentais et pour faire avancer la connaissance des styles historiques. J'ai construit entre 1975 et 1985 une douzaine de clavecins, d'abord à partir de kits mais en m'en détachant graduellement, de manière à expérimenter avec les caractéristiques sonores des instruments. Cette démarche a abouti à une recherche approfondie, au cours de mon année sabbatique en 1985-1986, donnant lieu à l'élaboration d'un prototype de clavecin « idéal » pour jouer Bach. Phénomène étonnant, cela a concorde avec la mise au jour d'une découverte capitale de William Dowd, avec qui j'avais d'excellents rapports, d'un instrument du facteur Mietke qui pourrait être un des facteurs de prédilection de Bach. Ma démarche était cependant trop avancée pour que ce phénomène n'oriente ma recherche et les preuves étaient alors insuffisantes.

En fait, l'instrument qui m'a donné un véritable choc est l'œuvre du facteur parisien Jobin, alors membre du consortium Les Tempéraments inégaux, qui avait réalisé un instrument inspiré du clavecin Delin de Kenneth Gilbert, instrument que je connaissais bien déjà. Bel exemple d'émulation, la copie surpassait l'original! Hélas, je n'avais pas, à ce moment-là, les moyens de passer la commande pour un tel instrument, mais le désir d'en posséder un était extrêmement fort, tant cet instrument représentait pour moi un idéal pour interpréter Bach, mon compositeur de prédilection. J'ai continué de me documenter, d'observer de très près nombre d'instruments, d'étudier tous les plans disponibles d'instruments allemands de cette époque. Finalement, pouvant profiter d'un congé sabbatique, j'ai réalisé, à partir de toute la documentation accumulée, un instrument de mon crû qui alliait tous les paramètres qui m'avaient semblé aller dans la direction que je souhaitais. En étroite collaboration avec le facteur Yves Beaupré, j'ai dessiné et produit un clavecin spécifiquement dédié à rendre la musique de Bach. Le manque de documentation de l'époque et l'insatisfaction générée quant aux instruments disponibles m'imposaient une telle démarche. Le résultat a été plus qu'heureux, car jamais je n'avais eu la chance de rendre la clarté

polyphonique souhaitée avec autant de bonheur. J'ai du reste, au cours de cette année 1985-1986, réalisé un enregistrement complet du Clavier bien tempéré (48 préludes et fugues) de J.S. Bach sur cet instrument qui s'est avéré totalement convaincant. Je suis flatté qu'encore aujourd'hui le facteur américain Willard Martin, pour qui j'ai la plus haute estime, et des clavecinistes tels Olivier Fortin et Skip Sempé considèrent cet instrument comme une réalisation exceptionnelle.

Le projet de recherche actuel, suscité par le professeur Luc Robillard, touche donc à ma fibre sensible. Fort d'une réalisation qui m'apparaît réussie, je suis néanmoins conscient que nombre de paramètres gagneraient à être mieux compris. Le contrôle des paramètres acoustiques du clavecin demeure un objet pouvant donner lieu à de nombreux aspects de recherche. Les maîtres anciens ont compris beaucoup de choses, mais il reste énormément de paramètres à maîtriser. Je suis donc tout à fait disponible pour m'impliquer dans une démarche visant à mieux cerner les éléments qui permettront l'évolution de la connaissance en ce domaine. Jusqu'ici, mes principales réalisations en recherche ont été centrées sur un type de sonorité qui rende justice à l'interprétation de la musique de Bach, mais jamais je ne me suis arrêté à ce seul répertoire. J'ai, tout au long de ma carrière, embrassé les répertoires anglais, italien, espagnol, français et allemand, en recherchant toujours l'instrument apte à mieux desservir leur saveur propre. Le champ de recherche est donc très vaste pour l'avenir. J'ai trouvé des solutions satisfaisantes mais pas nécessairement idéales, j'aimerais donc à ce moment-ci pousser plus loin la spécificité des sonorités requises.

Il est trop rare de pouvoir collaborer avec des scientifiques, pour un spécialiste de musique ancienne! Cette collaboration avec des chercheurs de premier plan et, qui plus est, des acteurs de tous les milieux concernés, pourrait s'avérer un avancement inespéré de la lutherie en ce 21^e siècle. Grâce aux recherches avancées en acoustique musicale, aux travaux d'ingénieurs dédiés, nous pourrions réaliser une œuvre grandiose alliant la science des maîtres anciens, les analyses des chercheurs de premier plan en acoustique musicale, les travaux des meilleurs ingénieurs, les réalisations des meilleurs acteurs de la facture instrumentale, le jugement critique de musiciens accomplis et arriver à un produit fini à l'avant-garde de tous les accomplissements dans le domaine. Le projet est très vaste, comme le clavecin ne se résume pas à un seul répertoire mais à plusieurs écoles de pensée. Il est nécessaire de considérer divers types de répertoire pour lesquels divers types d'instrument sont nécessaires.

Les avenues de recherche sont infiniment larges. Dans un premier temps, il nous faudra délimiter les paramètres terminologiques. De fait, que recherche-t-on dans l'élaboration d'un type d'instrument? Tout dépend du répertoire qu'on veut desservir. Il existe, historiquement, divers types d'instrument. Mais comment qualifie-t-on chaque type d'instrument? À l'aide d'analyses spectrales, nous pourrions tenter de définir les qualificatifs qui conviennent. Nous pourrions également qualifier les vertus nécessaires au type d'instrument apte à desservir chaque répertoire.

Ce projet de départ laisse espérer de nombreuses autres avenues de recherche alliant l'artiste et le scientifique pour couvrir un ensemble de problématiques. Je citerai quelques exemples qui suscitent un vif intérêt : comment concilier un son agréable de près avec un son qui projette également dans un grand espace? Comment arriver à projeter également les divers registres de fréquence? Comment expliquer qu'un tempérament précis projette davantage qu'un autre dans un espace donné? Comment faire évoluer la facture instrumentale au 21^e siècle?

Le réseau de partenaires visés par ce projet me semble extrêmement porteur. Je crois que nous avons réunis des chercheurs de premier plan qui pourront réaliser des projets grandioses. En plus des objectifs immédiats de contrôle des paramètres acoustiques, auxquels figurent le contrôle de projection des fréquences, la définition de la terminologie et des réalisations d'instruments révolutionnaires par la compréhension des paramètres visés, de nombreuses avenues jusqu'ici inimaginables, telles le développement d'un système thermique de contrôle de l'accord adapté au tempérament souhaité, la projection égale des registres selon le vaisseau et d'innombrables autres préoccupations des musiciens voient enfin poindre des solutions tangibles.

Le musicien que je suis, dans ce contexte, aura pour tâche d'orienter les travaux vers des avenues qui serviront d'abord la musique, la facture instrumentale, et tout ce qui est susceptible de faire avancer la recherche dans des avenues qui desservent les problématiques instrumentales. Le musicien, avec ses oreilles, saura juger les résultats et nourrir les scientifiques de défis qui feront avancer l'une des plus fantastiques avenues de l'art, la lutherie des 17^e et 18^e siècles.

Réjean Poirier
Doyen et professeur titulaire
Faculté de musique
Université de Montréal

