



*Le Violoncelle  
&  
Le Loup*

**Une Histoire d'Acoustique**

Virgilio Lehmann  
Professeur: Th. Progin

Date: 15 Décembre 2003

## **RÉSUMÉ**

Ce travail a pour sujet d'étude le loup, une anomalie du son qui peut perturber certaines fréquences des instruments à cordes frottées. Ce phénomène, qui touche en particulier le violoncelle, est le résultat d'un dysfonctionnement des transferts d'énergie au sein de l'instrument dû à la présence d'une forte résonance de son corps à certaines fréquences. Cette résonance vient interférer avec la vibration de la corde et modifie l'impédance du chevalet. Le système génère alors une série de composants hétérodynes qui, en s'additionnant, viennent périodiquement renforcer les harmoniques impaires du fondamental.

Afin d'arriver à cette conclusion, quelques notions d'acoustique sont tout d'abord définies, puis les noms et les rôles des différentes parties du violoncelle sont énoncés, avant que le fonctionnement normal de l'instrument soit décrit. Les raisons qui fondent la forte propension du violoncelle à être doté d'un loup sont ensuite développées parallèlement à l'explication du phénomène du loup lui-même et à l'énumération des moyens qui existent pour le supprimer.

# TABLE DES MATIÈRES

## INTRODUCTION p.4

## 1. QUELQUES NOTIONS D'ACOUSTIQUE p.5

1. Introduction p.5
2. Les ondes p.5
3. Le son : une superposition d'onde sinusoïdales p.6
4. Battements p.7
5. Harmoniques et modes p.7
6. Impédance d'onde p.8
7. Résonance p.8
8. Composants hétérodynes p.9

## 2. DESCRIPTION SOMMAIRE DE LA STRUCTURE DU VIOLONCELLE p.10

1. Introduction p.10
2. L'archet p.11
3. Le système oscillant p.11
4. Le chevalet p.11
5. La caisse de résonance p.12
6. Conclusion p.12

## 3. RELATIONS ÉNERGÉTIQUES ET TRANSMISSION DU SON p.13

1. Introduction p.13
2. Du bras à l'archet p.13
3. De l'archet à la corde p.14
4. De la corde à la caisse de résonance: un système d'oscillateurs couplés p.15
5. De l'instrument à l'air p.17

## 4. LE LOUP p.18

1. Expérience introductive p.18
2. Une variation des harmoniques impaires p.19
3. Pics de résonance et composants hétérodynes p.20
4. Oscillateurs couplés et variations d'impédances p.22
5. Une question de taille p.23
6. Suppression du loup p.23

## CONCLUSION p.25

## BILAN PERSONNEL p.26

## BIBLIOGRAPHIE & REMERCIEMENTS p.27

## ANNEXES p.A1

1. Historique du violoncelle p.A1
2. Schéma d'un violoncelle p.A4
3. Les notions de base d'acoustique p.A5
4. Tables p.A6

## INTRODUCTION

Le violoncelle est un instrument fascinant à bien des égards. La beauté de sa sonorité, si proche de la voix humaine, son répertoire varié et émouvant, ou même tout simplement sa forme gracieuse lui permettent de plaire à un grand nombre d'auditeurs.

Mais au-delà de ces simples caractéristiques extérieures, un autre monde tout aussi fascinant existe. Sa découverte n'est pas forcément immédiate, tant il est vrai que l'on peut jouer d'un instrument durant des années sans connaître son mécanisme interne exact. Cependant, la présence sur certains violoncelles d'un loup, une anomalie du son, peut inciter le musicien à s'intéresser de plus près à aux caractéristiques acoustiques de son instrument.

Dès lors, un cheminement graduel à travers les méandres de l'acoustique musicale s'impose. L'acquisition de connaissances de bases est essentielle, puisqu'elles conduisent à la compréhension du fonctionnement normal de l'instrument. Ces étapes permettent ensuite d'appréhender les dysfonctionnements potentiels du système, et plus particulièrement ceux qui gravitent autour du loup.

C'est donc à un véritable voyage à travers l'acoustique et le violoncelle que ce travail vous invite, dans le but final de lever quelque peu le voile sur le mystère du loup.

# 1. QUELQUES NOTIONS D'ACOUSTIQUE

## 1. Introduction

« L'objet de l'acoustique est l'étude de la perception sonore et de ses causes physiques » ([8], p.28). Essentiellement pratique, cette science possède cependant plusieurs bases physico-mathématiques solides. Celles-ci, quoique résultant des simplifications du réel par la physique ondulatoire, sont néanmoins indispensables à l'explication de situations concrètes.

Afin de ne pas surcharger la suite du travail, les définitions rudimentaires sont développées dans ce chapitre auquel on pourra se référer en cours de lecture.

## 2. Les ondes

La notion fondamentale de l'acoustique est l'*onde*, une perturbation qui se propage dans un milieu. Le son, tout comme la lumière ou les vagues par exemple, correspond dans son comportement à cette définition.

Deux types d'ondes suffisent à décrire l'ensemble de ces phénomènes: les ondes dites *longitudinales* qui traduisent un mouvement des particules (dans un fluide ou un solide) dans le sens de propagation de l'onde, et les ondes *transversales* (uniquement dans les solides), lorsque le déplacement est dans un plan perpendiculaire à la propagation des ondes.

Les différents paramètres du son sont la *longueur d'onde* ( $\lambda$ ), l'*amplitude* (A), la *période* (T), et la *fréquence* (F)<sup>1</sup>.

La fréquence du son détermine, pour l'oreille humaine la hauteur du son perçu<sup>2</sup>. A partir de là, les différents intervalles peuvent être assimilés à des multiples d'une fréquence donnée.

---

<sup>1</sup> Cf. Annexe3 pour les définitions de ces notions fondamentales.

<sup>2</sup> Cf. Annexe4 pour une table d'équivalence entre les fréquences et le nom des notes.

### **3. Le son : une superposition d'ondes sinusoïdales**

Les sons ne se limitent que rarement à une onde simple. Plus complexes, ils sont la résultante de deux ou plusieurs ondes qui s'additionnent.

A partir de cette constatation, le théorème de Fourier dit que « *tout signal périodique peut être décomposé en signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples de la fréquence du signal original* » ([1], p.4).

Ainsi, tout son complexe peut-être décomposé en un ensemble de sons purs (*les harmoniques*) dont les fréquences sont des multiples d'une fréquence de base (*la fondamentale*) qui détermine la hauteur du son :

$$\text{son fondamental : } f_1(x) = a_1 \cos(\omega x) + b_1 \sin(\omega x)$$

$$n^{\text{ième}} \text{ harmonique : } f_n(x) = a_n \cos(n\omega x) + b_n \sin(n\omega x), n \in \mathbb{N}$$

Cette relation permet alors de distinguer deux types d'harmoniques : des harmoniques *paires* qui correspondent aux valeurs de  $n$  paires, et des harmoniques *impaires* qui correspondent aux valeurs impaires.

Considérons alors un système qui, pour une raison quelconque, n'arriverait pas à exciter les composants impairs. On se retrouve dans une situation très intéressante, où seules les fréquences  $f_2, f_4, \dots$  sont présentes. On peut les écrire ainsi :

$$f_2 = 2 \cdot f_1 = 1 \cdot (2f_1)$$

$$f_4 = 4 \cdot f_1 = 2 \cdot (2f_1)$$

$$f_6 = 6 \cdot f_1 = 3 \cdot (2f_1)$$

etc.

Cela nous montre que notre nouveau groupe de fréquences est lui-même construit de multiples d'une nouvelle fréquence de base,  $2f_1$ . La vitesse de répétition est ainsi doublée. Ce son sera perçu comme étant une octave plus haut que celui originellement entendu. Nous découvrirons par la suite l'importance d'une telle situation lorsque nous essaierons d'expliquer le phénomène du loup<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Cf. Ch. 4.2, p.19

## 4. Battements

L'étude des relations entre plusieurs sons conduit aux constatations suivantes ([5], p.240) :

1. Lorsque deux forces sinusoïdales de fréquences voisines sont conduites à interagir avec un même objet, elles s'amplifient et se contrent l'une l'autre, simultanément à la synchronisation et à la désynchronisation de leur oscillation. Le phénomène d'accroissement et de diminution de l'amplitude de la vibration résultante est appelé *battement*.

2. Le phénomène de *pulsation* du battement se manifeste le plus souvent lorsque les deux forces ont une amplitude égale. On constate alors une alternance de la réponse sonore entre une totale disparition et une amplitude double.

3. De manière générale la fréquence de battement est égale à la différence des deux fréquences concernées ( $f_b = f_2 - f_1, f_2 > f_1$ )<sup>1</sup>.

## 5. Harmoniques et modes

Dans le cas d'une corde tendue entre deux points fixes, les harmoniques peuvent être interprétées comme les différents *modes* de vibration de la corde.

Lorsqu'une onde est produite sur cette corde, elle s'y propage jusqu'aux extrémités et s'y réfléchit. La superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie crée une onde stationnaire. Or les ondes stationnaires pouvant s'établir sur la corde sont soumises à une condition restrictive : les extrémités ne peuvent être que des *nœuds* (points qui ont un état de perturbation nul).

En revanche, le nombre de nœuds le long de la corde peut prendre n'importe quelle valeur entière. Ainsi, une corde peut vibrer selon plusieurs modes suivant le nombre de nœuds qu'elle admet. La distance entre deux nœuds consécutifs étant théoriquement d'une demi-longueur d'onde, la longueur de la corde doit être un nombre entier de demi-longueur d'ondes.

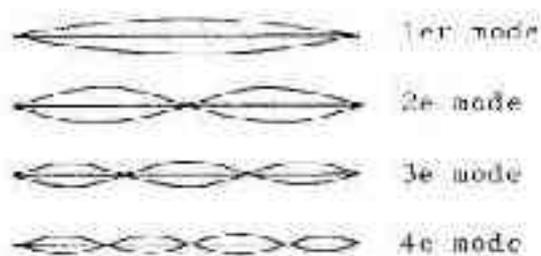


Fig. 1.1 : Modes d'une corde ([7], p.101)

<sup>1</sup> Cf. ([7], p.67-69) pour une justification de cette formule.

## **6. Impédance d'onde**

L'impédance est une mesure de la résistance d'un objet à vibrer, en d'autres termes, une mesure de la tendance de cet objet à rester immobile face à une force oscillante cherchant à l'exciter [9].

D'une manière générale, lorsqu'une perturbation est provoquée dans un milieu et se déplace jusqu'à sa frontière avec un autre milieu (par exemple depuis une corde assez mince jusqu'à une corde plus épaisse ou jusqu'à une caisse de résonance), une certaine partie de la perturbation est transmise dans le nouveau milieu, tandis que le reste est renvoyé vers le milieu d'origine.

L'amplitude des ondes renvoyées et la quantité d'énergie qui est transmise dépendent du rapport entre les impédances d'onde des deux milieux. Si les deux impédances sont très différentes, il y a une réflexion presque totale, tandis que deux impédances proches permettent un transfert presque total des ondes.

On peut la calculer suivant la formule:

$$\text{Impédance d'onde} = \sqrt{\text{inertie} \cdot \text{élasticité}} \text{ ([5], p.330)}$$

## **7. Résonance**

Quelle que soit la force avec laquelle on lance un pendule, celui-ci a tendance à adopter une certaine fréquence. C'est ce que l'on appelle la *fréquence propre* d'un corps<sup>1</sup>.

A partir de là, on peut définir la notion de *résonance* d'un corps sonore comme le « phénomène d'amplification du son qui se produit lorsque (ce) corps est soumis à une force vibratoire extérieure dont la fréquence est égale à la fréquence propre du corps sonore ou à ses multiples » ([8], p.37).

Cette fréquence atteinte, il suffit alors d'une force extrêmement faible pour mettre en mouvement le corps. Ainsi, deux cordes accordées à l'octave par exemple vibreront par sympathie lorsque l'une d'entre elles sera mise en mouvement.

---

<sup>1</sup> Elle peut d'ailleurs être facilement calculée selon la formule :  $f_p = 1/(2\pi \sqrt{I/K})$ , I moment d'inertie, et K le couple de rappel ([8], p.37).

## 8. Composants hétérodynes

Le son est le résultat de l'oscillation d'un système donné, excité par une force quelconque, qui perturbe un milieu (en principe l'air). Ainsi une simple barre métallique fixée en un point peut produire un certain son de par sa réaction à une force extérieure. Un système simple comme celui-là produira une onde sinusoïdale régulière. Cependant en modifiant légèrement le système, on peut le rendre *non linéaire*, c'est-à-dire créer une onde finale qui n'est pas simplement égale à la somme de ses parties.

Ces systèmes sont le résultat d'une relation non proportionnelle entre la réponse qu'ils génèrent et le stimulus qui les a mis en mouvement. Leur particularité est de créer ce que l'on appelle des *composants hétérodynes* lorsqu'ils sont soumis à des forces sinusoïdales. Ces composants sont le fruit des différents signaux générés.

Parmi une très grande classe de fréquences hétérodynes possibles, nous nous contenterons (pour simplifier) de tourner notre attention vers celles qui sont égales aux sommes et aux différences entre les fréquences des signaux appliqués, en incluant les doubles. A noter encore que les composants hétérodynes dépendent des amplitudes des signaux de départ. De forts composants originaux donnent naissance à de forts descendants hétérodynes, mais certains hétérodynes (particulièrement ceux associés à des effets neurologiques) ne disparaissent pas rapidement lorsque le stimulus est réduit.

Composants Originaux	Composants Hétérodynes Les Plus Simples	Prochains Composants Hétérodynes
P	(2P)	(3P)
	(P+Q), (P-Q)	(2P+Q), (2P-Q)
Q	(2Q)	(2Q+P), (2Q-P)
		(3Q)

**Tableau 1.1** : Relation entre les fréquences des composants hétérodynes simples ([5], p.256)

A noter que l'oreille possède la capacité de générer en elle de nouveaux composants hétérodynes en réponse à des signaux externes.

## 2. DESCRIPTION SOMMAIRE DE LA STRUCTURE DU VIOLONCELLE<sup>1</sup>

### 1. Introduction

Les formes des différents instruments à cordes frottées ne sont pas le fruit du hasard. Des générations de luthiers ont accumulé expériences et savoirs théoriques pour empiriquement développer violons, altos, violoncelles, et contrebasses<sup>2</sup>.

Mais si ces instruments appartiennent tous à une grande famille, il serait faux de simplement considérer le violoncelle comme un « grand violon », ou l'alto comme une « petite contrebasse ». D'autant plus que, alors que les deuxième (la4) et troisième (ré4) cordes du violon sont respectivement accordées en fonction de la *résonance primaire*<sup>3</sup> du *corps* (les parties en bois qui forment la caisse de résonance) et de la principale résonance de la colonne d'air enfermée, le violoncelle, par contre, a des résonances beaucoup plus grandes (environ 4 à 5 ½ tons plus haut) en relation avec la fréquence de ses cordes. Ainsi, ses composants réagissent acoustiquement de manière différente de ceux du violon<sup>4</sup>. On pourra d'ailleurs trouver dans cette différence la source de la propension chronique des violoncelles à être affectés par le loup.<sup>5</sup>

Il est donc important de concentrer notre étude sur le violoncelle lui-même. Il devient dès lors indispensable de se faire une idée concrète et détaillée de l'apparence globale de cet instrument, avant d'étudier ses caractéristiques acoustiques propres<sup>6</sup>.

### 2. L'archet

---

<sup>1</sup> Pour un schéma récapitulatif de la position des différentes parties, on se référera à l'Annexe2

<sup>2</sup> Pour plus de détails sur les origines communes des instruments à corde et sur l'évolution du violoncelle en particulier, voir l'Annexe1.

<sup>3</sup> Cf. Ch.1.5, p.8

<sup>4</sup> On notera au passage que la relation théorique qui régit l'accordage veut que si toutes les dimensions d'un instrument sont linéairement augmentées par un facteur K, en gardant les mêmes matériaux, la nature des modes de vibration naturels diminue en fréquence d'un facteur 1/K (*lois générale de similarité*).

En résumé :  $K = \frac{L_1}{L_2} = \frac{f_1}{f_2}$ , avec  $L_1, L_2$  les dimensions, et  $f_1, f_2$  les fréquences naturelles respectives.

Le violoncelle est donc « trop petit ». Puisque les instruments traditionnels ne respectaient pas les proportions du violon, une nouvelle famille de 8 violons fut dessinée puis construite par deux chercheurs, Frederick Saunders et Carleen Hutchins ([4], p.280).

<sup>5</sup> Cf. Ch. 4.4, p.22

<sup>6</sup> ce qui sera l'objet du Ch.3

L'archet (de violoncelle) a une longueur d'environ 72 cm et pèse de 70 à 85 grammes. Il se compose d'une *baguette* concave<sup>1</sup>, terminée par une *tête*, et une *hausse*. Si la tête retient simplement la *mèche* (constituée d'un faisceau de crins de cheval<sup>2</sup>), la hausse, mobile, permet quant à elle de régler la tension grâce à une *vis*, tandis que la *bague* aplanit les crins et les répartit d'une manière égale.

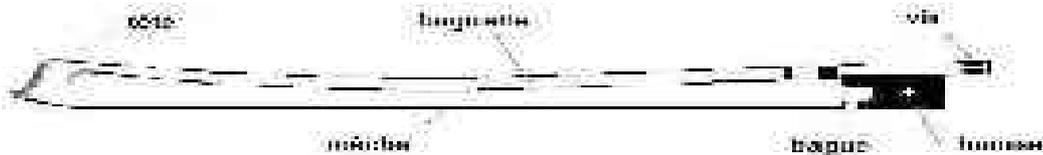


Fig. 2.1 : Schéma explicatif d'un archet de violoncelle [12]

La mèche est généralement enduite de *colophane* (mélange de résine et de térébenthine) afin d'augmenter la friction entre l'archet et la corde.

### **3. Le système oscillant**

En acier (anciennement en boyau), les quatre *cordes* (do-sol-ré-la) s'accordent en quinte grâce aux *chevilles* qui les tendent et les détendent et à des vis situées sur le *cordier* qui permettent d'affiner le réglage. Le violoncelliste modifie leur longueur en appuyant sur une *touche* d'ébène qui recouvre le *manche*.

### **4. Le chevalet**

Le chevalet est finement taillé dans de l'érable. D'une épaisseur de seulement quelques millimètres à sa base (deux pieds curvilignes s'adaptant à la forme de la table) pour s'effiler à son sommet, il est placé entre les deux ouïes et y exerce la pression des cordes qui le maintiennent en place. Son rôle principal est de transformer les déplacements des cordes en des forces périodiques s'exerçant par ses pieds sur la table de l'instrument.

### **5. La caisse de résonance**

<sup>1</sup> Avec une baguette convexe, la mèche aurait tendance à céder (se plier) face à la pression ([2], p.26).

<sup>2</sup> Pour l'anecdote, on notera que les crins de jument sont préférés, les étalons ayant la fâcheuse habitude d'uriner sur les leur.

Sorte de « boîte », la *caisse de résonance* se compose de différentes planches de bois. La partie supérieure, appelée *table* est faite de deux planches de pin collées ensemble et percées chacune d'une *ouïe* qui permet à l'air (et donc aux ondes acoustiques) de passer librement entre l'intérieur et l'extérieur de l'instrument

Le *fond*, généralement taillé dans deux planches d'érable d'une épaisseur légèrement supérieure à celle de la table, est relié à celle-ci par l'*âme*, un petit bâtonnet cylindrique de pin, placé (et non collé) légèrement en dessous du pied droit du chevalet. Son but est de transmettre les vibrations de la table vers le fond, renforçant ainsi la sonorité.

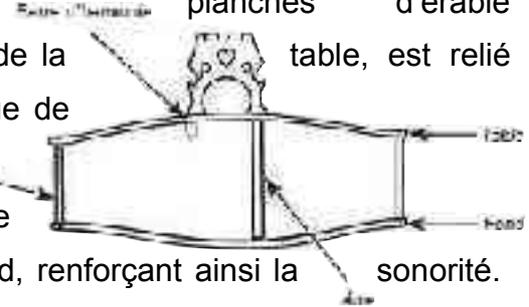


Fig. 2.2 : Coupe médiane d'un violoncelle ([2], p.5)

Collée à la partie interne de la table, la *barre d'harmonie* est fixée sous le pied gauche du chevalet. Elle a trois rôles : renforcer la table contre la pression des cordes, améliorer la sonorité des notes graves et distribuer le mouvement de balancier du chevalet uniformément à la table.

Les côtés de la caisse sont constitués par les *éclisses*, 6 bandes d'érables modelées au-dessus d'un fer chaud pour épouser le contour de la table et du fond.

## **6. Conclusion**

Cette brève description de la structure et des fonctions des différentes parties du violoncelle pourrait faire croire que chacune des différentes parties garde sa propre «identité acoustique» lorsque l'instrument est joué. Bien au contraire, les diverses bien que proches impédances d'onde des différentes parties en bois permettent à celles-ci de construire un son beaucoup plus complexe que la simple somme des constituants.

### **3. RELATIONS ÉNERGÉTIQUES ET TRANSMISSION DU SON**

#### **1. Introduction**

La propagation ou l'amplification du son sont essentiellement des relations d'ordre énergétique. Ainsi, les instruments traditionnels ont généralement quatre éléments physiques en commun : une source d'énergie (par ex. : le bras droit), un moyen de lier l'énergie à l'instrument (par ex. : l'archet), un élément ou un système oscillant (par ex. : les cordes), et un moyen d'amplifier l'énergie acoustique pour la transmettre à l'environnement (par ex : la caisse de résonance).

Nous procéderons donc en analysant la manière selon laquelle les relations entre ces différents éléments se combinent dans des conditions normales.

#### **2. Du bras à l'archet**

La source d'énergie du violoncelle est le bras droit humain. Celui-ci se déplace transversalement à la corde et entraîne avec lui l'archet, soit en le « poussant » vers sa gauche, soit en le « tirant » vers sa droite.

Sans vouloir entrer plus en détail dans des considérations physiologiques, on peut constater que ces deux mouvements d'une part, ne sont pas parfaitement homogènes dans leur course, et d'autre part, ne sont pas symétriques l'un par rapport à l'autre. Les différentes charnières naturelles du bras humain (épaule, coude et poignet) changent de configuration selon la direction du mouvement avec une certaine inertie, afin de conférer au son fluidité et liberté.

Pour simplifier l'étude des phénomènes acoustiques et énergétiques du violoncelle, on considèrera un mouvement idéal de l'archet parfaitement régulier, un peu comme si on l'avait remplacé par une roue enduite de colophane (vielle à roue).

### 3. De l'archet à la corde : Le modèle Helmholtz et Raman du mécanisme d'un coup d'archet

Herman von Helmholtz présenta en 1860 la première description systématique des interactions entre la corde et l'archet, développant une approche mathématique qui allait jeter les bases de toutes les études qui suivirent ([5], p.515 et suivantes).

Prenons tout d'abord l'exemple d'une craie qui crisse contre un tableau noir. Lorsqu'on examine de près la trace de cette craie, on constate une série de points ou de petits traits. Si l'extrémité de la craie est laissée visible, on peut l'observer alternativement « coller » au tableau (y laissant une marque), puis « glisser » jusqu'au point où elle reprend contact avec le tableau durant le retour de son mouvement plus ou moins sinusoïdal. Ce type d'oscillation apparaît en raison des variations de la force de friction entre deux corps, qui est plus faible en mouvement qu'à l'état stationnaire.

De même, l'archet exerce une force de frottement transversale sur la corde. Cette dernière se déplace avec lui, jusqu'à ce que la tension devienne plus élevée que la force de frottement. La corde reprend alors sa position d'origine, glissant le long de l'archet dans le sens inverse de son mouvement. L'archet étant en constant déplacement vers la droite (ou la gauche), un cycle s'instaure qui crée puis maintient la vibration de la corde. On appelle ce mécanisme le « *stick-slip* » (coller-glisser).

*La partie de la trace de l'oscilloscope la plus longue et de pente faible représente le mouvement régulier et croissant de la corde pendant qu'elle est tirée par l'archet. La durée de cette partie du cycle est connue sous le nom de « temps d'adhérence » (sticking time).*

*Lorsque la corde arrive à la limite supérieure de l'archet et glisse rapidement en arrière jusqu'à l'autre extrême de son déplacement. On parle alors de temps de retour (flyback time).*

*Elle est ensuite reprise par l'archet qui l'entraîne à nouveau, permettant ainsi la création du cycle<sup>1</sup>.*

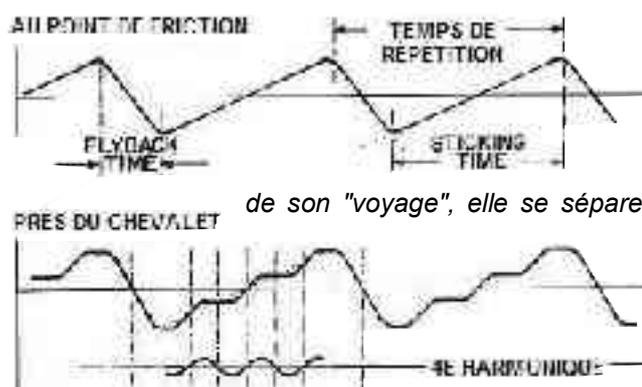


Fig. 3.1 : Représentation simplifiée de l'action de l'archet sur la corde en deux points ([5], p.517).

### 4. De la corde à la caisse de résonance

<sup>1</sup> Notons au passage que, selon Helmholtz ([5], p.517), lorsque la corde n'a pas de perte, le rapport entre le « flyback time » et le temps total de répétition peut être calculé comme le rapport entre la distance du chevalet au point de frottement sur la longueur de la corde entière.

### a) Un système d'oscillateurs couplés

En l'absence d'excitation extérieure, les deux pieds du chevalet appliquent une pression constante à la table. Lorsque celui-ci se meut sous l'effet de la corde, la pression se déplace et met en mouvement la table de manière locale. L'onde chemine alors le long de la barre d'harmonie qui la répartit sur toute la table, puis se transmet par l'âme au fond qui à son tour entre en mouvement.

La transmission énergétique de l'onde peut donc fort bien être comparée à deux oscillateurs reliés par un ressort ou une sorte de levier.

Il est intéressant dans l'optique du loup d'analyser le cas particulier où la corde et la caisse de résonance oscillent à des fréquences similaires<sup>1</sup>. Le transfert d'énergie peut alors être analysé comme le mouvement d'un système d'oscillateurs couplés, visible dans celui de deux pendules attachés l'un à l'autre par un fil élastique ou par un ressort. (Cf. Fig. 3.2).

Dans ce cas, les pendules (excités initialement à une fréquence plus ou moins similaire) finissent par ne plus être synchronisés. Le résultat est un transfert graduel et perpétuel de l'énergie cinétique entre les deux pendules à travers le milieu du fil. Plus l'énergie

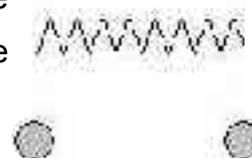


Fig. 3.2 : représentation schématique d'un système d'oscillateurs couplés.

est transférée, plus l'un des pendules semble s'arrêter jusqu'à ce que son contrepoids lui rende une partie de l'énergie en retour. Si l'influence de l'un par rapport à l'autre est petite, le système est dit *mou* ; si les deux systèmes interagissent considérablement, le système est dit *tendu*.

On peut par ailleurs remarquer que cette relation de couple entre deux fréquences de résonance est capable de diviser le « *fondamental* » de l'oscillation en deux fréquences, l'une, légèrement au-dessus ; l'autre, légèrement au-dessous: là où chaque système pris indépendamment aurait un pic de résonance (c'est-à-dire une fréquence que le système préfère), le système couplé en a deux qui luttent pour dominer.

### b) Le chevalet : un simple levier ?

Le chevalet peut, de manière quelque peu abusive, être assimilé à un ressort<sup>2</sup> reliant les deux oscillateurs (la corde et la caisse de résonance). En fait, même si

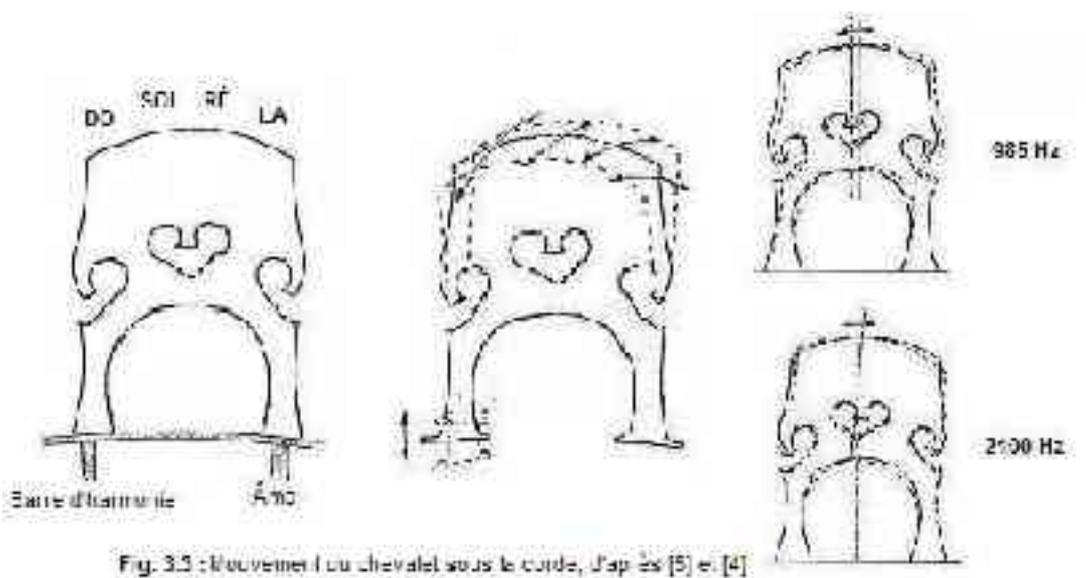
<sup>1</sup> Nous découvrirons en effet au Ch.4.3, p.20 que ce phénomène surgit dans des conditions similaires.

<sup>2</sup> comportant, selon Steinkopf ([4], p.255), trois ports, un d'entrée, et deux de sorties.

cette approximation permet d'expliquer convenablement le transfert global d'énergie, le mouvement réel de cette partie est bien plus complexe comme l'illustrent les études de Minnaert et Vlam (1937) ([4], p.255). Les deux chercheurs accomplirent l'expérience suivante : après avoir attaché des miroirs sur les 4 faces d'un chevalet excité, ils projetèrent des rayons lumineux, puis observèrent et séparèrent les déflexions lors de l'excitation du chevalet par la corde qui révélèrent la présence de vibrations longitudinales, de torsion et de flexion.

C'est le mode de déplacement de la corde qui entraîne ces mouvements distincts du chevalet :

Le premier est le résultat de l'oscillation transversale de la corde parallèlement au déplacement de l'archet. Cette force d'excitation, que l'on peut appeler *excitation directe* du chevalet est parallèle à la surface de la table. Une action à la manière d'un levier du chevalet est nécessaire pour la convertir en une force à angle droit par rapport à la table qui permet au corps de l'instrument de se déplacer de manière effective (voir Fig.3.3).



La deuxième force est due aux changements de tension de la corde. Chaque cycle de vibration de la corde entraîne deux cycles de tensions, atteignant des maxima lors de chaque position extrême de la corde de chaque côté (Cf. Fig. 3.4). On parle alors d'*excitation indirecte*.



Fig. 3.4 : Vibration et tension relative d'une corde

Le rapport entre les fréquences des excitations directes s'établit donc ainsi :

$$\text{excitation directe} = 440\text{Hz}$$

$$\text{excitation indirecte} = 2 \cdot 440 = 880 \text{ Hz}$$

Le point de vue simplifié où le chevalet est considéré comme un simple levier reste cependant tout à fait suffisant lorsque la fréquence de résonance reste autour de 1000Hz (sib5) ([5], p.529). L'âme tient alors lieu de point d'appui autour duquel le chevalet peut osciller afin d'exercer une force de pression au dessus de la barre d'harmonie.

## **5. De l'instrument à l'air**

Si la corde contribue au son perçu de manière directe par la perturbation qu'elle engendre dans l'air, d'autres composants apportent des contributions significatives.

Nous avons vu que les vibrations se propagent aux deux extrémités de la caisse de résonance. La masse d'air contenue dans la caisse de résonance est alors comprimée et détendue par les mouvements de la table et du fond conformément aux vibrations des cordes, et amplifie ainsi l'onde qui peut se propager ensuite dans l'environnement.

A certaines hautes fréquences, le son peut également passer directement du chevalet à l'air. Le déplacement du chevalet est suffisamment important (rapide) pour que la déformation de l'air soit audible.

## 4. LE LOUP

### 1. Expérience introductive

L'expérience suivante a été réalisée sur un violoncelle<sup>1</sup>. Tout d'abord, on balaye les fréquences des notes situées entre la sixte mineure et la septième majeure sur la corde de sol (resp. les notes mi bémol et fa#). On repère alors auditivement une série de notes consécutives qui diffèrent de leurs voisines en qualité, en justesse et en intensité. Lorsque on atteint le fa, des *battements*<sup>2</sup> sont clairement audibles.

C'est cette anomalie du son qui est connue en acoustique sous le nom de *loup*. Fréquemment présente dans les différents instruments à cordes frottées, elle est généralement localisée sur le violoncelle dans l'intervalle précédemment cité. À cet endroit, les fréquences du premier mode de la corde sous l'archet sont dans la proximité générale d'une forte résonance du corps de l'instrument. Nous verrons par la suite que cette condition est l'un des facteurs nécessaires à la création du loup.

L'expérience vérifie que le critère prédominant à la création du loup est bien lié à l'intervalle de fréquences. En effet, en accordant différemment l'instrument, le loup se retrouve dans ce même groupe. De même, si l'on joue les mêmes notes sur la corde de ré, par exemple, on retrouve une perturbation du son. On s'assure que le loup n'est pas simplement intervenu en sympathie sur la corde de sol en enlevant cette dernière.

On peut aussi repérer un loup par sa trace sur un oscilloscope. Dans des conditions normales, l'oscilloscope d'une corde sous un archet est claire : il représente une onde régulière en dents de scie. Au contraire, lorsqu'un loup apparaît, l'oscilloscope montre une onde moins élégante qui oscille de manière périodique entre le graphe initial et un graphe d'une fréquence deux fois plus élevée que celle initiale<sup>3</sup>.

Puisque le loup se repère directement à l'audition et qu'il perturbe significativement un grand nombre d'instruments, on peut aisément comprendre l'intérêt porté à l'étude de ce phénomène dans l'optique d'élaborer des moyens pour le faire disparaître.

### 2. Une variation des harmoniques impaires

---

<sup>1</sup> Plus précisément, sur mon violoncelle, construit en 1995 par le luthier suisse Claude Lebet selon un modèle inspiré du luthier Italien Guadagnini (1711-1786).

<sup>2</sup> Cf. Ch. 1.4, p.7

<sup>3</sup> Ces graphes sont disponibles à l'Annexe4.2

À partir d'expériences théoriques, Raman, puis Shelling ont expliqué la nature du son produit par un loup ([5], p.567 et suivantes).

Pour Raman celui-ci est une simple alternance, plusieurs fois par seconde, entre la fréquence d'un fondamental et celles de ses octaves dans un intervalle de temps appelé *fréquence de pulsation*.

En 1963, Schelleng apporta une explication plus complexe du phénomène. Remarquant que les composants des harmoniques paires de l'oscillation d'une corde suivaient une forme régulière, tandis que ceux des harmoniques impaires semblaient grandir ou diminuer suivant la pulsation, il élaborait une théorie qui décompose l'onde du loup en ces deux composants et décrit les variations de l'onde résultante.

Cette théorie permet d'expliquer la perception de changement d'octave en la faisant coïncider exactement avec les changements physiques de l'oscillation. Lorsque les parties impaires de l'onde sont d'une amplitude considérable, l'oreille reçoit la série complète des harmoniques basés sur les modes de la corde. L'auditeur entend donc la bonne note. Lorsque les composants impairs sont insignifiants, seule la partie paire contribue à la note. Elle génère alors un son d'une octave plus haut.

Les trois premières lignes de la Fig. 4.1 illustrent l'explication de Shelling de comment le mouvement idéal en dents de scie d'une corde dans des conditions normales (première ligne) peut être séparée en une contribution des composants pairs (deuxième ligne) et en une autre de ceux impairs (troisième ligne).

Il est clair que l'abolition des composants impairs nous laisserait avec une oscillation de fréquence double qui est autrement d'apparence normale<sup>1</sup>.

La dernière ligne montre l'apparition du mouvement du point de friction durant un loup. Aux instants où les composants impairs sont de forces normales (A), on trouve une onde en dents de scie de la corde. A d'autres instants (B), les composants impairs disparaissent, laissant place à une onde en dents de scie de fréquence double (rate of repetition). Entre les deux, on trouve des intervalles (C) durant lesquels de petites quantités de composants impairs sont présents, produisant par là-même une forme d'onde irrégulière qui est néanmoins, si l'on se remémore le schéma 3.1, du type « stick-slip » discuté par Raman et Helmholtz.

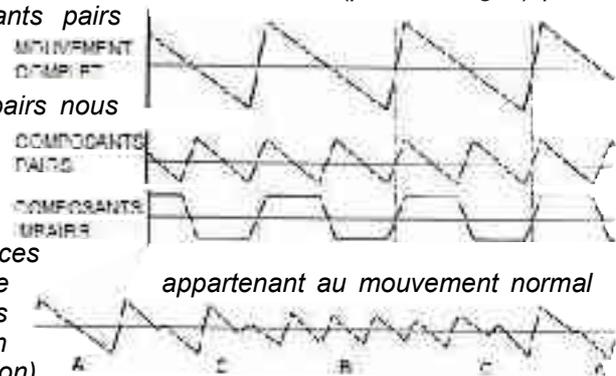


Fig. 4.1 : Séparation du mouvement de la corde au point de friction en ses composants harmoniques pairs et impairs ([5]).

### **3. Pics de résonance et composants hétérodynes**

<sup>1</sup> Cf. Ch.1.3, p.6

Il nous faut maintenant éclaircir comment le système choisit le loup comme son type d'oscillation préféré. Schelleng remarqua que la présence d'une résonance du bois transforme le pic du premier mode de la corde en une paire de pics.

La première ligne de la fig. 4.2 montre la nature courbe de résonance au point de friction lorsque la résonance du bois est légèrement plus faible que la résonance du premier mode de la corde. Pour simplifier, on suppose que la corde est accordée à 100 Hz. On peut voir que le pic de résonance normal de 100 Hz a été déplacé à une fréquence légèrement plus haute, alors que l'autre pic se trouve en dessous de la résonance naturelle du bois. Remarquons aussi que ce pic est plus petit que celui qui se trouve à 200 Hz.

La deuxième ligne montre ce qui se passe lorsque la résonance du bois est plus forte que celle de la corde.

On constate au passage que la corde a également des pics de résonance à chaque multiple de la fréquence fondamentale.

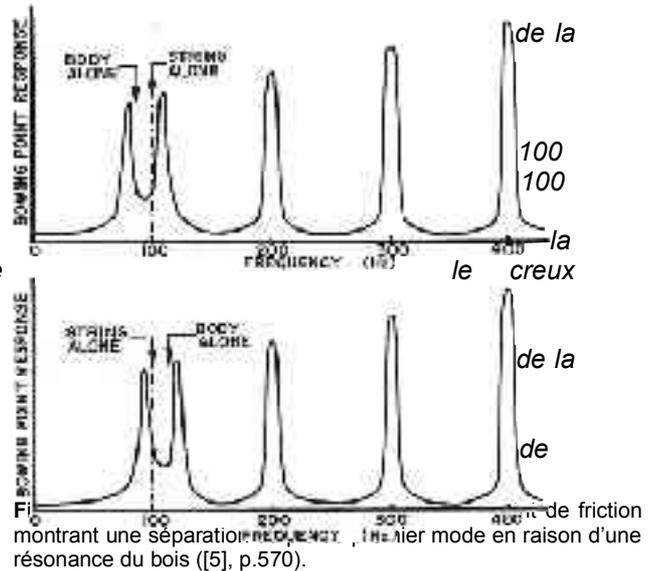


Fig. 4.2. Réponse au point de friction montrant une séparation du premier mode en raison d'une résonance du bois ([5], p.570).

Si l'on analyse les différentes possibilités oscillatoires du système, on peut découvrir les propriétés suivantes :

On remarque tout d'abord que les pics de résonance pairs de la corde sont tous dans une relation d'harmonique. Ils sont par là-même admirablement répartis pour générer un groupe de composants dont les fréquences sont des multiples pairs de la fréquence normale de la corde. Si nous nous limitons aux composants pairs et à ceux qu'ils génèrent, il est clair que (quel que soit le type de non linéarité présente au point de contact entre l'archet et la corde) toutes les fréquences hétérodynes générées par les pics pairs appartiendront elles aussi à cette « collection » d'harmoniques paires. En d'autres termes, elles seront fortement générées dans une sorte de sub-régime stable.

Soit alors la contribution oscillatoire d'un pic du premier mode déplacée pour sonner un petit peu trop haut en générant un composant de 102 Hz. Le plus simple élément hétérodyne de ce composant et des harmoniques paires se maintenant fortement est du type suivant :

$$\begin{aligned}
 102 \pm 200 &= 98 \text{ ou } 302 \text{ Hz} \\
 102 \pm 400 &= 298 \text{ ou } 502 \text{ Hz} \\
 102 \pm 600 &= 498 \text{ ou } 702 \text{ Hz} \\
 &\text{etc.}
 \end{aligned}$$

On remarque que chacun de ces éléments hétérodynes se trouve près de la fréquence des pics de résonance impairs et a donc une bonne chance d'être renforcé par celle-ci<sup>1</sup>.

Nous avons trouvé autour de 100Hz un couple de fréquences fondamentales (102 et 98) d'amplitudes appréciables (mais pas forcément égales) qui peuvent provoquer un battement d'une fréquence de 4 Hz<sup>2</sup>. C'est exactement ce que l'on observe expérimentalement dans un loup typique.

Si l'on continue notre observation des descendants hétérodynes des deux composants fondamentaux, on constate que les paires d'hétérodynes sont centrés autour de toutes les harmoniques impaires de 100Hz (ex. 298 et 302 Hz, 498 et 502 Hz,...). Ces paires vont battre à la même fréquence que le couple fondamental.

En additionnant ensuite ces composants, on remarque qu'ils peuvent former de nouvelles fréquences qui vont renforcer les pics de résonance pairs.

$$\begin{aligned} 98 \pm 102 &= 4 \text{ ou } \mathbf{200} \text{ Hz} \\ 298 \pm 302 &= 4 \text{ ou } \mathbf{600} \text{ Hz} \\ 498 \pm 502 &= 4 \text{ ou } \mathbf{1000} \text{ Hz} \\ &\text{etc.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 98 \pm 298 &= \mathbf{200} \text{ ou } 396 \text{ Hz} \\ 98 \pm 302 &= 204 \text{ ou } \mathbf{400} \text{ Hz} \\ 298 \pm 502 &= 204 \text{ ou } \mathbf{800} \text{ Hz} \\ &\text{etc.} \end{aligned}$$

Ainsi, le déplacement du pic du premier mode peut provoquer la création d'un loup : une oscillation est produite dans laquelle les composants pairs sont relativement constants, tandis que les composants impairs sont caractérisés par de fortes pulsations, c'est-à-dire qu'ils sont composés de deux éléments (ou plus) d'amplitudes comparables.

---

<sup>1</sup> Le composant 98Hz se trouve dans un creux, mais le creux étant faible, il peut gagner lui aussi un support considérable et acquérir une amplitude comparable à celle des autres composants.

<sup>2</sup> Ces deux composants seront équivalents à 100 Hz uniquement s'ils ont la même amplitude, ce qui serait un cas inhabituel.

#### **4. Oscillateurs couplés et variations d'impédance**

Puisque le déplacement du premier mode (et sa séparation en deux résonances) dépend d'une influence mutuelle entre la corde et le corps du violoncelle, il est clair que la présence ou l'absence du loup dépend d'impédances d'onde particulières à une certaine fréquence de ces deux parties.

Tout d'abord, lorsque leurs fréquences de vibration sont proches, les deux oscillateurs respectifs que sont la corde et la caisse de résonance entrent logiquement en relation à la manière d'oscillateurs couplés<sup>1</sup>.

Le chevalet (notre levier), dont l'impédance est normalement dix fois plus grande que celle de la corde {ce qui permet la création d'un nœud au niveau du chevalet qui apporte une réflexion suffisante à la construction d'une oscillation sur la corde (création des modes<sup>2</sup>)}, voit dans ces conditions son impédance grandement réduite. Il devient alors « mou » à la corde, et la réflexion peut alors devenir trop faible pour maintenir la vibration de la corde, l'énergie étant absorbée par le chevalet qui la transmet entièrement au corps de l'instrument.

Le corps et la corde devraient alors vibrer et s'immobiliser alternativement. Cependant, la corde est en réalité constamment entraînée par l'archet. Pour satisfaire à son rôle d'oscillateur couplé, elle va donc revenir plus vite en arrière sans avoir terminé son cycle habituel. Le résultat est donc des battements dans le son, et la nécessité d'une plus grande pression de l'archet pour pouvoir entraîner la corde et ainsi lutter contre sa propension plus forte à reprendre un état immobile.

La vibration du corps est alors à son tour privée d'énergie, et elle s'arrête elle aussi rapidement. Si l'on continue à exciter la corde, un nouveau cycle se crée. Ainsi, le résultat est une croissance et une décroissance alternées de l'amplitude des vibrations de la corde et du corps qui ne coïncident pas avec le fonctionnement normal.

---

<sup>1</sup> Cf. Ch. 3.4, p.15

<sup>2</sup> Cf. Ch. 1.3, p.6

## **5. Une question de taille**<sup>1</sup>

L'expérience montre que les violoncelles ont plus souvent à « souffrir » de la présence d'un loup que les autres instruments à cordes. On peut expliquer cette différence par la « petite » taille relative du violoncelle, « difforme » par rapport au violon.

En effet, l'écart d'impédance entre la corde et le corps a tendance à être moindre dans les instruments dont la taille n'a pas augmenté en proportion de  $1/K^2$ . Ainsi, le phénomène d'oscillateurs couplés peut plus facilement se produire<sup>3</sup>.

Par ailleurs, lorsque le grand chevalet du violoncelle oscille en réponse à la vibration de la table, il agit comme un plus long levier et subit, selon Rossing ([4], p.272) une réduction de son impédance par rapport à la corde. Cette réduction d'impédance grandit comme le carré de la hauteur du chevalet (=longueur du levier) qui est 2.4 fois plus grand chez le violoncelle.

D'après Cremer (1984) (cité dans [4], p.271), si l'on considère ces deux facteurs, il est 3,4 fois plus facile de générer des loups avec un violoncelle.

## **6. Suppression du loup**

Certaines études affirment que le loup peut parfois disparaître lorsque l'instrument est laissé au repos pendant de longues périodes, et qu'au contraire il peut s'aggraver lorsqu'il est beaucoup joué. On peut tenter d'expliquer ce phénomène en constatant que le bois laissé en repos perd la « mémoire » de sa forte résonance en se raidissant à un certain niveau initial. Lorsqu'il est rejoué par contre, le bois de l'instrument s'adapte aux ondes qui le traversent et retrouve ses conditions normales de résonance. Mais dès lors, il est à nouveau sujet au loup.

Il devient donc évident que la seule disparition spontanée du loup, puisqu'elle nécessite que l'instrument ne soit pas joué (ce qui est en somme contraire à sa finalité), n'est pas une solution en soi, et que différentes parades ont dû être trouvées à cette désagréable anomalie. Au vu des sous-chapitres précédents, la similarité à certaines fréquences des résonances du corps et de la corde est

---

<sup>1</sup> Cf. Ch. 2.1, p.10

<sup>2</sup> Cf. note4 de la page 10

<sup>3</sup> « Le propension chronique du violoncelle à ce problème (le loup) est le prix à payer pour la commodité d'un petit instrument, petit comparé à un totalement à l'échelle. »(1963, Schelleng cité dans [4], p.271)

responsable de la présence de cette interférence, et c'est donc sur la manière de modifier ces vibrations que les différentes méthodes ont été élaborées.

Une des possibilités est d'ajouter au système un nouvel oscillateur avec la même fréquence de résonance que le corps. Pour ce faire, il suffit d'ajouter une petite masse entre le chevalet et le cordier. Cette sourdine à "loup", généralement constituée d'un tube en chrome ou en cuivre entourant un cylindre de caoutchouc, force de manière efficace le mode de résonance offensant à sonner uniquement dans cette section de la corde. Cette sourdine fonctionne en augmentant la masse du point d'ancrage de la corde à proximité de la corde concernée. Ainsi, l'impédance du chevalet par rapport à la corde augmente jusqu'à un niveau acceptable, et la caisse de résonance se renforce jusqu'à ne plus pouvoir résonner aussi dramatiquement. Le poids, ou le placement de l'appareil peut influencer sur son efficacité.

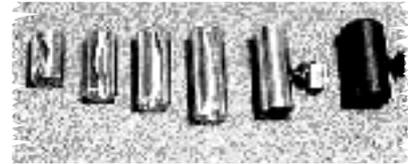


Fig. 4.3 : sourdines à loup de différentes tailles [11].

L'âme peut également être déplacée afin d'affecter la résonance du corps.

On peut également tenter d'utiliser une corde plus légère qui aura une fréquence de résonance différente<sup>1</sup>.

Le fait d'appuyer sur la corde avec une plus grande pression, peut également réduire le phénomène. En augmentant la pression, on permet aux modes les plus élevés d'être excités, et on régule de cette manière le fondamental qui détonne.

Une compagnie allemande<sup>2</sup> propose « un merveilleux étouffoir » que l'on peut coller sous la table juste en dessous de l'ouïe du côté de la barre d'harmonie et qui « débarrasse complètement » le violoncelle de son loup.

Une dernière méthode beaucoup plus économique est citée. Il suffirait de presser doucement les côtés du violoncelle avec les jambes. On modifie ainsi légèrement la forme du volume de la cavité à l'intérieur de l'instrument, et donc, les fréquences de résonances.

<sup>1</sup> En effet, son moment d'inertie ( $I$ ) diminue, ce qui implique une diminution de sa fréquence propre (Cf. note 2 p.8)

<sup>2</sup> Il s'agit de la compagnie GEWA ([www.musik-gewa.de](http://www.musik-gewa.de))

## **CONCLUSION**

Nous avons découvert que le loup est une anomalie du son qui peut perturber certaines fréquences des instruments à cordes frottées. Ce phénomène touche en particulier le violoncelle, et est le résultat d'un dysfonctionnement des transferts d'énergie au sein de l'instrument dû à la présence d'une forte résonance de son corps à certaines fréquences. Cette résonance vient interférer avec la vibration de la corde et modifie l'impédance du chevalet. Le système génère alors une série de composants hétérodynes qui, en s'additionnant, viennent périodiquement renforcer les harmoniques impaires du fondamental.

Afin d'arriver à cette conclusion, nous avons dû tout d'abord développer quelques termes d'acoustique, puis étudier le fonctionnement normal d'un violoncelle après avoir au passage défini ses différentes parties. Nous avons ainsi traversé un monde de connaissances, au cours de ce voyage à travers l'acoustique du violoncelle.

Ce travail n'aspire cependant pas à l'exhaustivité du sujet. Tout au plus a-t-il pu approcher grossièrement les caractéristiques majeures du violoncelle, et les appliquer au cas particulier du loup. D'immenses espaces de connaissances sur le violoncelle restent donc encore inexplorés.

## **BILAN PERSONNEL**

Ce travail m'a permis de comprendre plus à fond le fonctionnement de l'instrument dont je joue depuis l'âge de 6 ans. Parfois frustré par le manque de certitude qui accompagne l'acoustique, parfois émerveillé de l'ingéniosité de certains chercheurs à modéliser et illustrer les problèmes rencontrés, j'ai pu tout au long de cette recherche approcher de nombreux aspects de cette science.

Et découvrir aussi combien de problèmes sont encore non résolus. Ainsi, mes plans initiaux de travail se sont vite trouvés confrontés au manque d'information concernant des domaines que je croyais pouvoir explorer : difficultés à trouver des liens théoriques entre la forme de l'instrument et sa sonorité, absence totale d'analyse de la propagation de l'onde par l'intermédiaire de la pique,...

Ces pages sont donc le fruit de beaucoup de remises en question, d'une constante évolution, et d'adaptations aux informations que je découvrais...

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] **Les ondes sonores**, Thomas Progin, cours 2003-2004 pour les OC musique.
- [2] **Cello Story**, Dimitry Markevitch, Summy-Birchard Music, Princeton 1984.
- [3] **Music, Sound, and Technology**, John M. Eargle, Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [4] **The Physics of Musical Instrument**, Neville H. Fletcher and Thomas D. Rossing, Springer-Verlag, New York 1991.
- [5] **Fundamentals of Musical Acoustics, second revised edition**, Arthur H. Benade, Dover Publication, New York 1990.
- [6] **The Cambridge Companion to the Cello**, édité par Robin Stowell, Cambridge University Press, Cambridge 1999.
- [7] **Cours de Physique: III Ondes**, J.-A. Monard, ed. Centrale d'Achat de la Ville de Bienne, Bienne 1978.
- [8] **Dictionnaire de Musique**, Roland De Candé, ed. du Seuil, 1961.
- [9] **Who's Afraid of the Big Bad Wolf ?**, Chris Clayton,  
<http://www.cello.org/index.cfm?fuseaction=tips&tip=tip50>
- [10] [http://www.inrp.fr/Acces/JIPSP/phymus/m\\_lexiq/lexbc1.htm](http://www.inrp.fr/Acces/JIPSP/phymus/m_lexiq/lexbc1.htm)
- [11] <http://www.cellos2go.com/wolf.htm>
- [12] <http://www.isuisse.ifrance.com/violoncelle/>, Virgilio Lehmann

## **REMERCIEMENTS**

Je voudrais remercier ici toutes les personnes sans qui ce travail n'aurait jamais abouti. Tout d'abord, je remercie mes différents professeurs de musique, M. Markevitch, M. Jaermann, Sœur Marie-Elisabeth qui ont su éveiller en moi le plaisir de jouer de cet instrument extraordinaire qu'est le violoncelle. Merci également à mon professeur accompagnant Thomas Progin qui m'a guidé dans mes expériences, et à M. Marclay pour ses précieux conseils. Toute ma gratitude à ma documentaliste de choc qui m'amena LA référence pour me sortir d'une mauvaise passe, ainsi qu'à Claude Lebet pour le magnifique violoncelle qu'il m'a construit. Merci enfin à ceux qui ont pris la peine de me relire jusqu'au bout et m'ont apporté leurs critiques avisées.