

Mesurer la réponse en fréquence de la guitare acoustique

de Giuliano Nicoletti

Introduction

La guitare acoustique plonge sa tradition dans l'antiquité des cultures humaines. Le Oud arabe a été joué en Asie centrale en Afrique du Nord et au Moyen-Orient il y a plusieurs milliers d'années ; le luth européen était probablement l'instrument le plus populaire en Europe pendant



Guitare romantique

la Renaissance, il y a 600 ans, et la guitare romantique, comme elle était construite à Paris au début des années 1800, était structurellement identique à la guitare acoustique de nos jours.

Dans tous ces instruments, le son est généré par la transmission de vibrations d'un ensemble de cordes à une plaque vibrante, amplifié par la résonance d'un volume résonant à travers une ou plusieurs ouvertures de formes diverses. L'évolution de cet instrument au cours des siècles a donc été minime, confirmant un principe de fonctionnement valable : le peu d'énergie fournie aux cordes permet en effet de générer un son d'intensité comparable à celui du chant d'un homme, un accompagnement parfait.



Oud arabe

Par contre, des progrès exceptionnels ont été réalisés dans la compréhension et l'analyse des phénomènes physiques qui permettent à la guitare de produire du son : en 1687, Sir Isaac Newton publia le livre

Philosophiae naturalis principia mathematica (Principes mathématiques de la philosophie de la nature), le texte qui a posé les bases de la mécanique classique, et qui est encore utilisé aujourd'hui pour décrire la dynamique de fonctionnement du système résonant de la guitare.

En 1863 Hermann Von Helmholtz publia *Die Lehre von den Tonempfindungen (A propos de la sensation du ton comme base pour la théorie de la musique)*, en décrivant l'utilisation d'un système de résonateurs acoustiques pour analyser le contenu spectral de différents sons présents dans la musique. À la même époque, Jean Baptiste Fourier (conseiller scientifique de Napoléon Bonaparte et directeur de l'École polytechnique de Paris) développa le modèle mathématique des Séries de Fourier, fonctions périodiques composées de sinusoides en relation harmonique, qui sont encore aujourd'hui à la base de la transformation d'un son du domaine du temps en celui de la fréquence (FFT, fast Fourier transform).

Trois révolutions industrielles plus tard, le développement et la démocratisation de l'informatique nous offrent une plate-forme d'analyse exceptionnellement puissante et



Sélection des résonateurs de Helmholtz, 1870

économique ; n'importe quel ordinateur portable peut être connecté à un microphone de mesure USB et avec un logiciel freeware offrir des mesures précises et reproductibles de la réponse en fréquence d'un instrument acoustique, en combinant l'évaluation subjective avec des données objectives.

La lutherie est une activité empirique, souvent menée dans la solitude de petits et confortables ateliers, avec des outils anciens, profonde expression de la sensibilité artistique et artisanale de l'être humain. Il est donc naturel qu'au cours des dernières décennies la méfiance à l'égard des dernières technologies numériques se soit répandue dans la communauté des luthiers, mais il faut éviter de généraliser et distinguer l'apport de machines CNC à commande numérique de celui de systèmes de mesure et d'analyse acoustiques et mécaniques. Les premiers peuvent effectivement constituer des limites au développement des capacités manuelles et à l'identité et au caractère de l'ouvrage individuel (tout en constituant évidemment un moyen important pour la production en série et la maîtrise de certains coûts). Les secondes par contre peuvent être considérées comme une extension des capacités perceptive-analytiques, permettant d'approfondir la compréhension des phénomènes mécaniques et acoustiques qui régissent le fonctionnement de l'instrument, et de pousser encore plus loin la caractérisation et la mise au point de chaque instrument, avec une approche qui reste authentiquement artisanale.



Setup minimale de mesure acoustique, microphone USB Umik-1 et logiciel freeware

On est convaincu que l'utilisation des technologies les plus modernes d'analyse et de modélisation acoustique peut permettre d'établir une relation encore plus directe et consciente avec l'instrument en cours de construction; d'utiliser au mieux le bois, de focaliser ses idées et son propre idéal du son, d'effectuer une mise au point plus précise; d'arriver à donner une véritable image à un son, en sachant que le but ultime de l'instrument est d'émouvoir le musicien qui le joue et les personnes qui l'écoutent, stimuler la créativité; en fin de compte, au service la musique.

string 6	82,4	E	string 2	246,9	B
	87,3	F		261,6	C
	92,5	F# / Gb		277,2	C# / Db
	98,0	G		293,7	D
	103,8	G# / Ab		311,1	D# / Eb
string 5	110,0	A	string 1	329,6	E
	116,5	A# / Bb		349,2	F
	123,5	B		370,0	F# / Gb
	130,8	C		392,0	G
	138,6	C# / Db		415,3	G# / Ab
string 4	146,8	D		440,0	A
	155,6	D# / Eb		466,2	A# / Bb
	164,8	E		493,9	B
	174,6	F		523,3	C
	185,0	F# / Gb		554,4	C# / Db
string 3	196,0	G		587,3	D
	207,7	G# / Ab		622,3	D# / Eb
	220,0	A		659,3	E
	233,1	A# / Bb		698,5	F
				740,0	F# / Gb
				784,0	G
				830,6	G# / Ab
				880,0	A
				932,3	A# / Bb
				987,8	B

Notes de la gamme, touche de la guitare et fréquences relatives.

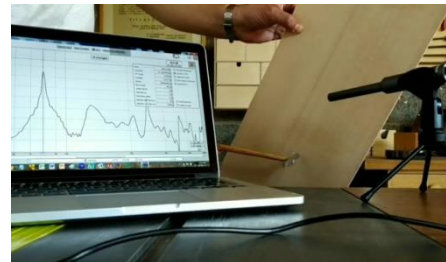
Quelles applications possibles ?

Dans le tableau à côté sont indiquées les notes de l'échelle tempérée en fonction de la position sur la touche et des cordes de la guitare acoustique, et les fréquences correspondantes : les différences de fréquence entre les demi-tons dans les deux premières octaves sont comprises entre 4.9 Hz et 18 Hz. Pour réduire l'intensité de tout "wolf tones", notes loup, il est nécessaire de placer les résonances principales de l'instrument exactement entre les deux notes contiguës de l'échelle tempérée, avec une précision d'environ 1 Hz¹. Il est extrêmement difficile de réaliser un tuning

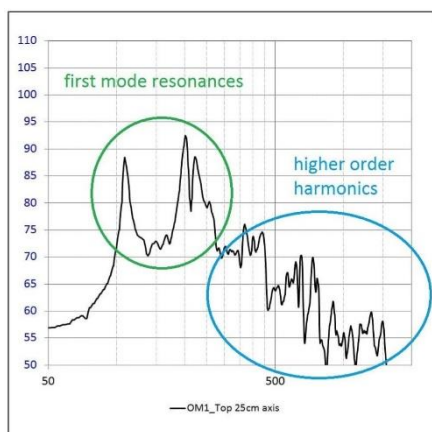
¹ Trevor Gore; *Contemporary acoustic guitar design and build*, section 1.4.7, Mechanical impedance.

aussi délicat à l'oreille. Au contraire, c'est précisément le domaine où la mesure excelle, permettant d'identifier les résonances avec précision et rapidité.

On dit souvent que "la meilleure guitare (selon un critère de puissance) est celle qui vit sur le fil de l'auto-destruction, tellement légère sa construction"; mesurer les caractéristiques du bois par analyse acoustique du tap-test permet d'obtenir des données mécaniques très précises, qui peuvent être utilisées pour optimiser l'ingénierie de l'instrument. Au fil du temps, la base de données des matériaux deviendra de plus en plus riche, et permettra également de suivre les évolutions éventuelles des caractéristiques des bois à la suite du vieillissement, de l'hygrométrie et de la température.



Mesure du premier mode longitudinal avec microphone USB Umik-1 e logiciel REW



Réponse en fréquence guitare acoustique OM, en évidence les premiers modes et les modes d'ordre supérieur.

La mesure de la réponse en fréquence de la guitare acoustique peut être considérée comme l'empreinte digitale de l'instrument, sa carte d'identité; elle donne des informations sur l'équilibre du timbre, les dimensions perçues au son, la puissance acoustique et la complexité du timbre. Elle permet de positionner correctement les fréquences des résonances fondamentales par rapport à la gamme tempérée jouée sur la touche de l'instrument, minimisant ainsi la production de notes loup et améliorant l'intonation de l'instrument. Elle permettra de construire une archive très précieuse des instruments construits pour mettre en relation les dernières constructions avec les plus anciennes, en associant le souvenir d'un son avec des données objectives et comparables.

Nous nous limitons actuellement à ces trois simples exemples d'application, convaincus qu'une fois la porte ouverte à l'approfondissement de l'approche analytique et une fois les fondamentaux de l'analyse acoustique appréciés, mille nouvelles possibilités s'ouvriront. La tâche du présent article est d'introduire la technique de mesure acoustique et la présentation d'une configuration de mesure simple, efficace et économique, destinée au luthier qui connaît déjà l'instrument acoustique mais n'a jamais eu la possibilité de rencontrer une approche technique.

Théories du son et de sa propagation

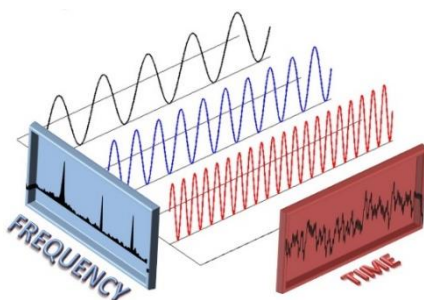
Le son, tel qu'il est perçu par notre audition, est constitué de vibrations qui se propagent dans l'air comme des ondes acoustiques, atteignent le système auditif et sont transformées par notre cerveau en perception ; les fréquences de ces vibrations sont classiquement comprises entre 20 Hz (20 oscillations par seconde) et 20 kHz (20.000 oscillations par seconde). Au-

dessous de cette plage se trouvent les infrasons, véritables vibrations telluriques, et au-dessus des ultrasons, qui ne sont perceptibles que par certains animaux. Le son voyage dans l'air à environ 344 mètres par seconde, et dans d'autres moyens (comme la table d'harmonie d'une guitare acoustique) avec une vitesse déterminée par la densité et la rigidité du matériau qui compose le même milieu : plus le matériau est souple et dense, plus le son se transmet lentement à l'intérieur, et vice versa. La vitesse du son dans le caoutchouc est de 60 mètres par seconde, dans l'épicéa d'environ 5500m le long de la fibre et 1500m à travers la fibre ; dans le Béryllium le son voyage à 12000 mètres par seconde. Des ondes acoustiques sont générées quand une surface vibre, et transmet ces vibrations à l'environnement : lorsque les cordes sont pincées par les doigts, elles exercent une force sur le chevalet (sous forme d'ondes longitudinales et transversales) et donc sur la table d'harmonie, qui à son tour s'active en vibrations et produit du son. La grande surface vibrante de la table d'harmonie est capable d'activer une quantité importante de particules d'air, et donc de générer des ondes acoustiques d'intensité utile pour percevoir un son doté de volume et de projection (par rapport au volume généré par les cordes seules) surtout dans les fréquences contiguës aux résonances principales de la table d'harmonie (et de la résonance du volume d'air contenu dans la caisse). Le niveau de pression acoustique (le volume perçu d'un son donné) est mesuré par le rapport entre le seuil du silence (le son le plus bas perceptible par un jeune homme ayant une très bonne audition) et une certaine pression acoustique de niveau supérieure. Le seuil du silence est établi par convention à 20 microPa (le Pascal étant l'unité de mesure de la pression), et pour exprimer ce rapport on utilise l'unité de mesure décibel SPL (dB SPL). Le dB est une unité de mesure logarithmique, et est adapté pour décrire la sensation de volume d'un son précisément parce que notre ouïe a une sensibilité exceptionnelle, de bruits de très faible intensité à un éclair tombé à proximité. Une conversation normale se déroule autour de 60 dB (0.02 Pa), le son d'un système stéréo à haut volume à 90 dB (0.63 Pa), un éclair à 130 dB (63.2 Pa), le moteur d'un Jet à 150 dB (632 Pa). Si le ciel nous tombait sur la tête le niveau sonore serait de 194 dB (100 237 Pa, la pression atmosphérique au niveau de la mer). Un doublement de la puissance acoustique équivaut à +3 dB SPL.

dB	potenza	ampiezza
100	10 000 000 000	100 000
90	1 000 000 000	31 600
80	100 000 000	10 000
70	10 000 000	3 160
60	1 000 000	1 000
50	100 000	310
40	10 000	100
30	1 000	31
20	100	10
10	10	3
6	4	2
3	2	1,4
1	1,26	1
0	1	1

Conversion entre dB, rapport de puissance, rapport d'amplitude.

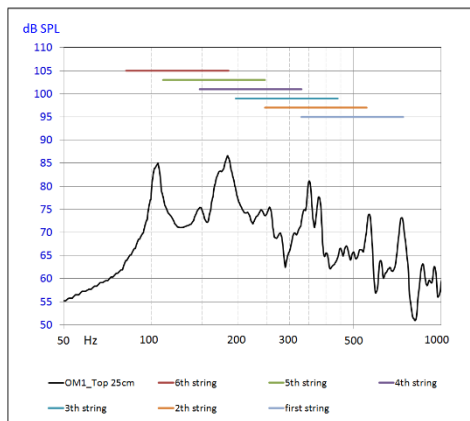
Comment représenter le son ?



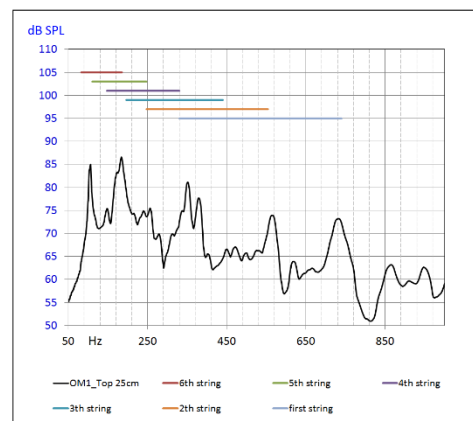
Relation entre le domaine temporel et fréquentiel.

Il existe principalement deux méthodes possibles pour représenter un son dans un graphique cartésien : dans le domaine du temps et dans le domaine de fréquence. Dans le premier cas, nous reportons sur l'axe des ordonnées, Y, la valeur de pression acoustique en dB SPL, et sur l'axe des abscisses, X, le temps en secondes. Ce graphique est généralement utilisé pour visualiser des impulsions, et fournit des informations sur la décroissance temporelle d'un son; utile par exemple pour visualiser

les qualités relatives au sustain d'un instrument acoustique. Dans le second cas, on garde toujours l'unité dB SPL sur les ordonnées, tandis que sur les abscisses on reporte la valeur de fréquence, en Hertz (Hz). Ce graphique est utilisé pour analyser le contenu spectral d'un son : l'équilibre dans lequel basses, moyennes et hautes fréquences le composent. On utilise ce graphique pour visualiser la courbe d'une réponse en fréquence d'un haut-parleur hifi ou, comme dans ce cas, d'une guitare acoustique. Il est toujours conseillé de maintenir une échelle logarithmique même sur l'axe des abscisses, car cette échelle s'approche de notre façon de discriminer les différentes fréquences mieux qu'une échelle linéaire, et rend plus facile et immédiate la lecture et l'interprétation.



Axe X logarithmique



Axe X linéaire

Dans les deux graphiques ci-dessus sont affichées : réponse en fréquence guitare OM et intervalles de fréquences des six cordes d'une guitare acoustique dans les six premières cases. La comparaison de l'échelle X logarithmique VS linéaire montre que l'échelle logarithmique est plus adaptée au système auditif de l'homme : l'espacement des six notes est homogène, et les résonances principales de la guitare peuvent être clairement distinguées tout au long de la gamme de fréquences.

Enfin, il est très important de régler correctement les échelles des deux axes : les valeurs optimales sont obtenues lorsque le graphique occupe tout l'espace disponible de manière lisible, et il est donc possible de discerner facilement les données les plus intéressantes à un premier regard : pour l'analyse d'une guitare acoustique, la zone de fréquence la plus intéressante se situe entre 50 et 1000 Hz, et 50 à 60 dB sur les ordonnées, cela offre un espacement correct. Il est en outre toujours conseillé, dans la mesure du possible, d'adopter toujours la même échelle des deux axes, pour avoir la facilité de comparaison entre différentes mesures effectuées à différents moments ; faites toujours attention aux valeurs de l'échelle de référence des axes : la même courbe peut apparaître très différente (et être mal interprétée) si elle est présentée sur différents axes.

Le setup de mesure

Le système de mesure proposée dans ce document a été assemblé selon des critères d'économie, d'efficacité et de simplicité d'utilisation ; il utilise seulement deux composants principaux (PC et microphone USB) aucun calibrage n'est requis, occupe un espace minimal et peut également être utilisé comme un système



portable, en utilisant les batteries du PC. Le microphone proposé est le modèle Umik-1 Minidsp: <https://www.minidsp.com/products/acoustic-measurement/umik-1> disponible en vente sur Internet sur différents sites à un prix d'environ 100 euros, est un microphone de mesure omnidirectionnel connecté via USB avec convertisseurs AD intégrés. On le connecte au PC, et il est prêt à l'emploi. Un fichier d'étalonnage est également disponible sur le site du fabricant, ce qui est certainement une donnée très utile ; par curiosité, j'ai utilisé un calibre professionnel Neumann très coûteux, qui m'a permis de vérifier sur mon Umik-1 une seule erreur de 0.3 dB par rapport au niveau de référence, une excellente performance par rapport au prix. Si vous avez déjà à la maison d'autres microphones destinés à des prises musicales, laissez-les de côté ; l'investissement nécessaire pour se doter d'un vrai microphone de mesure est dans ce cas minimal, et l'absence d'interface supplémentaire à interposer vers l'entrée de l'ordinateur simplifie énormément l'utilisation du système en atelier. En ce qui concerne l'ordinateur, je pense que vous pouvez utiliser n'importe quel produit qui dispose d'une prise USB libre ; on suggère évidemment un ordinateur portable, plus pratique pour une utilisation en atelier et pour la portabilité, toujours utile. Le logiciel d'analyse qu'on recommande est REW (Room EQ Wizard), un logiciel freeware qui peut être téléchargé à cette adresse: <https://www.roomeqwizard.com/> disponible pour plateforme OSX et Windows.

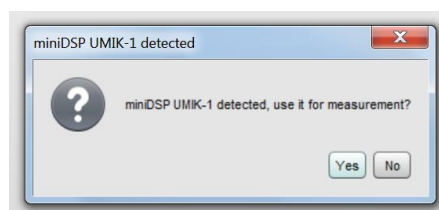


La mise en place du système est simple : du site Minidsp nous téléchargeons le fichier d'étalonnage personnalisé du microphone: <https://www.minidsp.com/products/acoustic-measurement/umik-1>

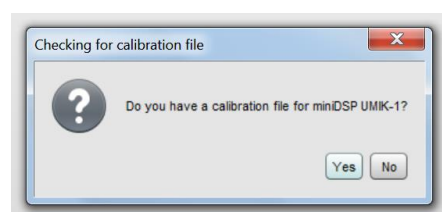
Calibration file download

Serial number: -

Ce fichier est déjà formaté pour être utilisé avec REW. Vous connectez donc le microphone à une prise USB, vous lancez le programme, et le message apparaît immédiatement

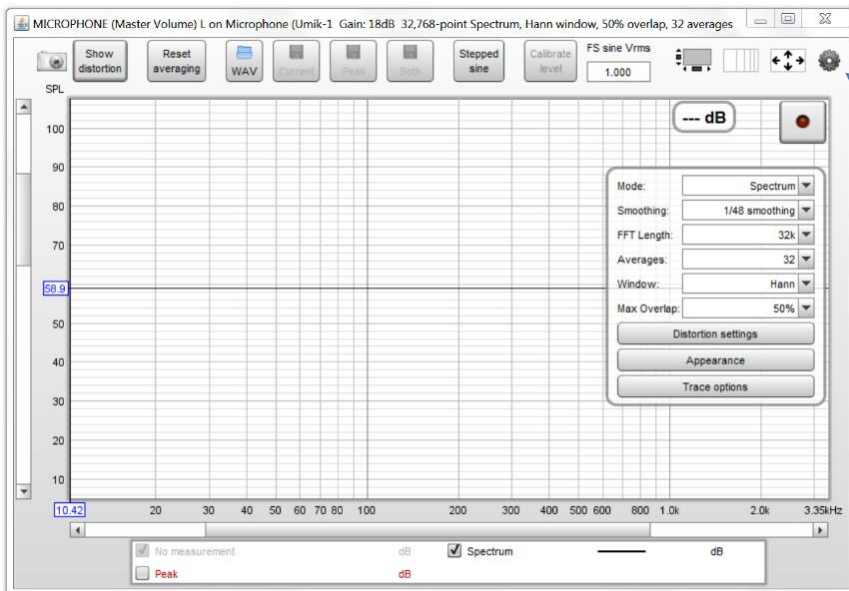
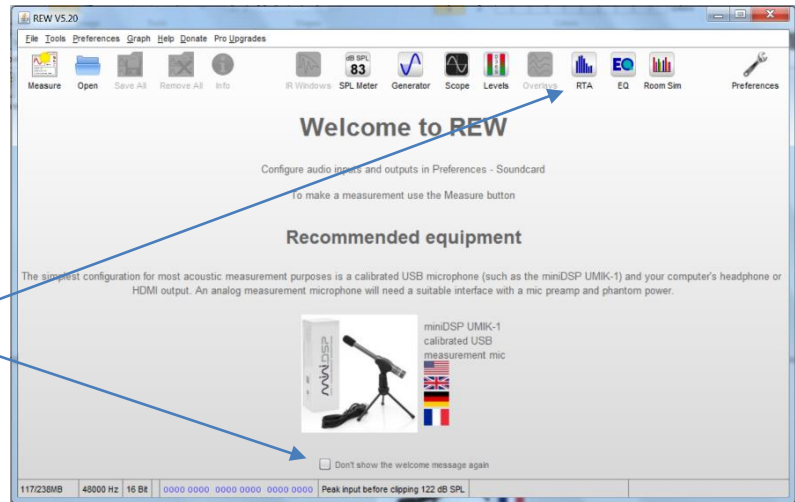


À qui nous répondrons oui, pour voir apparaître immédiatement le message



À qui nous fournirons le lien du fichier de calibrage précédemment enregistré dans notre dossier de mesures. Nous voici maintenant dans l'écran principal :

Le logiciel offre plusieurs fonctionnalités que nous n'utiliserons pas actuellement, et nous pouvons ignorer : on coche la case et on lance directement la fonction RTA (Real time analysis), le seul outil de REW que nous utiliserons pour nos mesures.



En haut à droite, nous trouvons le bouton Préférences, qui ouvre la fenêtre sur laquelle nous allons entrer les paramètres suivants :

- **Mode:** spectrum
- **Smoothing:** pour obtenir une vue légèrement plus propre, nous choisissons *1/48 octave*. Pas plus, sinon les pics deviendraient trop émousés et nous perdrons des informations utiles.
- **FFT length:** règle le nombre d'échantillons utilisés pour effectuer le calcul de la FFT, nous trouvons le meilleur équilibre en choisissant *32k*.
- **Averages:** permet d'effectuer des moyennes entre une quantité déterminée de mesures, pour obtenir une courbe stable et répétable nous choisissons *32* mesures.
- **Windows:** est le type de fenêtre de saisie temporelle utilisée dans le calcul de la FFT, nous choisissons *Hann*.
- **Max overlap:** allège le processeur limitant la charge de calcul de la FFT, nous choisissons *50%*.

Le système est prêt.

Comment effectuer la mesure

Il existe plusieurs techniques permettant d'effectuer des mesures de réponse en fréquence d'instruments acoustiques, mais il n'existe pas de normes reconnues et partagées ; à partir des années 1960 plusieurs études ont été menées à ce sujet², avec des résultats toujours intéressants du point de vue technique, mais très souvent insatisfaisant en termes de simplicité d'exécution et versatilité. La méthode qu'on propose dans ce tutoriel a été optimisée en tel sens avec un investissement minimum, et se base sur la mesure acoustique du spectre obtenu par percussion de l'instrument avec un petit marteau au chevalet. Ce type de mesure s'appelle « analyse modale » et est largement utilisée en architecture et ingénierie ; quand le marteau frappe le chevalet de la guitare une impulsion de courte durée fournit de l'énergie à la structure, qui est donc placée en vibration ; il est important que l'énergie fournie soit constante dans l'arc de fréquences qui nous intéressent pour notre analyse (environ 50-2000 Hz), que l'énergie totale fournie par le marteau à la table d'harmonie soit constante au long de la mesure - pour pouvoir comparer différentes mesures effectuées sur différents instruments - et que la structure soit toujours sollicitée dans la même zone modale (pour exciter les mêmes modes de résonances).

Voici les paramètres d'exécution les plus importants :

Le microphone doit être dirigé vers le chevalet de l'instrument à environ 25 cm de distance, à environ 80 cm du sol (idéal le placement sur le bord d'une table).

L'instrument doit être accordé, les cordes doivent être amorties par de la mousse interposé : Trevor Gore utilise pour ce faire des bouchons d'oreilles, et je trouve que c'est un choix très fonctionnel.



Voici comment nous effectuons des mesures de réponse en fréquence dans notre atelier.

L'instrument doit être suspendu du sol, et la caisse harmonique libre de vibrer sur tous les côtés (vous pouvez le tenir par le manche avec votre main libre).

Une fois que vous appuyez sur le bouton de démarrage mesure (en haut à droite) vous allez commencer la percussion avec des impacts délicats ; la mesure va durer environ 15 secondes, et on donne environ deux impacts par seconde. La courbe finale est la moyenne de tous les impacts réalisés. Pendant la percussion, il est conseillé d'observer que l'instrument reste à la même distance du microphone et que la mesure sur le moniteur de l'ordinateur, placé à côté, soit stabilisée. À la fin de cette série d'impacts, on pose le marteau et on arrête rapidement la mesure en utilisant le même bouton.

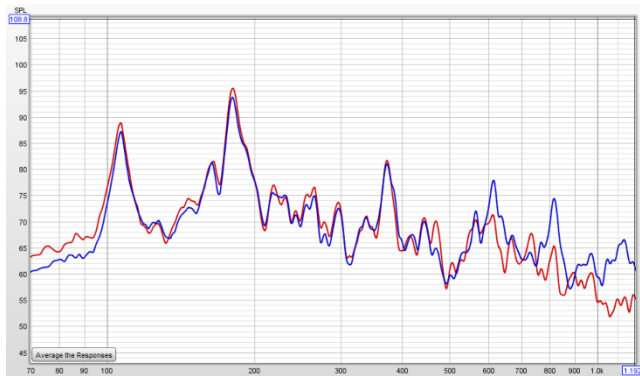
² C'est presque impossible de lister tous les systèmes de mesure expérimenté dans plus de 50 ans de recherche dans le domaine de l'instrument acoustique ; les outils développés en France chez l'Université du Maine, le PAFI (Plateforme d'aide à la facture instrumentale) en représente une synthèse très complète : <https://pafi.univ-lemans.fr>

En détail quelques indications pratiques pour effectuer une mesure correcte :

Le type de marteau utilisé a une influence sur la mesure ; les paramètres importants sont le poids et la matière qui percute le bois ; le type que je préfère est le modèle d'horloger de 25 grammes auquel j'ai rajouté une entretoise en caoutchouc rigide. Avec ce type de marteau on obtiens une bande passante qui permet d'analyser aisément tous les modes de résonances, jusqu'au plus élevé en fréquence. Une deuxième possibilité qu'on suggère c'est d'utiliser un morceau de gomme Mars plastic Staedtler avec un petit baton ; la souplesse de la matière de ces gommes limite l'extension sur les fréquences élevées, mais l'impact avec la table est plus doux et rassurant ; je suggère de commencer avec ce type de marteau, et si vous avez besoin d'analyser les résonances plus



Marteau d'horloger, environ 25 grammes, et marteau avec un morceau de gomme Mars plastic Staedtler.



Bleu : marteau horloger avec pointe en caoutchouc rigide
Rouge : marteau avec tête en gomme : les résonances à 610 et 820 ne sont pas claires.

hautes en fréquence, considérez d'utiliser le premier type de marteau décrit. Une fois votre marteau choisi, utilisez toujours le même, pour maintenir la cohérence dans la mesure sur tout le spectre de fréquences et sur les différents instruments qui iront construire votre base de données.

La force à utiliser est légèrement supérieure à celle d'un tap-test, effectué avec les doigts. Le microphone est assez proche pour obtenir un excellent rapport

"signal/bruit de fond". Essayez de vous entraîner pour obtenir des impulsions stables le long des 32 moyennes, qui durent environ 15 secondes.

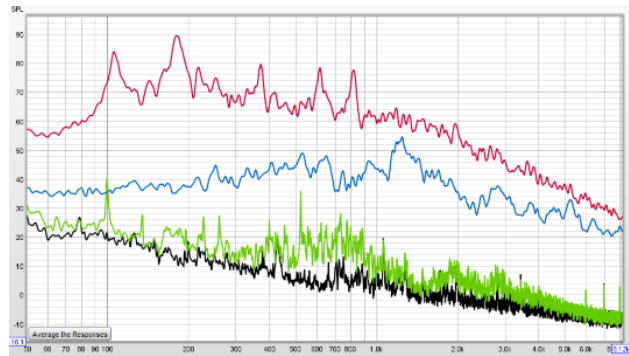


Zone du chevalet à percuter avec le martelet

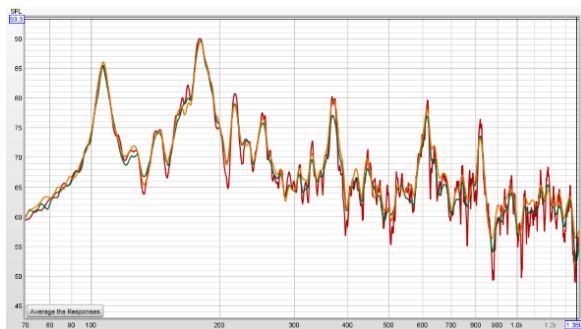
L'endroit où frapper avec le marteau est le chevalet, autour du sillet et des chevilles. En fonction de la forme des modes de résonance d'ordre supérieur, vous remarquerez un changement de courbe de réponse dans les fréquences supérieures à 200 Hz en vous déplaçant sur les ailes du chevalet, ou même en dehors du pont. Par souci de cohérence de mesure, nous suggérons de rester toujours dans la zone centrale comme le montre la figure.

Dans ce type de mesure le bruit de fond (la radio, un ventilateur, etc) est recueilli par le microphone et peut polluer le resultat ; vérifiez de mesurer dans un endroit suffisamment silencieux.

Un peu de pratique et de confiance acquise vous permettra d'effectuer des mesures précises et répétables (un des critères les plus importants de la méthode scientifique). La tolérance en fréquence de la mesure d'une résonance doit rester comprise entre $\pm 0,5$ Hz et celle de niveau moyen d'une courbe autour du ± 1 dB sur toute la bande.



Noir : bruit de fond
Vert : ventilateur allumé
Bleu : réponse guitare électrique solid-body
Rouge : réponse guitare acoustique OM



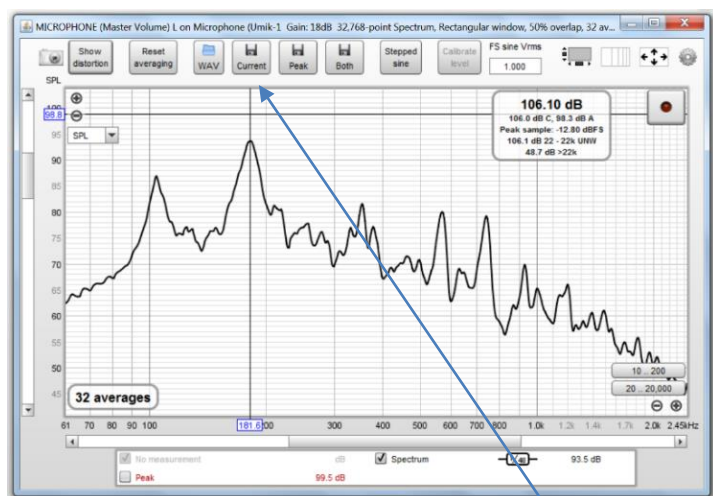
Trois mesures du même instrument répétées à de courts intervalles.

Au moment où vous êtes sur le point d'effectuer une mesure, vous devriez déjà avoir à l'esprit une idée indicative du résultat que vous allez obtenir, et à chaque fois observez immédiatement la forme de la courbe obtenue : est-elle semblable à ce qu'on attend ? Les fréquences sont-elles correctes ? Les niveaux de la courbe obtenue sont-ils raisonnables et cohérents avec d'autres mesures similaires ? À la base d'une base de données de mesure valable se trouve le principe que toutes les

mesures répertoriées ont été validées parce qu'elles étaient correctes, propres, précises. Si vous avez des doutes revenez en arrière, vérifiez que tout est en ordre, répétez la mesure.

Gardez si possible une guitare de référence toujours disponible, ainsi qu'une mesure correcte, et en cas de doute utilisez-la pour vérifier que votre configuration de mesure fonctionne correctement. Vous remarquerez comment une guitare peut être stable dans le temps, et vous pourrez vérifier ses légères modifications selon l'hygrométrie du moment.

Si tout va bien, nous devrions à ce stade voir sur l'écran de l'analyseur RTA une courbe semblable à celle-ci : en appuyant sur la touche "current" nous

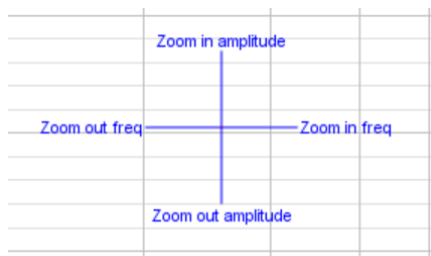


sauvons la courbe dans l'écran principal, à partir de laquelle vous pourrez enregistrer dans notre base de données, ou afficher avec d'autres courbes.

Quelques indications sur les fonctions les plus utiles de l'écran principale :

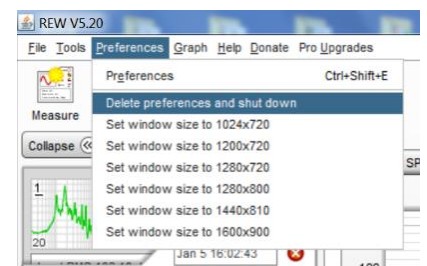
The screenshot shows the REW software interface with several callout boxes pointing to specific features:

- Enregistrer la mesure sous**: Points to the 'Save All' button in the top toolbar.
- Modifie la couleur de la courbe**: Points to the 'SPL & Phase' menu option.
- Affiche la seule mesure actuelle**: Points to the 'SPL' menu option.
- Affiche toutes les mesures chargées**: Points to the 'All SPL' menu option.
- Barres de zoom du graphique**: Points to the zoom controls at the bottom of the graph.
- Sélectionne la courbe à afficher**: Points to the 'Average the Responses' button at the bottom of the graph.



On signale une fonction très pratique d'adaptation de zoom du graphique : en pressant et en maintenant enfoncé le bouton central de la souris (que je recommande d'utiliser, elle est très utile même pour démarrer et arrêter la mesure) l'instrument de zoom dynamique apparaît, que vous pouvez adapter en déplaçant la souris dans les quatre directions.

Si vous êtes dans une situation d'incertitude, les mesures vous semblent étranges, vous avez modifié les paramètres du logiciel sans vous rappeler exactement quoi, Il existe une fonction qui vous permet de réinitialiser tous les paramètres et de revenir exactement à la configuration standard après la première installation. Cette fonction se trouve dans la section des préférences du menu principal.



Il est enfin possible d'exporter les courbes pour une éventuelle post-production en format texte par la fonction "export" du menu principal.

Comment lire la mesure

Une fois que nous aurons obtenu un graphique correct, stable et répétable, nous pourrons nous consacrer à son analyse et entrer dans les détails. Chaque instrument affichera évidemment des caractéristiques individuelles, mais toutes les guitares acoustiques (au moins celles qui partagent la structure de base de cet instrument) ont des points communs :

Le premier pic qu'on rencontre, $T(1,1)_1$, est dû à la résonance du volume d'air, qui émet par le trou dans la table. Ce mode est aussi connu comme $A0$.

Le deuxième pic de la courbe, $T(1,1)_2$, est la première résonance de la table d'harmonie, le monopole. Ce mode est aussi connu comme $T1$.



Dans le cas d'instruments où le fond est actif (suffisamment léger pour être placé en vibration par la résonance interne, et assez proche en fréquence) on remarquera un pic $T(1,1)_3$, habituellement juste au-dessus du pic $T(1,1)_2$. Ce mode peut aussi être identifié comme $B1$.



Parfois l'apport du fond dans la courbe de réponse est ambigu ; pour confirmer sa fréquence de résonance nous conseillons d'effectuer une mesure dans le champ proche du fond (voir paragraphe suivant). La nomenclature des modes de résonance n'est pas univoque, en absence d'un standard international reconnu ; dans ce document on utilise la nomenclature développée au sein du groupe de recherche en acoustique musicale de l'université de Cardiff à partir des années 1980 environ³, qui nous semble la plus complète pour la guitare acoustique et la plus utilisée dans la communauté internationale. **D'autres nomenclatures sont toutefois largement utilisées pour instruments quatuor et acoustiques, depuis des études de Ian Firth⁴, jusqu'aux nombreuses publications de l'Université du Maine, sous l'égide de François Gautier⁵. On reviendra sur ce sujet dans le futur.**

³ B. E. Richardson; *A physical investigation into some factors affecting the musical performance of the guitars*, 1982; *Input admittance and sound field measurements of ten classical guitars*, 2002

⁴ Ian M. Firth; *Physics of the guitar at the Helmholtz and first top-plate resonances*, 1976

⁵ F. Gautier, N. Dauchez; *Acoustic intensity measurements of the sound field radiated by a concert harp*, 2004

Selon le schéma de barrage utilisé dans l'instrument, une série de pics supplémentaires entre 300 et 1000 Hz peuvent apparaître, générés par des modes d'ordre supérieur ; pour approfondir l'analyse des modes de résonance il sera possible d'effectuer de visualiser les patterns de Chladni (une mesure très intéressante, dont je développe un setup dédié et qui fera l'objet d'un prochain tutoriel).



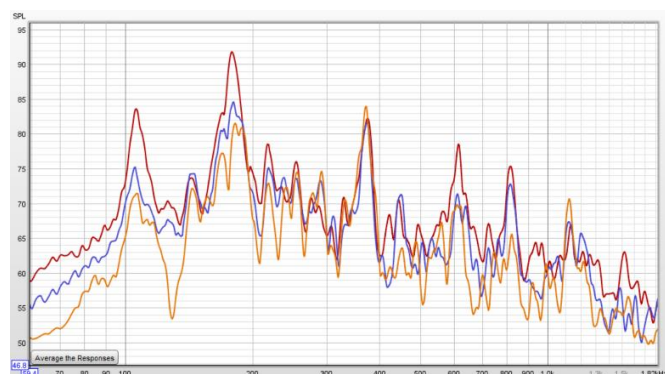
Modes de résonance d'ordre supérieur d'une guitare avec structure de barrage de type X Martin.

Voici une table synthétique qui fournit les fréquences les plus courantes sur lesquelles se positionnent habituellement les trois premiers modes de résonance pour trois instruments différents : guitare classique, guitare acoustique, guitare archtop acoustique. Ces fréquences sont liées à la taille du corps, à la structure physique, au son que les musiciens recherchent habituellement dans ces instruments. Il s'agit d'un point de départ qui peut fournir des références à ceux qui commencent à mesurer des instruments acoustiques.

résonance air T(1,1)1		
classique	folk	archtop
90 - 110 Hz	80 - 110 Hz	100 - 150 Hz
résonance table harmonie T(1,1)2		
classique	folk	archtop
190 - 220 Hz	160 - 200 Hz	200 - 250 Hz
résonance fond T(1,1)3		
classique	folk	archtop
230 - 250 Hz	220 - 240 Hz	250 - 300 Hz

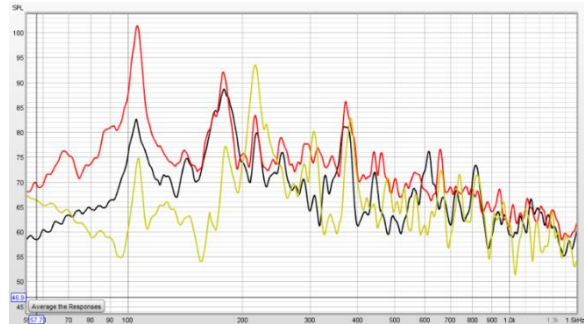
Champ proche ou champ lointain ?

La distance entre le microphone et la source sonore joue un rôle très important. On considère le microphone dans le champ proche lorsque la distance par rapport à la source est inférieure à la plus grande dimension de la surface émettrice du son; inversement, on considère le microphone placé dans le champ lointain. Pour obtenir une mesure adhérente au réel de l'émission acoustique d'une guitare il serait



Mesures à différentes distances du même instrument : rouge - 25cm, bleu - 50cm, jaune - 1m. Lorsque la distance augmente, les réflexions de l'environnement salissent la courbe et la rendent moins lisible. Notez l'équilibre différent de la courbe rouge par rapport à la courbe jaune, surtout dans les modes d'ordre supérieur.

donc nécessaire de placer le microphone plus loin des 25cm que je suggère dans ces pages; mais cette configuration nécessiterait un environnement avec un traitement acoustique qui réduise les réflexions des murs, pour obtenir une mesure propre et lisible. Dans le cas contraire - la situation que l'on retrouve habituellement dans un atelier de lutherie - on conseille de rester à environ 25cm du centre de la table d'harmonie. Bien sûr, si l'environnement de mesure le permet, vous pouvez faire des choix différents, ce qui est important - une fois que vous avez établi votre propre norme - c'est d'utiliser la même configuration pour toutes les mesures, pour avoir la possibilité de faire des comparaisons correctes. En attendant la définition d'une norme partagée au sein de la communauté de la lutherie.



Le même instrument mesuré avec différentes positions du microphone : rouge - au fil de l'ouverture de la caisse, en évidence la résonance $T(1,1)_1$, noir - 25cm du chevalet, jaune - à 2cm du centre du fond, en évidence la résonance $T(1,1)_3$.

Se rapprocher encore plus de l'instrument est certainement possible, et il est même conseillé dans le cas où l'on souhaite étudier des résonances très localisées, ou confirmer l'origine de certains pics de la réponse, comme dans le cas de l'apport de la résonance de l'air $T(1,1)_1$ (avec le microphone placé sur le fil de l'ouverture de la caisse), ou dans le cas de l'émission du fond et de son mode $T(1,1)_3$.

Comment interpréter la mesure

Comment donc corréler la courbe de réponse en fréquence d'un instrument avec le son ? Quel type d'information ça nous donne ? Les informations présentes dans cette courbe sont très nombreuses, de nature variée, et permettent d'approfondir la connaissance de l'instrument de plusieurs manières ; il s'agit d'un vaste sujet, encore en grande partie inexploré, dans lequel nous pouvons trouver des points fermes :

Identifier les résonances principales et les mettre en relation avec les notes du clavier vous permet d'effectuer un tuning très fin et de réduire les notes loup de manière drastique. Les petites différences entre différents instruments d'un même modèle peuvent être réduites, afin d'avoir une offre plus constante pour le client.

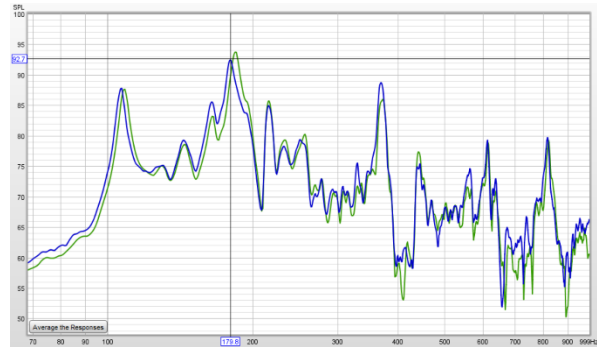
Voici un exemple pratique de tuning effectué sur une guitare acoustique à l'aide de la mesure de la réponse en fréquence. Une fois la construction terminée, l'analyse de la courbe a montré un positionnement des modes presque parfait, et correspondant aux paramètres de projet ; la note du Fa#, quatrième touche de la quatrième corde, montrait cependant une résonance gênante, et un son moins propre et brillant que désiré. Ce comportement est assez fréquent, et il est l'indice de la résonance principale encore mal positionnée sur l'échelle : quand $T(1,1)_2$ est placé trop proche de la fréquence d'une note, l'énergie mécanique est absorbée



La résonance principale de la table d'harmonie, le monopole $T(1,1)_2$

très rapidement par la table d'harmonie, et cette même note sonne fermée, bouchée, sombre⁶.

Cet instrument utilise un barrage de type Martin X, et à travers le trou central nous avons donc réduit de quelques dixièmes de mm la hauteur des barres au scalloping de la X, en augmentant ainsi la souplesse et en abaissant la résonance de la table de résonance, qui est passée de 184 Hz à 179.8 Hz (soit entre le F à 174.6 Hz et le F# à 185 Hz). La note incriminée est redevenue propre et précise, comme les notes contiguës. Ici à côté la réponse avant et après l'intervention, il convient également de noter que :



Courbe de réponse d'une guitare acoustique avec barrage de type X Martin avant et après augmentation du scalloping des X principaux.

- Même la fréquence du mode $T(1,1)_1$ a baissé de quelques Hz de 108.1 à 106.5 Hz. Encore loin du Sol# à 103.8 et du La à 110 Hz, donc ok. Ce comportement dépend de l'accouplement réciproque de toutes les résonances principales, et doit toujours être considéré en cas d'opérations de réglage.
- Le premier mode évident d'ordre supérieur $T1,2$, le long dipole, a augmenté de 3dB d'amplitude, de 85.8 à 88.6 dB, environ un doublement de puissance acoustique ; ce changement est dû au fait que dans le bracing de type X Martin, la modification de la compliance obtenue par réduction de hauteur du scalloping modifie non seulement la compliance longitudinale, mais aussi la compliance latérale, et a donc aussi une influence sur les modes d'ordre supérieur comme le $T1,2$, qui caractérise clairement les guitares acoustiques avec ce type de barrage.



Le premier mode d'ordre supérieur $T1,2$, généré par les "tone braces" présentes dans la zone inférieure de la table.

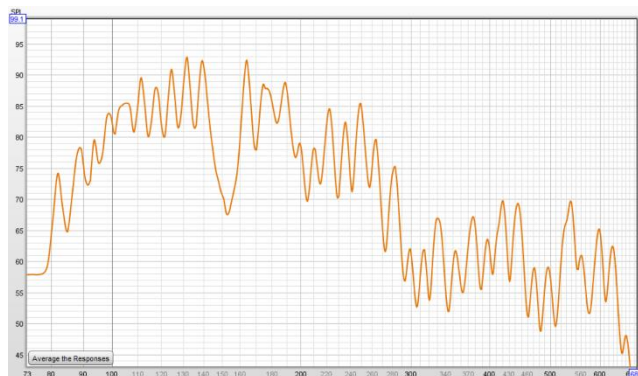
L'analyse de la relation entre les résonances principales et d'ordre supérieur peut fournir des informations très utiles pour comprendre quels éléments participent à une sensation sonore, et comment. La résonance $T(1,1)_1$ du volume d'air est-elle trop élevée en fréquence ? La résonance de la table d'harmonie est-elle trop faible ? Quelle est la distance entre les deux ? Le fond participe-t-il effectivement à l'émission sonore ? Comment ces résonances s'accouplent-elles, et comment les gérer indépendamment ? Tous ces paramètres contribuent à définir le caractère fondamental de l'instrument, et peuvent aider le luthier dans la définition de la prochaine construction, et dans la recherche de sa propre identité acoustique ; on se propose de revenir sur ce sujet à l'avenir.

⁶ Trevor Gore; *Contemporary acoustic guitar design and build*, section 1.4.7, Mechanical impedance.

Autres types de mesure possibles par microphone

Le simple système de mesure que nous apprenons à connaître nous permet également d'effectuer d'autres types de mesure :

En réduisant le nombre de moyennes à 4, en insérant la fonction "peak" (présente dans la barre centrale sous le graphique) et en jouant quelques notes individuelles, vous pouvez alors visualiser la fréquence fondamentale et les harmoniques. Cette courbe fournit des indications très intéressantes sur l'équilibre du timbre de l'instrument, car la première harmonique a un effet très important



sur la sensation de puissance de la fondamentale, et cette mesure permet d'afficher le rapport relatif sur une bande de fréquences assez large. Vous pouvez voir dans le graphique ci-dessus l'influence de la résonance $T(1,1)_1$ sur la propreté des notes contiguës autour de 105 Hz et des harmoniques qui tombent en proximité de $T(1,1)_2$?

De façon similaire, une fois que vous avez enregistré une courbe de réponse et que vous avez sélectionné la première touche toujours dans la barre centrale sous le graphique qui la fixe sur l'écran, vous pouvez "jouer sur" les notes individuelles, pour avoir une référence visuelle sur le son perçu, la sensation perceptive de l'instrument, sa réponse en fréquence et le son émis à ce moment précis.

Bien sûr, le microphone peut également être utilisé pour mesurer les résonances fondamentales des tables en bois : cette mesure permet de visualiser le contenu harmonique du tap-test, et à travers des calculs simples reportés sur une feuille Excel de dériver les paramètres fondamentaux du bois comme le module de Young et l'amortissement.

Conclusions

Une dernière note pour le lecteur qui s'apprête à se lancer dans le monde fantastique de la mesure acoustique, probablement avec méfiance et quelques craintes : je me souviens encore comme si c'était hier des premières mesures effectuées sur une enceinte acoustique DIY, Il y a 25 ans, avec une carte de mesure Clio, Audiomatica, sur laquelle j'avais investi de l'argent mis de côté pour partir en vacances en Espagne avec mes copains; l'étonnement de "voir" le son apparaître sur l'écran de l'ordinateur, le sentiment d'avoir enfin des certitudes sur lesquelles pouvoir m'appuyer et aussitôt après la déception de voir que ces points n'étaient pas du tout stables, mais au contraire ils continuaient à bouger dans toutes les directions. La mesure acoustique, comme d'ailleurs toutes les mesures qui exigent précision et répétabilité, requiert attention, pratique et bonne volonté. Bien que la configuration présentée dans ce document soit très simple et assez solide, les premiers temps passés à côté du microphone et de l'ordinateur seront certainement difficiles et il est important de ne pas se décourager, travailler avec calme, précision et structure. Les résultats vont arriver bientôt, et ça va être le commencement d'une magnifique aventure...

Sorbiers, janvier 2021

L'expérimentateur se trouve sans cesse aux prises avec des faits qui ne sont pas encore manifestés. L'inconnu dans le possible et aussi dans ce qui a été, voilà son domaine. Le charme de nos études, l'enchantement de la science, consiste en ce que, partout et toujours, nous pouvons donner la justification de nos principes et la preuve de nos découvertes.

Louis Pasteur

Merci à mon épouse Chiara pour le soutien constant, à Mattia Cobianchi pour les conseils, à Fred Pons pour la gentillesse et la curiosité (et les corrections du texte).

A propos de l'auteur :

Giuliano Nicoletti est ingénieur électro-acoustique, spécialisée dans le dessin des hautparleur (Hifi, car-audio, PA) ; passionné dès son et de musique depuis sa jeunesse, dans le temps libre il est luthier amateur dans son petit atelier de Sorbiers, près de Saint-Etienne (www.iuliusguitars.com)

Bibliographie:

1. "Physics of the guitar at the Helmholtz and first top-plate resonances", Ian M. Firth, 1976
2. "Input admittance and sound field measurements of ten classical guitars", B. Richardson 2002
3. "Acoustic intensity measurements of the sound field radiated by a concert harp" F. Gautier, N. Dauchez, 2004
4. "Contemporary Acoustic Guitar Design and Build, 2nd Edition", Trevor Gore, Gerard Gilet, https://goreguitars.com.au/main/page_the_book_buy_the_book.html
5. "Getting Started with REW" https://www.roomeqwizard.com/help/help_en-GB/html/gettingstarted.html
6. "Lois du mouvement de Newton", https://fr.wikipedia.org/wiki/Lois_du_mouvement_de_Newton
7. "Résonance de Helmholtz", https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance_de_Helmholtz
8. "Figure de Chladni", https://fr.wikipedia.org/wiki/Figure_de_Chladni