



**HAL**  
open science

## Numérisation, valorisation et jumeaux numériques d'instruments de musique du patrimoine

Romain Viala, Juliette Chabassier, Augustin Ernoult, Marguerite Jossic,  
Tobias van Baarsel, Elsa Lambert, Cécile Cecconi

► **To cite this version:**

Romain Viala, Juliette Chabassier, Augustin Ernoult, Marguerite Jossic, Tobias van Baarsel, et al.. Numérisation, valorisation et jumeaux numériques d'instruments de musique du patrimoine. RR-9532, Inria; ITEM; Musée de la musique - Philharmonie de Paris. 2023. hal-04352706

**HAL Id: hal-04352706**

**<https://inria.hal.science/hal-04352706>**

Submitted on 19 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Numérisation, valorisation et jumeaux numériques d'instruments de musique du patrimoine

Romain Viala, Juliette Chabassier, Augustin Ernoult, Marguerite  
Jossic, Tobias van Baarsel, Elsa Lambert, Cécile Cecconi

**RESEARCH  
REPORT**

**N° 9532**

Décembre 2023

Project-Team Makutu



## Numérisation, valorisation et jumeaux numériques d'instruments de musique du patrimoine

Romain Viala<sup>\* †</sup>, Juliette Chabassier<sup>‡ §</sup>, Augustin Ernoul<sup>‡ §</sup>,  
Marguerite Jossic<sup>¶ ||</sup>, Tobias van Baarsel<sup>‡ §</sup>, Elsa Lambert<sup>\*\*</sup>,  
Cécile Cecconi<sup>¶</sup>

Équipe-Projet Makutu

Rapport de recherche n° 9532 — Décembre 2023 — 19 pages

**Résumé :** Ce document est un bilan du projet Programme de numérisation et de valorisation des contenus culturels PNV et Synthèse sonore des Instruments de Musique du Patrimoine (SySIMPa). Il résume les actions effectuées dans le cadre des projets « Patrimoine Numérique et Valorisation » et « SySIMPa, Synthèse Sonore des Instruments de Musique du Patrimoine », soutenus par la DRAC Pays de la Loire pour les années 2018 et 2019 ainsi que par le ministère de la Culture. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un partenariat entre l'Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique (ITEMM), la Cité de la Musique-Philharmonie de Paris représentée par le Musée de la Musique et l'équipe MAKUTU d'Inria (anciennement équipe MAGIQUE-3D). Le projet a été mené de l'année 2018 à l'année 2021 sur les trois sites.

**Mots-clés :** numérisation, valorisation, restauration virtuelle, jumeau numérique, patrimoine

\* ITEM - Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique

† LAUM - Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans

‡ MAKUTU team, Centre Inria de l'université de Bordeaux

§ Laboratoire de mathématiques appliquées, UMR CNRS 5142, Université de Pau et des pays de l'Adour

¶ Équipe Conservation Recherche, Musée de la Musique, Cité de la Musique - Philharmonie de Paris, 221 Avenue Jean Jaurès, Paris, 75019, France.

|| Centre de Recherche sur la Conservation, CNRS-UAR3224, Muséum National d'Histoire Naturelle, Ministère de la Culture, 36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris, 75005, France

\*\* C2RMF - Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France

## Digitization, enhancement and digital twins of heritage musical instruments

**Abstract:** This document is an assessment of the project Programme de numérisation et de valorisation des contenus culturels PNV et Synthèse sonore des Instruments de Musique du Patrimoine (SySIMPa). It summarizes the actions carried out as part of the "Patrimoine Numérique et Valorisation" and "SySIMPa, Synthèse Sonore des Instruments de Musique du Patrimoine" projects, supported by DRAC Pays de la Loire for the years 2018 and 2019 as well as the french Ministry of Culture. This work is part of a partnership between the Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique (ITEMM), the Cité de la Musique-Philharmonie de Paris represented by the Musée de la Musique and Inria's MAKUTU team (formerly the MAGIQUE-3D team). The project ran from 2018 to 2021 on all three sites.

**Key-words:** digitization, enhancement, virtual restoration, digital twin, heritage

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Contexte . . . . .	4
1.2	Objectifs du Projet . . . . .	4
1.3	Partenaires et Organigramme . . . . .	5
1.3.1	ITEMM - Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique . .	5
1.3.2	Cité de la musique-Philharmonie de Paris - Musée de la musique . . . . .	6
1.3.3	INRIA - Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique . . . . .	6
1.3.4	Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France - C2RMF .	6
1.3.5	Jérôme WISS, fabricant d'instruments à vent . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Numérisation d'instruments de musique et documentations associées</b>	<b>7</b>
2.1	Numérisation des Archives du Fonds BESSON . . . . .	7
2.2	Reconstitution Tomographique d'Instruments du Fonds BESSON . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Synthèse Sonore d'instruments à Vent</b>	<b>9</b>
3.1	Estimation de perce . . . . .	9
3.2	Simplification de perce . . . . .	10
3.3	Comparaison numérique / expérimental . . . . .	10
3.4	Étude d'une embouchure . . . . .	12
3.5	Sons de synthèse . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Développements dans l'Outil d'aide à la fabrication OpenWIND</b>	<b>14</b>
4.1	Fabrication d'une copie acoustique . . . . .	14
4.2	Activité pédagogique . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Benchmark de vérification des modèles</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Communication et Valorisation</b>	<b>16</b>
6.1	Participation au Salon Musicora . . . . .	16
6.2	Présentation dans le cadre du festival Éole factory . . . . .	16
6.3	Atelier Culture - Inria . . . . .	16
6.4	Journée Tomographie et Imagerie 3D en Archéométrie . . . . .	16
6.5	Unithé ou café : médiation inria . . . . .	16
6.6	Vienna Talk 2022 . . . . .	18
6.7	Congrès Français d'Acoustique (CFA) 2022 . . . . .	18
6.8	Forum Acusticum 2023 . . . . .	18
6.9	Journée de travail . . . . .	18
<b>7</b>	<b>Perspectives du Projet</b>	<b>18</b>
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>18</b>

# 1 Introduction

Ce rapport résume les actions effectuées dans le cadre des projets « Patrimoine Numérique et Valorisation » et « SySIMPA, Synthèse Sonore des Instruments de Musique du Patrimoine », soutenus par la DRAC Pays de la Loire pour les années 2018 et 2019. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un partenariat entre l'Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique (ITEMM), la Cité de la musique-Philharmonie de Paris représentée par le Musée de la musique et l'équipe MAKUTU d'Inria (anciennement équipe MAGIQUE-3D). Le projet a été mené de l'année 2018 à l'année 2021 sur les trois sites.

## 1.1 Contexte

Au-delà de transférer de nouvelles technologies pour la conservation des instruments, de pérenniser et numériser un fonds d'archives, ce projet vise à créer un lien entre le public et les instruments de musique. À l'heure actuelle, les instruments à vent présents dans les musées sont rarement joués pour des raisons de conservation. Ce projet conjoint vise donc à donner à entendre ce qui ne peut plus être entendu, par le biais de différentes thématiques :

- La synthèse sonore afin d'entendre des instruments ne pouvant plus être joués
- La numérisation en support aux hypothèses organologiques
- La numérisation de fonds documentaire et de plans aux facteurs d'instruments
- La numérisation d'instruments de musique complets par scanner ou tomographie
- Le développement d'outils d'aide à la facture instrumentale

Le projet a été appliqué sur le fonds dit BESSON, relatif à la manufacture d'instruments à vents BESSON fondée en 1837 par Gustave Auguste BESSON, qui, en 1857, s'installe en Angleterre avec une usine à Londres. L'entreprise actuelle appartient au groupe BUFFET et produit une gamme de cornets, cors ténor, euphoniums, tubas, cors d'harmonie et cors baryton. Au cours de son histoire, Besson a produit un certain nombre d'autres cuivres, dont une partie est conservée dans le fonds du Musée de la musique de la Cité de la musique-Philharmonie de Paris. Les archives sont conservées en tant que fonds BESSON 1 au Musée de la musique.



FIGURE 1 – Exemples de documents du fonds d'archives BESSON

Il est à noter que le projet s'est déroulé principalement pendant la pandémie de CoViD-19, et les réunions et les échanges ont été effectués à distance. Le planning a été modifié, mais l'intégralité des actions à mener a été respectée.

## 1.2 Objectifs du Projet

Les principaux objectifs du projet, relatifs aux domaines décrits précédemment, sont les suivants :

1. **Accès à l'information traditionnelle (plan, archives) et augmentée** : Le projet vise à rendre accessible l'information traditionnelle sur les instruments de musique, il s'agit alors de numériser les archives du fonds BESSON, de les rendre accessibles sur une plateforme du Musée de la musique et d'y ajouter des éléments originaux : des objets en 3D correspondant aux instruments numérisés.
2. **Ouverture vers une dynamique collaborative** : Le projet encourage la collaboration entre différents acteurs, soit les facteurs d'instruments, les conservateurs, et les chercheurs afin d'apporter une vision pluri-disciplinaire à la thématique de la numérisation dans le contexte des instruments de musique
3. **Diffusion des savoir-faire anciens pour la facture contemporaine** : Il s'agit de partager les savoir-faire anciens dans la facture d'instruments pour les appliquer à des créations contemporaines, et de promouvoir des techniques de fabrication modernes telles que l'usinage numérique ou la fabrication additive (impression 3D) à partir d'objets 3D pour la réalisation d'instruments.
4. **Transmission et évolution des savoir-faire** : Le projet vise à contribuer au développement de méthodes de simulation pour les instruments de musique, en particulier les instruments à vent, pour le développement d'outils d'aide à la décision.

## 1.3 Partenaires et Organigramme

Les différents partenaires et leurs rôles sont décrits ci dessous :

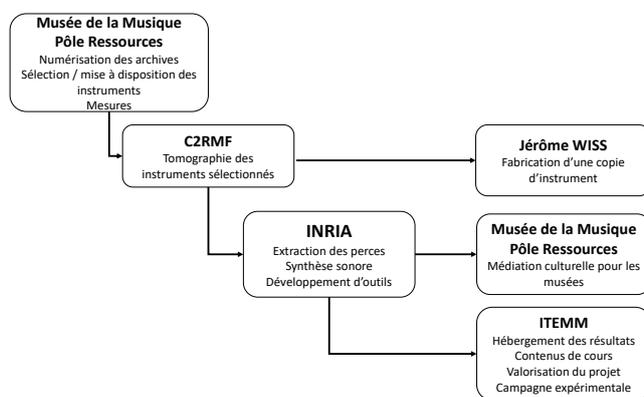


FIGURE 2 – Répartition des rôles entre partenaires.

### 1.3.1 ITEM - Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique

L'ITEM assure la coordination du projet entre les différents partenaires et la DRAC Pays de la Loire. L'institution est responsable de la gestion des fonds alloués au projet, notamment pour

les activités de numérisation et de recherche. De plus, l'ITEMM prend en charge la sensibilisation des facteurs d'instruments et des conservateurs aux outils développés dans le cadre du projet via la création de contenu de cours sur le prototypage virtuel. L'institution organise également des actions de communication à destination du grand public pour promouvoir les résultats du projet : salon spécialisé, hébergement des pages internet associées au projet, co-pilotage de projet de recherche relatif aux mesures sur les instruments à vent.

### 1.3.2 Cité de la musique-Philharmonie de Paris - Musée de la musique

La Cité de la musique-Philharmonie de Paris prend en charge la majeure partie des activités de numérisation d'archives du fonds BESSON et coordonne les efforts des différents partenaires pour obtenir des données tomographiques. L'hébergement des archives numérisées est également assuré par la Cité de la musique-Philharmonie de Paris.

### 1.3.3 INRIA - Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique

INRIA a été en charge de la majeure partie des développements scientifiques du projet. Ces développements sont basés sur les données fournies par le Musée de la musique. Le rôle de l'INRIA est de créer des outils et des méthodologies pour la synthèse sonore des instruments numérisés et de développer des outils permettant de retrouver les caractéristiques acoustiques des instruments à partir des données tomographiques. Une personne en post-doctorat a été recrutée pour mener ces activités.

### 1.3.4 Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France - C2RMF

Le Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, C2RMF, a effectué les tomodensitométries des dix instruments sélectionnés et la reconstitution tomographique permettant de créer des copies numériques - instruments virtuels - mis à disposition.

### 1.3.5 Jérôme WISS, fabricant d'instruments à vent

Jérôme WISS, facteur d'instruments à vents (cuivres) à Hindlingen a réalisé une copie de l'instrument sélectionné E.0925, voir Fig. 4.1.

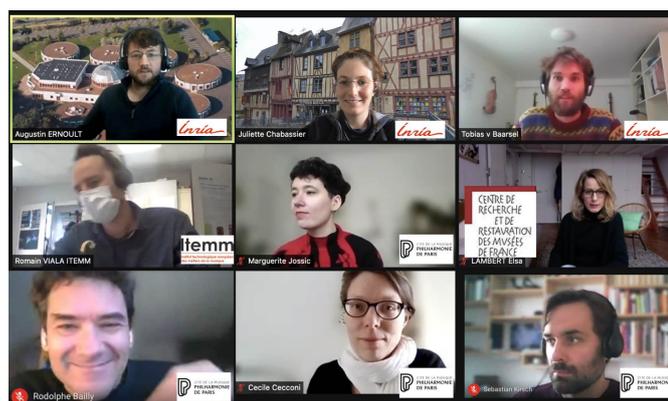


FIGURE 3 – Réunion à distance lors de la période de COVID-19.

## 2 Numérisation d'instruments de musique et documentations associées

### 2.1 Numérisation des Archives du Fonds BESSON

La numérisation du fonds d'archives est une étape majeure du projet. Ce fonds d'archives représente plus d'un mètre de documents historiques. La numérisation comprend une variété de documents tels que des plans, des archives manuscrites et imprimées. Cette numérisation permet une meilleure accessibilité aux informations historiques pour la recherche, la communication au grand public, et la référence pour les facteurs d'instruments contemporains. Le fonds numérisé est accessible à cette adresse : <https://archivesmusee.philharmoniedeparis.fr/fonds-besson-acces-aux-archives.aspx> et le portail d'accueil est représenté sur la figure 4.

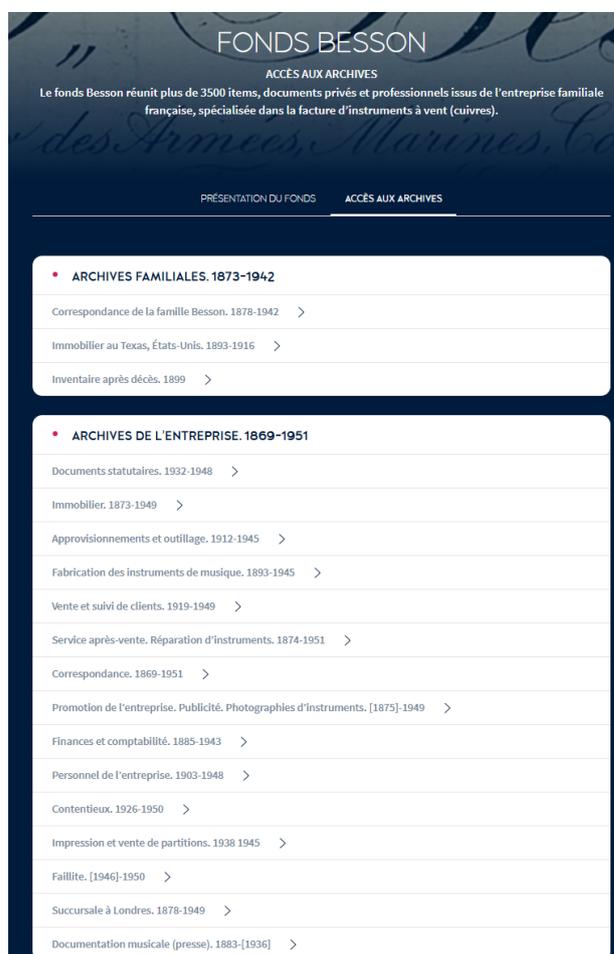


FIGURE 4 – Portail d'accueil des numérisation du fonds BESSON, <https://archivesmusee.philharmoniedeparis.fr/fonds-besson-acces-aux-archives.aspx>, dernier accès : 06/11/2023

## 2.2 Reconstitution Tomographique d'Instruments du Fonds BESSON

Le projet a réalisé des reconstitutions tomographiques d'instruments du fonds BESSON à partir de radios aux rayons X effectuées par tomodensitométrie. Cette technique avancée permet une évaluation détaillée de la géométrie des instruments de musique anciens de manière non destructive. Un exemple de reconstitution tomographique d'un cuivre est présenté ci-dessous.

Les objets en 3D sont accessibles à <https://sketchfab.com/romain.viala/collections> via une collection d'instruments accessibles en licence CC-BY-SA-NC, qui permet la copie sans modification de l'objet en spécifiant l'attribution et sans utilisation commerciale des objets en tant que tel. La figure 6 représente la collection en ligne hébergée sur le site sketchfab.com.

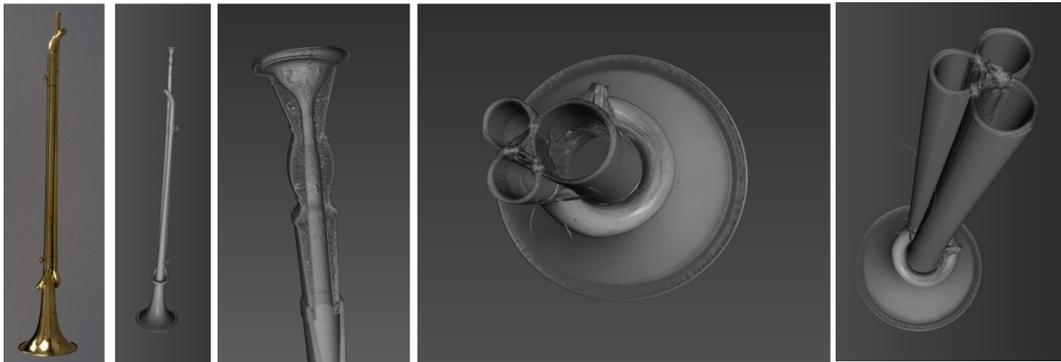


FIGURE 5 – Exemple de reconstitution tomographique d'un instrument du fonds BESSON, la trompette de parade E.0925.

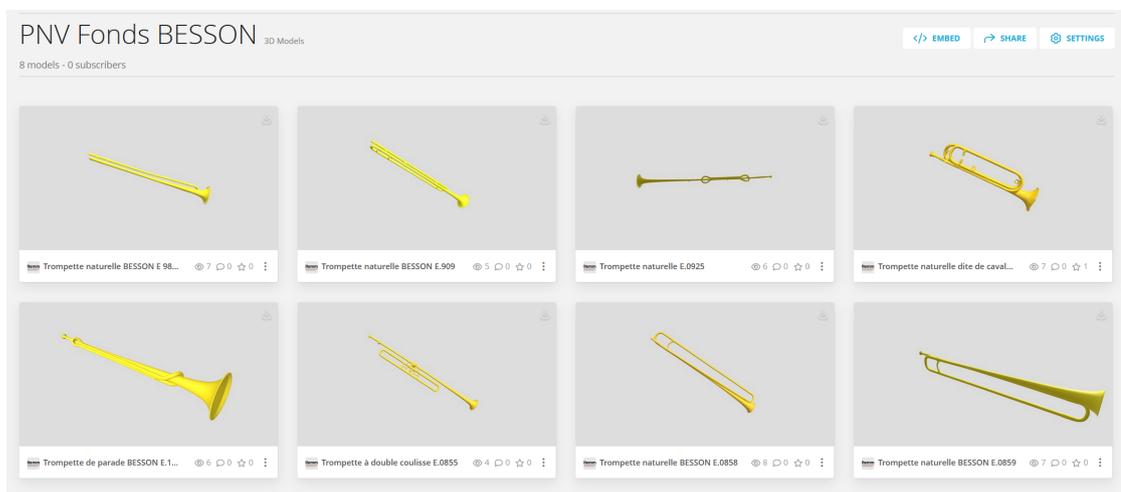


FIGURE 6 – Collection d'instruments en 3D au format .stl sur le site sketchfab.com, <https://sketchfab.com/romain.viala/collections>

### 3 Synthèse Sonore d'instruments à Vent

Pour simuler le comportement acoustique d'une trompette naturelle (par exemple E.0925), le projet SySIMPa s'appuie sur OPENWIND, un logiciel open source développé par l'INRIA (<https://openwind.inria.fr/>). Ce logiciel fait appel à la méthode des éléments finis 1D pour calculer la réponse de l'instrument dans le domaine fréquentiel (impédance) ou temporel (simulation sonore).

#### 3.1 Estimation de perce

Les développements de l'INRIA ont permis de créer un outil ayant pour objectif, à partir des reconstitutions tomographiques, d'extraire les informations essentielles pour la synthèse sonore des instruments numérisés. L'une de ces informations essentielles est la forme de la perce, indispensable pour calculer de manière réaliste les caractéristiques acoustiques de chaque instrument. Les opérations de ce type sont résumées sur la page suivante : <https://itemm.fr/itemm/inversion-de-perce-dinstruments-scannes/>

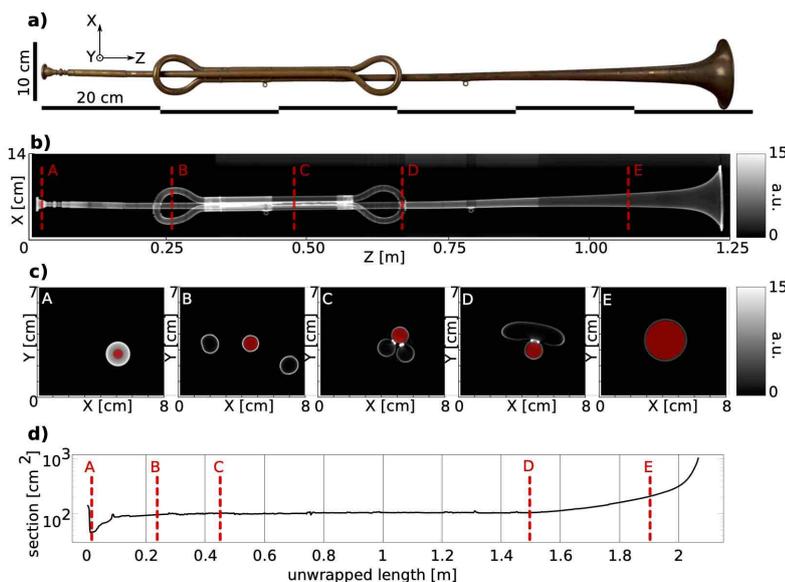


FIGURE 7 – (a) Photographie annotée de la trompette naturelle étiquetée E.0925 au Musée de la musique [crédits : Thierry Ollivier]. (b) Projection X-Z de la tomographie à rayons X du même instrument que dans le panneau (a). La bande de couleur représente la densité locale inversée à partir du processus de tomographie à rayons X. (c) Cinq panneaux (A-E) montrant les coupes X-Y de la tomographie à rayons X aux positions correspondantes (A-E) indiquées par les lignes pointillées dans le panneau (b). Les cercles rouges pleins représentent la section interne de l'instrument à la position correspondante. (d) Section transversale interne en fonction de la longueur déroulée de l'instrument. Les lignes verticales rouges en pointillés correspondent aux cinq positions de (b) et aux cinq panneaux de (c).

### 3.2 Simplification de perce

Pour des raisons de temps de calcul, la géométrie estimée suite au scanner par tomographie doit être simplifiée. En effet, la tomographie mesure le rayon de l'instrument avec un pas de l'ordre du mm, ce qui résulte, pour un instrument d'environ 2 mètres de long, en une géométrie définie par plus de mille points de mesure. Ceci est non seulement beaucoup trop lourd en terme de calcul, si l'on souhaite simuler par exemple l'impédance correspondante, mais ces points de mesure n'ont pas de sens d'un point de vue facture instrumentale, dont les techniques de fabrication ne peuvent pas être aussi précises et variables suivant le long de la perce de l'instrument. De plus, les faibles variations sur de longs segments de l'instrument peuvent être considérées comme du bruit de mesure, dû notamment aux nombreux artefacts issus de la tomographie rayons X. Dans le cadre du projet, une simplification de la perce pour lisser le résultat issu de l'exploitation des données du tomographe a été proposée. Elle se base sur la technique d'inversion de la forme d'onde complète implémentée au sein d'OPENWIND [2]. Les résultats obtenus sont proches de ceux avant simplification et exploitables par un fabricant pour réaliser une copie de l'instrument, comme représenté sur la figure 8. La géométrie d'une trompette d'environ 2 mètres de long est ainsi simplifiée en une dizaine de segments simples. La simplification se fait en gardant à l'esprit les techniques de facture instrumentale (tournage, ponçage, huilage) et les tolérances de fabrication consécutives, et résulte en une géométrie réaliste et utilisable dans un code d'éléments finis.

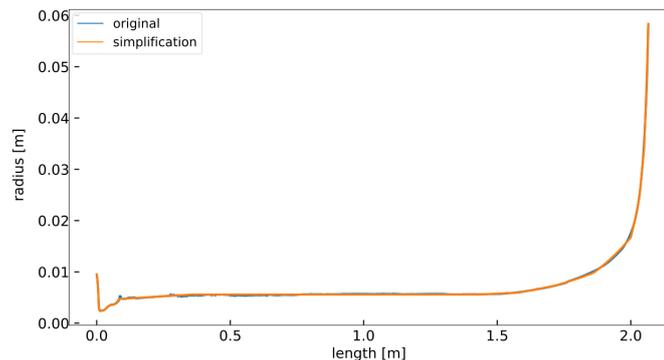


FIGURE 8 – Simplification de la géométrie estimée par reconstitution tomographique. La courbe bleue (la géométrie originale) est décrite par plus d'un millier de points. La courbe orange (la simplification), ne comporte qu'une dizaine de segments.

### 3.3 Comparaison numérique / expérimental

L'impédance est une caractéristique descriptive essentielle pour un instrument à vent. Cette représentation permet d'obtenir des informations sur la tonalité d'un instrument, en partie son timbre, sa justesse et sa facilité d'émission. Le calcul d'impédance est comparé à des mesures expérimentales sur l'instrument. L'impédance de la trompette naturelle E.0925 a été mesurée par l'équipe du Musée de la musique, avec un capteur d'impédance développé par le CTTM [1]. La mesure a été effectuée sur une plage de fréquence entre 20Hz et 2kHz. Dix mesures successives ont été faites pour obtenir l'impédance de référence de l'instrument.

Ces mesures expérimentales servent alors de référence pour optimiser la géométrie obtenue

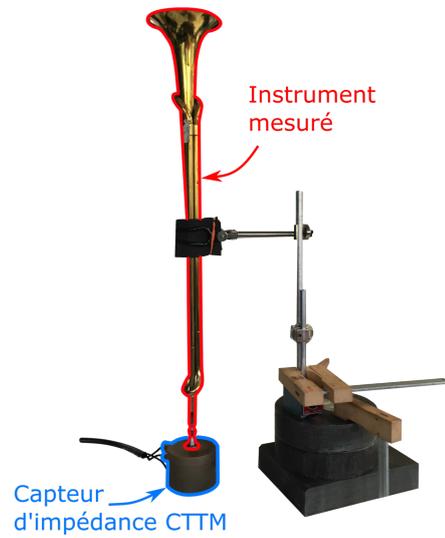


FIGURE 9 – Photographie montrant le dispositif expérimental de mesure d'impédance de la trompette naturelle E.0925

par tomographie. En effet, en définissant l'impédance mesurée comme impédance-cible, on peut optimiser la géométrie estimée par tomographie pour que l'impédance de celle-ci colle au mieux à la mesure par un processus d'inversion.

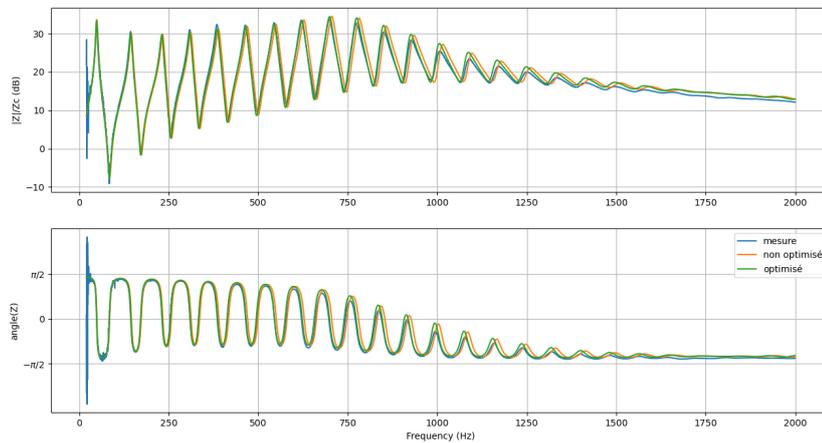


FIGURE 10 – L'impédance de la trompette E.0925, mesurée expérimentalement (bleu), calculée à partir de la géométrie simplifiée telle que montrée en fig.1 (orange) et calculée à partir de la géométrie obtenue après optimisation (vert).

### 3.4 Étude d'une embouchure

La mesure de la perce (le rayon intérieur) des instruments de musique par tomographie à rayons X devient délicate dès lors que les parois de l'instrument deviennent épaisses, c'est-à-dire de la même taille que le rayon. Dans ce cas, des artefacts liés à la technique de tomographie comme le durcissement du faisceau<sup>1</sup> rendent la détection automatique de la paroi ambiguë. Une estimation manuelle, image par image, est plus longue, mais plus précise, mais ne résout pas toutes les incertitudes.

L'embouchure des instruments de musique est une partie extrêmement importante qui doit être mesurée avec précision. Afin de valider les estimations issues de la tomographie, une mesure indépendante et supplémentaire a été faite en réalisant un moulage silicone de l'embouchure, comme illustré en Fig. 11. Non seulement cette seconde mesure a validé la méthodologie par tomographie, mais elle offre une estimation avec moins de parasites de l'embouchure. Ce moulage en silicone a été réalisé par l'équipe scientifique de la Cité de la Musique à Paris.

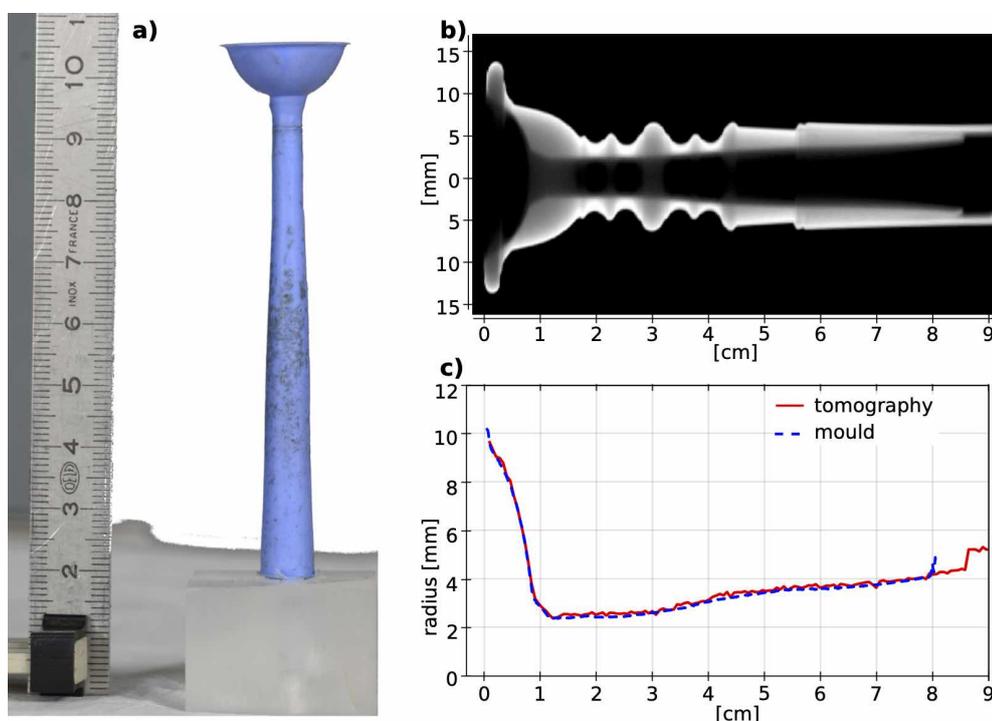


FIGURE 11 – (a) Photographie du moulage en silicone de l'embouchure de trompette réalisé à la Cité de la Musique de Paris. (b) Zoom sur l'embouchure dans les tomographies à rayons X 3D. (c) Graphe montrant l'estimation de la perce dans l'embouchure, à partir de la tomographie (courbe noire) et le moulage silicone (ligne pointillée).

Cette méthode permet donc de compenser certains défauts inhérents à la méthode par tomographie, et la combinaison des deux permet de scanner finement un instrument, y compris à l'intérieur de la matière ou dans des zones difficilement accessibles.

1. Le durcissement du faisceau apparaît au voisinage de matières de forte densité. Il est dû à des différences de densité très élevées au sein de la structure traversée. On distingue alors sur l'image une ombre dans et immédiatement à côté d'une structure à haut contraste.

### 3.5 Sons de synthèse

La synthèse sonore est effectuée par une méthode d'intégration numérique. Le système considéré couple la propagation du son dans une colonne d'air en présence d'effets viscothermiques avec une embouchure de type lèvres (oscillateur linéaire modélisant la vibration des lèvres, et relation non linéaire de Bernoulli entre le débit et la différence de pression). Ces modèles comportent des paramètres de contrôle qu'il est difficile de régler avec réalisme physique. Il est donc pour l'instant impossible de garantir qu'une telle simulation est représentative de la façon dont un musicien jouerait de cette trompette, mais ces résultats préliminaires permettent malgré tout de constater la hauteur possible de jeu d'un tel instrument sur tous ses registres (y compris la note pédale difficilement jouable par un humain).

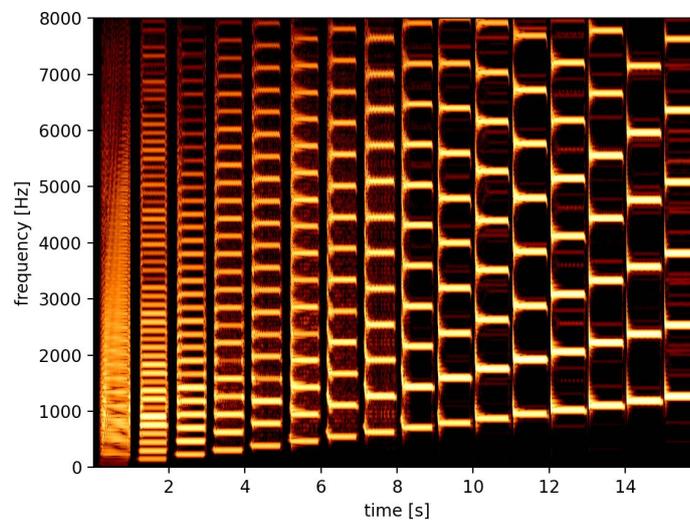


FIGURE 12 – Spectrogramme (diagramme temps/fréquence) de la synthèse sonore effectuée sur la perce simplifiée de la trompette E.0925.

## 4 Développements dans l’Outil d’aide à la fabrication OpenWIND

Openwind est une bibliothèque Python (gratuite et open source) dédiée à la simulation d’instruments à vent. Elle permet de calculer la réponse acoustique dans le domaine fréquentiel (impédance ou admittance) ou dans le domaine temporel (synthèse sonore), à partir de la géométrie de l’instrument (tuyau principal, trous latéraux, valves). Plusieurs modèles sont implémentés, offrant la possibilité de prendre en compte les pertes viscothermiques, différentes conditions de rayonnement, etc. Il est également possible d’effectuer une simulation sonore d’instruments à vent en laiton et à anche. Une interface graphique librement accessible en ligne (<https://demo-openwind.inria.fr/>) permet d’effectuer des simulations dans le domaine fréquentiel sans avoir besoin de maîtriser le code.

### 4.1 Fabrication d’une copie acoustique

Suite à la simplification de la perce, un plan a été mis au point afin de réaliser une copie de la trompette E.0925 par l’artisan Jérôme Wiss. Il ne s’agit pas d’un fac simile habituel, bien que Jérôme Wiss ait reproduit assez fidèlement l’esthétique de l’instrument. Au contraire, il s’agit d’une copie acoustique, qui reproduit la réponse acoustique linéaire de l’original. Le plan est reproduit ici en Fig. 4.1 et les deux trompettes sont représentées Fig. 4.1.

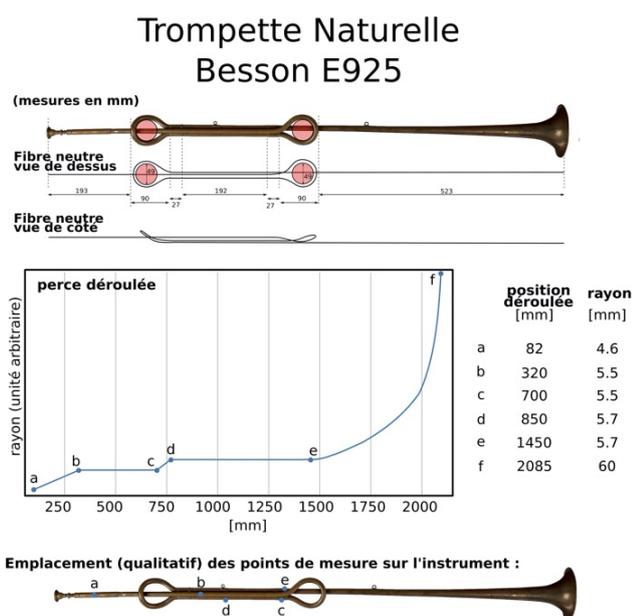


FIGURE 13 – Plan de la copie acoustique de la trompette E.0925.

### 4.2 Activité pédagogique

L’interface graphique a été utilisée à travers la présentation d’une activité pédagogique [6]. Lors de ce cours proposé par l’ITEMM, peuvent être étudiés plusieurs problèmes courants dans

les instruments à vent : l'optimisation du tuyau principal ou la position des trous latéraux. Les étudiants apprennent à mettre en œuvre une méthodologie générale pour résoudre des problèmes dans les instruments à vent de la conception géométrique aux courbes d'impédance et à l'analyse des résonances en utilisant cet outil de prototypage virtuel. Le projet SySIMPa a permis l'ajout de fonctionnalités spécifiques pour la facture instrumentale : le stockage de perçes et leur enregistrement, et la comparaison de différentes configurations. Il a également permis de développer grandement les fonctionnalités liées à la simulation sonore.

## 5 Benchmark de vérification des modèles

L'ITEMM et l'Inria ont porté un projet visant à vérifier et valider les modèles utilisés pour les instruments de musique à vent (les notions de vérification et validation se basent sur les critères de l'ASME [9]). Un groupe de travail a été constitué, réunissant une dizaine d'équipes de recherche françaises expertes dans la modélisation et les méthodes de résolution par matrice de transfert, éléments finis 1D, éléments finis 3D, méthodes multimodales, guides d'ondes, etc. Ce groupe a défini un ensemble de géométries étalons de résonateurs mettant en jeu différentes conditions de propagation (cylindre, cône, coude, trou latéral, etc.) ou de rayonnement (fermé, avec baffle, etc.). Les réponses acoustiques de ces tubes ont été simulées en utilisant l'expertise des membres du groupe de travail puis mises en commun sur une plateforme collaborative. La base



FIGURE 14 – Copie acoustique de l'instrument (bas) et original (haut) de la trompette E.0925.

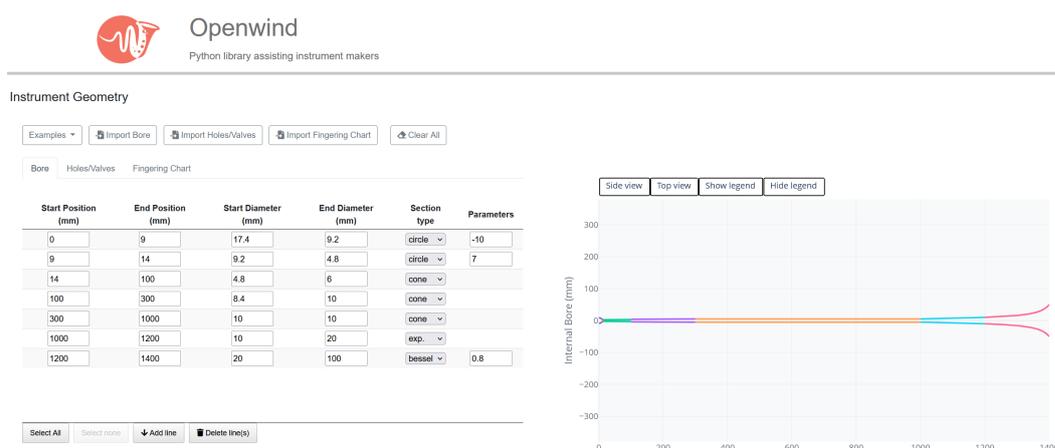


FIGURE 15 – Interface en ligne de démonstration d'Openwind, <https://demo-openwind.inria.fr/>

de données ainsi constituée peut être utilisée pour mener des études comparatives, la vérification de modèles et la comparaison avec une base expérimentale. Son analyse permettra notamment de faire un choix éclairé des méthodes et modèles à implémenter dans un outil d'aide à la facture en considérant leur validité, leur versatilité, leur complexité d'implémentation et les ressources de calcul nécessaires. L'analyse de quelques cas à déjà pu mettre en avant des consensus et des cas pour lesquels il est nécessaire de poursuivre les recherches. En parallèle, une campagne expérimentale est en cours afin de créer une base de données exhaustive et de référence pour la validation des modèles, et l'estimation des incertitudes associées aux mesures. En particulier, l'incertitude aléatoire inter/intra mesures et inter/intra échantillons est quantifiée. La campagne expérimentale se base sur de nombreux lots de cinq éprouvettes chacun. Le plan d'expérience permet d'obtenir des résultats expérimentaux consolidés concernant la conicité, les effets de bords, les conditions aux limites et les matériaux. Les éprouvettes fabriquées ont déjà été testées dans différents laboratoires présentant des méthodes de caractérisation variables et devrait être étendu à d'autres institutions. Les premiers résultats permettent d'établir un protocole de mesure reproductible. Cette campagne donne de premières estimations de la variabilité des mesures et permet de tester différents aspects du plan d'expérience.

## 6 Communication et Valorisation

### 6.1 Participation au Salon Musicora

Le projet a été présenté de manière dédiée au salon Musicora qui s'est tenu à Paris en mai 2019 et 2021. Lors de ces événements, l'ITEMM et l'INRIA a eu l'opportunité de présenter ses résultats et ses avancées au public.

### 6.2 Présentation dans le cadre du festival Éole factory

Le projet a été présenté sous la forme d'un poster dans le cadre du festival Éole Factory de Mantes-la-ville de Septembre 2020, représentée en Fig. 16.

### 6.3 Atelier Culture - Inria

Ce projet a été présenté le 22 mars 2022 lors d'une journée dédiée au projet de collaboration entre le ministère de la culture et l'Inria (Marguerite Jossic et Cécile Cecconi en présentiel, Augustin Ernoult à distance). Le programme est disponible sur le site du ministère de la culture.

### 6.4 Journée Tomographie et Imagerie 3D en Archéométrie

Le projet, et en particulier les aspects liés à la tomographie des instruments, a été présenté par E. Lambert, M. Jossic et A. Ernoult lors de la conférence de clôture d'une journée scientifique du réseau CAI-RN (Compétences Archéométriques Interdisciplinaires - Réseau National) le 23 Mai 2022. Le programme de cette journée est disponible sur le site du CAI-RN.

### 6.5 Unithé ou café : médiation inria

Ce projet a été présenté lors d'un séminaire de médiation scientifique interne à l'Inria de Bordeaux le 31 mai 2022. Ces séminaires intitulés "Uni-thé ou café" sont à destination de l'ensemble du personnel du centre (scientifique ou non). Cette présentation a été accompagnée par l'enregistrement d'un cours podcast, accessible librement : <https://www.inria.fr/fr/desassemblements-le-numerique-episode5>.

## PNV and SYSIMPa : Digitalisation and sound synthesis of musical cultural heritage : Application to a brasses corpus from Besson

Van Baarsel T., Chabassier J., Ernoult A., Viala R., Cabaret J., Curtit M., Lambert E., Boust C., Vaiedelich S., Cecconi C., Thomas C., Jossic M., Le Conte S., Kirsch S., Maniguet T., Bailly R.

### Context and motivations

- Most woodwind instruments in museums are barely played anymore
- This project aims at digitalising musical instruments to :
  - Support organological studies
  - Provide document and plans to makers
  - Complete an archive database
  - Provide sound synthesis resources
- Enlarge PAFI (online decision support platform) possibilities

### Instruments corpus

- The project focuses on brasses made by the manufactory Besson in the XIXth century and kept in la Cité de la Musique – Philharmonie de Paris. Ten instruments will be studied.



Sample of instrument corpus



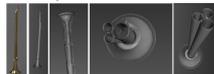
Printed and handwritten papers related to Besson manufactory

### X-ray tomography, bore extraction, impedance synthesis

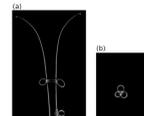
- Example on a parade trumpet
- An x-ray tomodensitometer is used to capture tomographic slices of the trumpet
- The bore is extracted with image processing methods
- The impedance is computed using bore characteristics



Photograph of E.1362 trumpet (Besson, 1858) from la Cité de la Musique museum



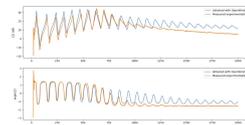
3D tomographic reconstruction of E.1362 trumpet ©c2rmf, E. Lambert



X-ray tomography raw images of E.1362 trumpet. (a) longitudinal cut near the bell. (b) transvers cut in the middle of the instrument au milieu de l'instrument © c2rmf, E. Lambert



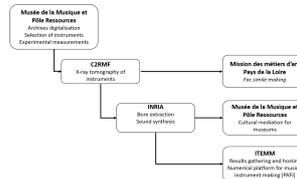
Bore evolution from mouthpiece to bell



Comparison between computed (OpenWind) and experimentally measured impedances. Top : impedance module, bot : phase

### Partners and organigram

- INRIA – Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
- ITEM – Institut Technologique européen des Métiers de la Musique
- Musée de la Musique et pôle ressources - Philharmonie de Paris
- C2RMF – Centre de recherche et de Restauration des Musées de France

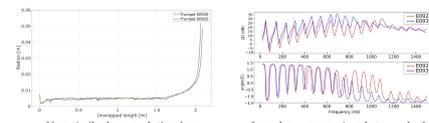


### Instruments comparison method

- Non destructive caracterisation method
- Provides detailed information on material and geometry
- Provides useful data for scientists, curators and makers



Photographs of E.0939 and E.0925 trumpets



Very similar bore evolution from mouthpiece to bell for both trumpets

Impedance comparison between both trumpets with mouthpieces

### Perspectives

- Perform sound synthesis on musical instruments, based on digitalised data
- A fac simile of a selected instrument will be made by a craftsman
- Compare computations with experimental measurements to validate approaches
- Improve modeling of lips to increase sound synthesis realism
- Update PAFI platform with new features

### References :

- Eveno, P. & Le Conte, S. (2016). An acoustical measurement used for the understanding of historical wind instruments. *Journal of Cultural Heritage*, 20, 615-621
- A comparison of a one-dimensional finite element method and the transfer matrix method for the computation of wind music instrument impedance Robin Toumeme, Juliette Chabassier Acta Acustica united with Acustica, Hirzel Verlag, In press, 5, pp.838
- Plateforme OpenWind : <https://openwind.gitlabpages.inria.fr/web/>
- Plateforme PAFI : <https://plateforme-lutherie.com/>
- Bilbao Stefan. (2009) Direct Simulation of Reed Wind Instruments. *Computer Music Journal*, 33, 43-55. 10.1162/comj.2009.33.4.43.

**CONTACT**  
Viala Romain  
[romain.viala@itemm.fr](mailto:romain.viala@itemm.fr)

**ITEMM**  
Pôle Recherche et Innovation  
71 Avenue Olivier Messiaen – 72000 Le Mans



FIGURE 16 – Poster présenté dans le cadre du festival Éole Factory en septembre 2020

## 6.6 Vienna Talk 2022

Le projet a été présenté lors des "Vienna Talk 2022" [5], une conférence organisée tous les 5 ans à Vienne (Autriche) et visant à faire le lien entre chercheurs en acoustique musicale, luthiers, musiciens et conservateurs de musées.

## 6.7 Congrès Français d'Acoustique (CFA) 2022

Les aspects acoustiques développés autour de ce projet (synthèse sonore et reproduction de la copie acoustique) ont été présentés lors du Congrès Français d'Acoustique (CFA) de 2022 [3]. Les dimensions expérimentales et numériques du benchmark ont également fait l'objet de présentations [4, 7].

## 6.8 Forum Acusticum 2023

Le logiciel openwind et l'activité pédagogique développée autour de ce logiciel par l'ITEMM ont été présentés lors de Forum acusticum en Septembre 2023 [6], ainsi que les résultats expérimentaux du benchmark [8]

## 6.9 Journée de travail

Pour finir, une journée de restitution du Benchmark a été effectuée le 28 Juin 2023, dont le programme est disponible sur le site de la SFA (Société Française d'Acoustique). Cette journée a permis de rassembler une vingtaine de chercheurs et chercheuses pour échanger sur la modélisation (simulation) et les mesures acoustiques des instruments de musique à vent.

# 7 Perspectives du Projet

Ce projet a permis de valider différentes approches de numérisation dans un contexte de facture instrumentale, qui est dorénavant mis en pratique à l'ITEMM sous forme de cours, mais aussi d'activités de numérisation d'instruments de musique, à la demande des facteurs d'instruments de musique, avec notamment des flageolets, flûtes, archets : Article ITEM. En reprenant ces approches, l'ITEMM fabrique aussi des instruments de musique à la demande pour diverses entités (luthiers, musiciens, conservatoires et centre culturels). Une autre perspective de ce projet serait d'ajouter de nouvelles informations aux "fiches" des musées (impédance, géométrie 3D, géométrie interne, exemples sonores, etc). Il reste encore à bien évaluer l'intérêt pour des fabricants d'un tel projet et des synthèses sonores, même si la tomographie est d'ores et déjà testée et validée par certains. La finalité acoustique d'un tel projet serait d'entrer en relation avec des artistes susceptibles de jouer la copie acoustique et de la comparer à l'original.

# 8 Conclusion

Ce bilan d'actions démontre la réalisation complète du projet et la résolution de plusieurs verrous technologiques. L'activité scientifique du projet a contribué aux numérisations, à la coordination des mesures tomographiques, ainsi qu'au développement méthodologique et logiciel, et à la vérification et validation des codes utilisés. Pour finir, cela a permis à des facteurs de découvrir de nouvelles méthodes de mesure et de modélisation d'instruments de musique.

## Remerciements

Les auteurs remercient Sandie LE CONTE (Philharmonie de Paris) et Marthe CURTIT (ITEMM) qui ont initié le projet en 2018. Rodolphe BAILLY et Sébastien KIRSCH, de la philharmonie de Paris, ainsi que Jérémy Cabaret de l'ITEMM ont contribué au projet.

## Références

- [1] Jean-Pierre Dalmont et Jean-Christophe Le Roux 2008. "A new impedance sensor for wind instruments". *The Journal of the Acoustical Society of America*. 123(5), p.3014–3014.
- [2] Augustin Ernoult, Juliette Chabassier, Samuel Rodriguez, Augustin Humeau. Full waveform inversion for bore reconstruction of woodwind-like instruments. *Acta Acustica*, 2021, <10.1051/aacus/2021038>. (<https://inria.hal.science/hal-03231946v2>)
- [3] Augustin Ernoult, Tobias van Baarsel, Clotilde Boust, Juliette Chabassier, Marguerite Jossic, et al.. Prédire les propriétés acoustiques des instruments du patrimoine : le cas d'une trompette Besson du Musée de la musique. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique ; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. (<https://inria.hal.science/hal-03848341>)
- [4] Augustin Ernoult, Henri Boutin, Jérémy Cabaret, Juliette Chabassier, Tom Colinot, et al.. Étude comparative collaborative des modèles pour le calcul d'impédance d'instruments à vent. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique ; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. (<https://inria.hal.science/hal-03848338>)
- [5] Tobias van Baarsel, Clotilde Boust, Juliette Chabassier, Augustin Ernoult, Marguerite Jossic, et al.. Understand and predict acoustic properties of heritage instruments : the case of a Besson trumpet of the Musée de la Musique of Paris. *ViennaTalk2020 : Fourth Vienna Talk on Music Acoustics*, Sep 2022, Vienna, Austria. (<https://inria.hal.science/hal-03842072>)
- [6] Augustin Ernoult, Jérémy Cabaret, Juliette Chabassier. Openwind : a software to simulate wind instruments, as a tool for acoustic teachers. *Forum Acusticum 2023 - 10th Convention of the European Acoustics Association*, European Acoustics Association, Sep 2023, Turin, Italy. (<https://inria.hal.science/hal-04217988>)
- [7] Romain Viala, Henri Boutin, Jérémy Cabaret, Tom Colinot, Jean-Pierre Dalmont, et al.. Mise en place d'une base de données expérimentales, pour la validation de modèles de résonateurs et la comparaison de géométries et matériaux. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique ; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. ([hal-03848339](https://inria.hal.science/hal-03848339))
- [8] Jérémy Cabaret, Jean-Pierre Dalmont, Augustin Ernoult, Vincent Fréour, Romain Viala. Creation of an experimental database, for the validation of resonator models, comparison of geometries and materials, and quantification measurement errors. *Forum Acusticum 2023 - 10th Convention of the European Acoustics Association*, European Acoustics Association, Sep 2023, Turin, Italy.
- [9] Schwer, L. E. (2009). *Guide for verification and validation in computational solid mechanics*.

**P** PHILHARMONIE  
DE PARIS  
MUSÉE DE LA MUSIQUE

**Itemm**

Institut technologique européen  
des métiers de la musique

*Inria*

**RESEARCH CENTRE  
BORDEAUX – SUD-OUEST**

200 avenue de la Vieille Tour  
33405 Talence Cedex

Publisher  
Inria  
Domaine de Voluceau - Rocquencourt  
BP 105 - 78153 Le Chesnay Cedex  
inria.fr

ISSN 0249-6399