

Caractériser les vibrations d'un instrument à cordes

Vers une harmonisation des paradigmes de prototypages

R. Viala¹ V. Placet² E. Foltête³ S. Cogan⁴

Département Méc'Appli, Institut FEMTO-ST, Université de Franche-Comté, Besançon, France

¹Doctorant, UFC

²Ingénieur de Recherche, UFC

³Professeur, ENSMM

⁴Chercheur, CNRS

JFIS

ITEMM, Le Mans

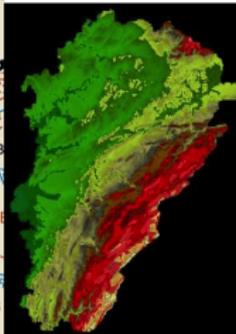
30 novembre - 01 décembre 2015

Table of Contents

- 1 Introduction
- 2 Paradigmes pour le prototypage d'instruments
- 3 Validation du modèle
- 4 Prototypage virtuel exploratoire
- 5 Conclusions

Qui sommes nous?

Franche-Comté



Qui sommes nous?

Besançon



Qui sommes nous?

Département Méc'Appli

Créé en 1962

Personnel

Environ **110 personnes**

- ✓ 40 professeurs et chercheurs
- ✓ 25 techniciens et personnels administratifs
- ✓ 55 doctorants

11 thèmes de recherche

1 Cellule d'Ingénierie et Transfert

4 Pôles Expérimentaux

Vibrations et Acoustique
Microcaractérisation
Mise en Forme
Matériaux et Structures

1 Pôle Numérique



Qui sommes nous?

Romain VIALA, Doctorant

Sujet de la thèse

Aide à la conception d'instruments de musique à cordes

Encadrants

- Vincent PLACET pour la modélisation et l'identification des caractéristiques de matériaux
- Emmanuel FOLTÊTE pour les essais en vibrations
- Scott COGAN pour le prototypage virtuel et la validation de modèle

Partenariats

- Marjan GILANI et Francis SCHWARTZE, EMPA-Dübendorff, ETH-Zurich

Financements

- Bourse de thèse Ministère de l'Enseignement Supérieur
- Reliquats de contrats avec partenaires industriels
- Action COST WoodMusick

Contexte du travail

Problématique luthier



- Fabrication d'instruments à cordes par des méthodes traditionnelles
- Matériaux aux propriétés variables et évolutives
- Environnement compétitif vis-à-vis des instruments fabriqués industriellement

⇒ Le prototypage virtuel comme outil d'aide à la décision pour le luthier?

Aide à la conception d'instruments de musique à cordes

Démarche de la thèse

- 1 Etude du comportement vibratoire et vibroacoustique **basse fréquence**
- 2 Caractérisation des propriétés élastiques et dissipatives des matériaux pour les bois de lutherie → ingrédients essentiels pour la modélisation physique d'un instrument
- 3 Validation expérimentale des modèles sur les assemblages progressivement plus complexes → établir la crédibilité des simulations
- 4 Analyse des phénomènes complexes → exploiter le modèle pour appréhender avec finesse les effets bien connus expérimentalement e.g. bridge hill
- 5 Prototypage virtuel exploratoire avec validation expérimentale → confirmer (ou infirmer) la capacité de la démarche adoptée pour explorer les concepts nouveaux

⇒ Développer un outil logiciel "open source" d'aide à la décision à destination des luthiers

Démarche de la thèse

Moyens mis en oeuvre



- Salle d'essai en vibrations avec vibromètre laser Polytec 3D
- Codes commerciaux de CAO et de modélisation (Solidworks, PATRAN, NASTRAN, MATLAB)
- Outils logiciels développés en interne (MODAN, AESOP, SIMBAD)
- Création d'un atelier de lutherie combinant outillages traditionnels, plateforme d'essai modal et poste de prototypage virtuel

Atelier de lutherie



Prise de décision pour la conception d'instruments à cordes

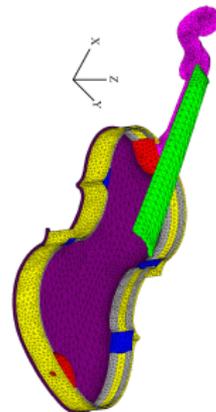
Sur quoi peut-on s'appuyer?



Prototypage traditionnel



Prototypage expérimental

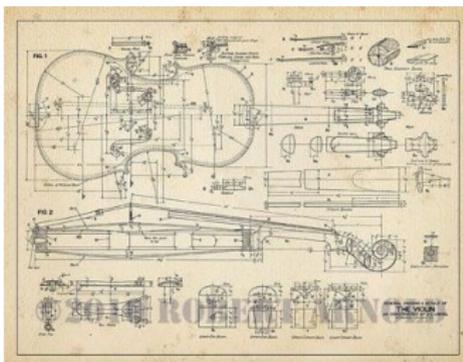


Prototypage virtuel

⇒ Vers une approche de prototypage hybride...

Prototypage traditionnel

Démarche



- Transmission du savoir par l'apprentissage
- Prise en compte directe de la forte variabilité du bois
- Innovation par l'expérience en fonction des besoins
- Création d'instruments unique et inégalée par rapport à une fabrication industrielle
- Approche empirique et qualitative

Avantages et limitations

Avantages

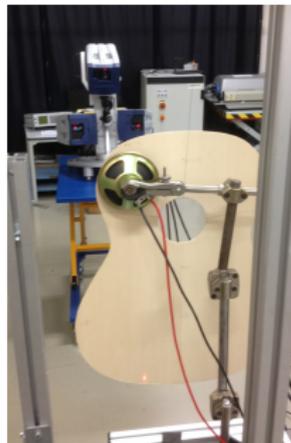
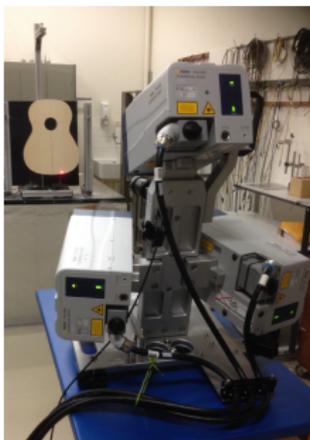
- Savoir faire historique
- Grand nombre d'instruments existants de qualité différente
- Permet de s'adapter aux spécificités du bois pour en tirer le meilleur instrument

Limitations

- Difficulté à vérifier les protocoles de construction d'usage
- Coût important (matière première + temps) pour tester des idées nouvelles
- Difficulté d'extraire des règles de construction → chaque instrument est unique

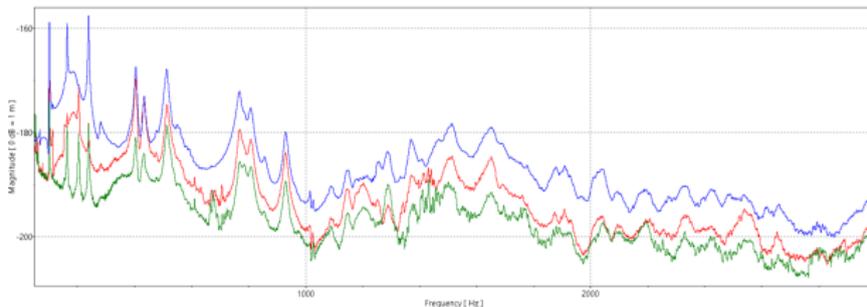
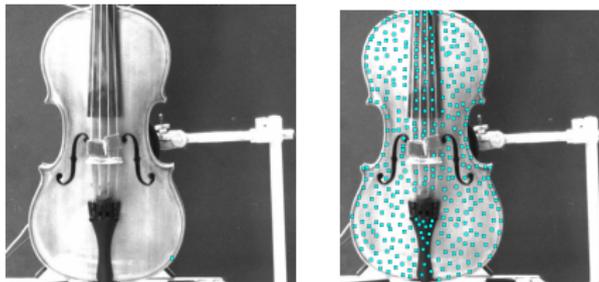
Prototypage expérimental

Démarche



- Effectuer les mesures statiques et dynamiques sur les composants et l'instrument complet
- Construire des bases de données pour la caractérisation détaillée des matériaux
- Fournir des données pour la validation des modèles numériques
- Approche quantitative

Essais en vibrations

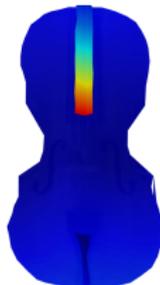


- Violon monté avec cordes étouffées
- Essai sans contact avec excitation acoustique [0 5000] Hz

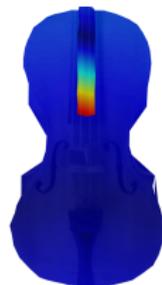
Modes opérationnels



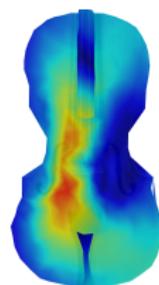
100.8 Hz



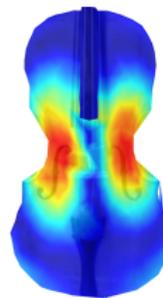
163.3 Hz



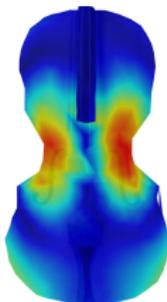
239.1 Hz



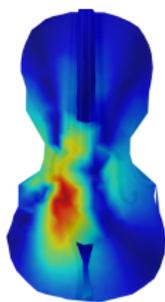
281.2 Hz



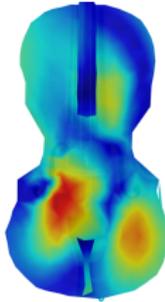
403.9 Hz



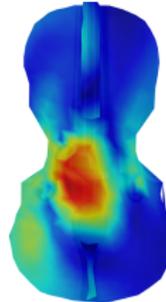
432.9 Hz



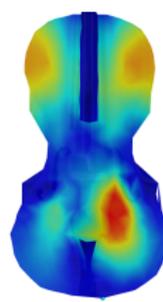
513.3 Hz



768.7 Hz



807.1 Hz



928.9 Hz

Avantages et limitations

Avantages

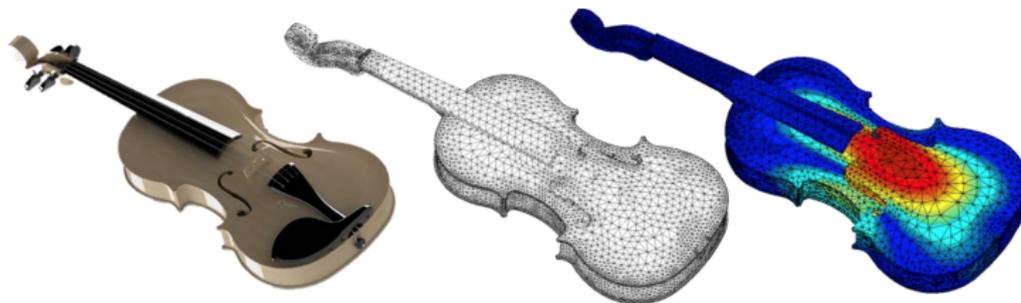
- Résultats quantifiés, e.g. fréquences propres, champs de déplacement, variabilité entre échantillons
- Etudes comparatives possibles entre plusieurs instruments
- Possibilité de développement d'essais dédiés → protocoles de fabrication quantifiables

Limitations

- Equipements sophistiqués de mesure très coûteux
- Comment formuler les objectifs sur un composant?
- Equipements ergonomiques mais efficaces disponibles → voir projet *Aide à la facture Instrumentale PAFI*, F. Gautier, Université de Maine

Prototypage virtuel

Démarche

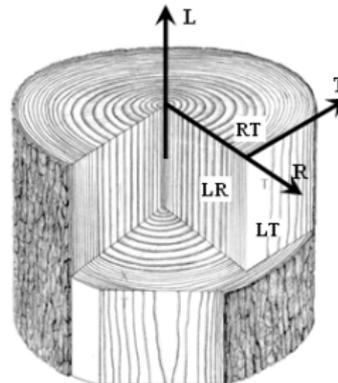
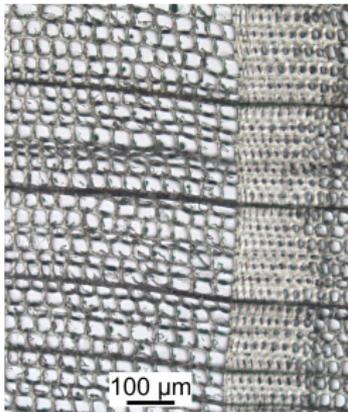


- Modèles numériques détaillés basés sur les lois de la physique
- Etudes sur les composants "virtuels"

⇒ Proposer sans imposer des protocoles de construction

Prototypage virtuel

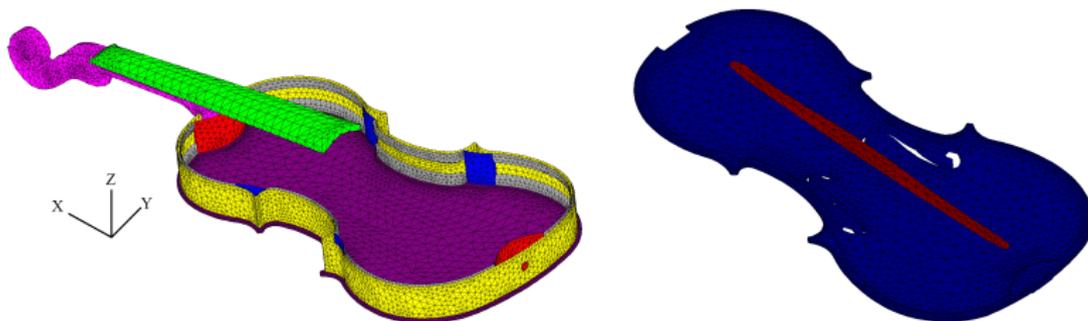
Modélisation du matériau



- Matériau complexe, avec des directions prépondérantes
- Besoin de propriétés pour alimenter des modèles plus précis

Analyse sensibilité

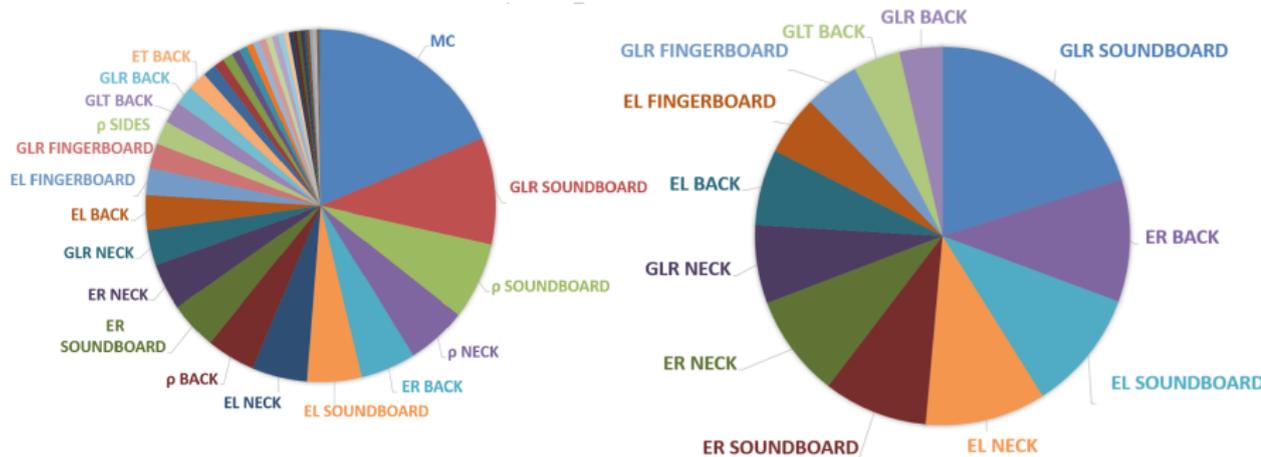
Violon assemblé, non monté



- 3 rigidités dans les directions principales (EL, ER, ET)
- 3 coefficients de couplage entre les directions principales
- 3 rigidités dans les plans principaux (GLR, GRT, GTL)
- Densité du matériau (supposée homogène)
- Teneur en eau s'appliquant à toutes les parties simultanément

Analyse de sensibilité

Violon assemblé, non monté



- Hiérarchisation des paramètres matériaux élastiques orthotropes influents sur le comportement vibratoire d'un violon jusqu'à 3500 Hz
- Etude de l'influence de la teneur en eau du bois (reliée à l'humidité relative de l'air) sur la base modale du violon

Avantages et limitations

Avantages

- Etude de géométries et comportements complexes
- La capacité croissante de modélisation est un enjeu prioritaire en industrie
→ retombées intéressantes pour d'autres utilisateurs.

Limitations

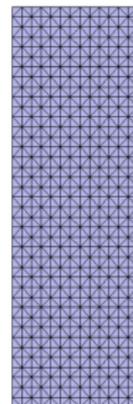
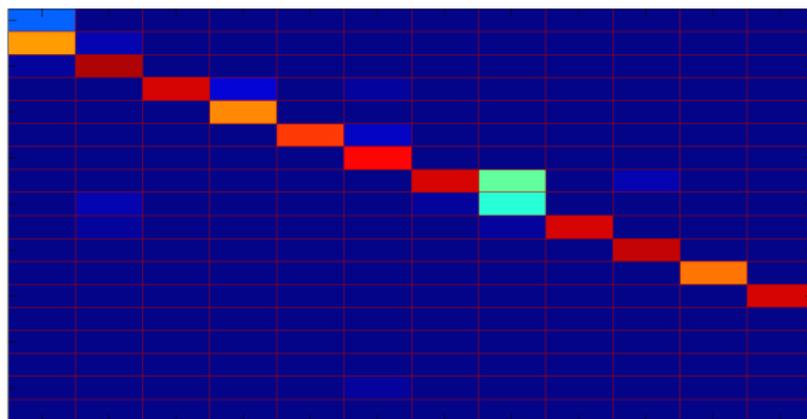
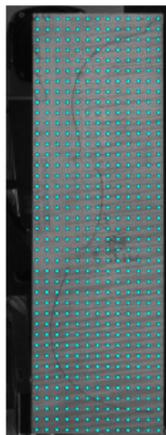
- Exige des informations détaillées sur la géométrie et les caractéristiques des matériaux
- Sensible à une bonne représentation de la géométrie
- Codes commerciaux généralement très coûteux

Validation du modèle

Démarche

- 1 Construire un modèle de l'objet d'étude
 - 2 Définir les caractéristiques de réponses d'intérêt e.g. fréquences propres, niveau de réponse fréquentielle
 - 3 Utiliser le modèle pour préparer les essais (placement capteur et excitateur)
 - 4 Effectuer les essais
 - 5 Comparer le calcul avec l'essai
 - 6 Si erreur trop importante → améliorer le modèle (plus de détails, recalage, etc)
- ⇒ Quel niveau de confiance peut-on atteindre dans le modèle numérique?

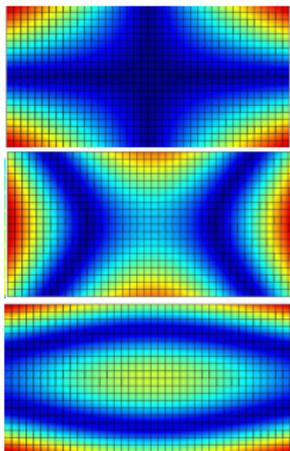
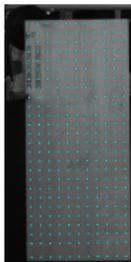
Corrélation calcul-essai



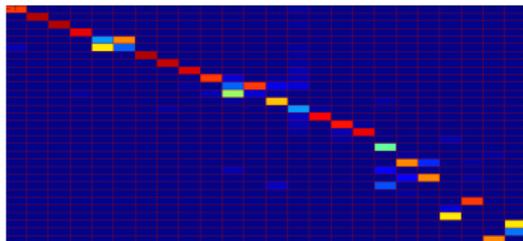
- Essai sur quartier d'érable de qualité élevée [0 4000] Hz
- Comparaison des formes de vibrations calcul-essai
- Indicateur d'erreur → Rouge (bonne corrélation) / Bleu (Mauvaise corrélation)

Caractérisation du matériau : bois de lutherie

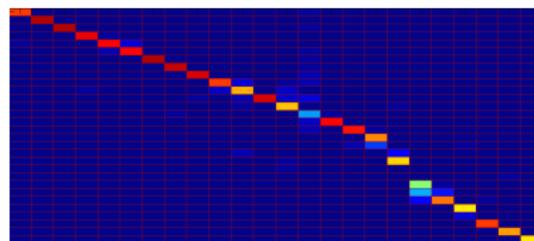
Recalage des propriétés élastiques



Paramètre élastique	Initial	Recalé
EL (Mpa)	13235.3	12102.1
ER (Mpa)	1045	647.5
GLR (Mpa)	899.4	808.1



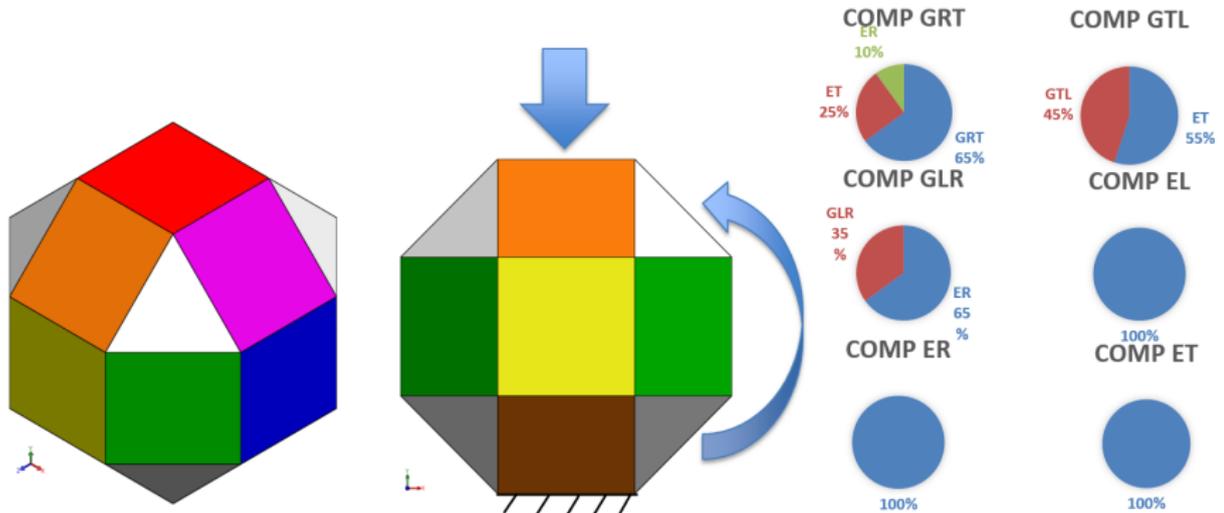
Avant



Après

Caractérisation du matériau : bois de lutherie

Identification sur un rhombicuboctaèdre



- Structure composée de carrés et triangles équilatéraux
- 5 plans de symétrie
- Essais de compression dynamique et recalage du modèle vis-à-vis des déplacements

Avantages et limitations

Avantages

- Etablir le niveau de confiance dans une simulation
- Améliorer l'estimation des paramètres méconnus
- Identifier des propriétés parfois difficiles à mesurer directement
- Quantifier l'impact de la variabilité des caractéristiques du matériau sur les comportements cibles

Limitations

- Est-ce que le modèle sera crédible dans d'autres conditions aux limites?

Prototypage virtuel exploratoire

Démarche

- Préparer une CAO de l'instrument pour explorer un nouveau concept
- Générer un modèle de simulation
- Choisir les caractéristiques de réponses d'intérêt (e.g. fréquences propres, réponses fréquentielles, pressions acoustiques, etc.)
- Lancer l'analyse pour évaluer les réponses
- Interpréter les résultats

⇒ Recherche automatique des solutions par les méthodes d'optimisation

Conclusions

- Paradigme de travail proposé combinant techniques traditionnelles, mesures expérimentales, et prototypage virtuel → enrichir les informations disponibles pour le luthier
- Enjeux principaux pour la conception de nouveaux instruments à cordes
 - meilleure compréhension de la physique des instruments
 - gain de temps
 - économie de matières premières

Perspectives

- Terminer les travaux en lien avec la caractérisation des bois de lutherie avec une comparaison entre différents types de mesures et d'échantillons
- Créer un modèle numérique plus complet, en adéquation avec ce qu'il est possible de simuler actuellement
- Exploiter les modèles physiques détaillés pour analyser l'effet "bridge hill"
- Approfondir le prototypage virtuel pour l'aide à la conception d'instruments à cordes
- Proposer des protocoles d'évaluation simples pour les étapes critiques
- Définir ces étapes critiques en fonction des instruments

Démonstration cet après-midi

Illustration de la démarche à l'institut FEMTO-ST

- Mesures vibromètre 3D et post-traitement de données
 - Prototypage virtuel d'une table de guitare
 - Corrélation calcul-essais sur une table de guitare ou quartier de violon
 - Identification des propriétés d'une table de guitare par recalage de modèles
 - Prototypage virtuel exploratoire sur une table de guitare → sélection des caractéristiques du bois (epicéa/acaïjou, dense/léger, raide/mou)
- ⇒ Discussions autour des besoins des luthiers