Université de Paris VI Jussieu

Mémoire de Master 2 Recherche Sciences et Technologies

Mention : Sciences de l'Ingénieur

Spécialité : Mécanique et Ingénierie des Systèmes

Parcours : Acoustique, Traitement du signal et Informatique appliqués à la Musique (ATIAM)

Documentation Acoustique de l'Orgue

Guillaume Nief

2004-2005

Laboratoire d'accueil :

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

LIMSI UPR3251 Université Paris XI Orsay

Directeur de recherche :

Christophe D'Alessandro

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Christophe D'Alessandro qui m'a permis de réaliser cette étude. Il m'a également fait découvrir le monde de l'orgue. J'ai, grâce à lui, appris à connaître et à aimer cette "machine à sons" extraordinaire et fascinante.

Je remercie également mes collègues stagiaires du LIMSI, pour la bonne ambiance qui régnait dans la salle.

Je souhaitais enfin remercier tout l'ATIAM, tant mes amis de la promotion pour leur sympathie que les professeurs pour la qualité de leurs interventions et leur passion. Grâce à eux, cette année a été très riche et fructueuse pour moi.

Résumé

Cette étude est liée au projet ayant pour but la documentation acoustique d'un orgue historique. L'instrument étudié est l'orgue de l'église Sainte Elisabeth à Paris (construit par Suret en 1853, comportant 3 claviers, un pédalier et 40 jeux). Des enregistrements calibrés de toutes les notes (individuellement) ont été réalisés pour les 9 jeux du "positif de dos", à l'intérieur du buffet et en dehors (420 tuyaux, 162 tuyaux à anches et 258 tuyaux à bouche). Plusieurs positions d'enregistrement (i.e. à distances variables de la bouche et de l'extrémité du tuyau) ont été testées dans le buffet. Les signaux enregistrés ont été analysés suivant trois axes: 1. propriétés spectrales à long terme de la partie stationnaire périodique du signal ; 2. analyse temps-fréquence des transitoires d'attaque ; 3. analyse du niveau sonore en dB SPL.

Les résultats ont montré que l'analyse du signal montre des variations inattendues et importantes même si l'auditeur perçoit une certaine cohérence entre les sons des différents tuyaux dans un même jeu, et pour différentes positions d'écoute. Cependant pour une position fixée du microphone (au centre du buffet), des caractéristiques sonores générales ont pu être mises en évidence et les jeux ont pu être comparés. Des tests sur l'influence de la position ont été réalisés et indiquent que des enregistrements en plusieurs points significatifs (au niveau de l'organiste, dans le buffet, et dans une position d'écoute dans l'église) seraient une bonne stratégie de documentation.

Abstract

This study reports on a project aiming at acoustic documentation of an historical organ. The instrument under study is the organ of Sainte Elisabeth, Paris (built by Suret in 1853, 3 keyboards and pedal, 40 stops). Calibrated recordings of all isolated notes have been performed for the 9 stops of the "positif de dos", inside and outside the organ case (420 pipes, 162 reed pipes and 258 flue pipes). Several microphone positions (i.e. various distances to the pipe opening and/or mouth) have been used inside the organ case, and one outside of the organ case. Signal analysis has been performed on these recordings, using the following measures : 1. spectral properties of the stationary part of the spectrum ; 2. time-frequency analysis of the attack transient ; 3. analysis of the absolute SPL.

The results showed that signal measurements are showing large and unexpected variations although the listener is experiencing coherence in the sound between the different pipes in a same stop, and the same stop at different listening positions. Nevertheless, for a fixed position of microphone (at the centre of the buffet), general sound characteristics have been shown and stops have been compared. Influence of microphone position has also been tested. Such tests indicated that recordings at a few significant points (position of playing organist, inside the buffet and in a listening position in the church) would be a good strategy of documentation.

Sommaire

Liste des figures 7
Introduction 9
I) Protocole d'enregistrement 17
1) Procédure 17
2) Matériel 19
II) Analyse du signal 22
1) Partie stationnaire périodique 23
2) Partie transitoire d'attaque 24
3) Niveau sonore 26
III) Résultats 28
1) Caractéristiques sonores des jeux et comparaisons entre jeux 28
a) Partie stationnaire périodique des sons 28
b) Transitoire d'attaque 30
c) Niveau sonore 32
2) Etude de l'influence de la position du microphone 33
a) Variations en fonction de la position du microphone par rapport au tuyau dans le buffet 33
b) Variations entre les signaux enregistrés dans la salle et dans le buffet 34
Conclusion 38
Bibliographie 40
Annexe : Spectres et transitoires au complet 42

Liste des figures

Figure 1 : Photo de l'orgue de Sainte Elisabeth 12
Figure 2 : Plan de l'église Sainte Elisabeth 13
Figure 3 : Vue générale (à gauche) et de l'intérieur (à droite) du positif 15
Figure 4 : Réponse fréquentielle des microphones 19
Figure 5 : Schéma du système d'enregistrement 20
Figure 6 : Exemples de spectres d'amplitude pour deux jeux très différents 23
Figure 7 : Evolution du centre de gravité spectral de la flûte 8' 24
Figure 8 : Comparaison entre les deux méthodes de visualisation des transitoires d'attaque : filtrage-enveloppe à gauche et TFCT à droite. 25
Figure 9 : Exemples de transitoires d'attaque pour deux jeux très différents 25
Figure 10 : Evolution du niveau sonore pour la trompette 8' 26
Figure 11 : Importance des harmoniques pour tous les jeux du positif. 29
Figure 12 : Evolution du centre de gravité spectral pour tous les jeux du positif. 30
Figure 13 : Niveau en dB SPL pour tous les jeux du positif 32
Figure 14 : Spectres pour deux positions différentes du microphone 33
Figure 15 : Transitoire d'attaque pour deux positions différentes du microphone 34
Figure 16 : Spectre du La4 de la flûte dans la salle (à gauche) et au centre du buffet (à droite) 35
Figure 17 : Transitoire d'attaque du La4 de la flûte dans la salle (à gauche) et au centre du buffet (à droite) 35

Introduction

Introduction

Actuellement, la conservation et la documentation des orgues historiques se limitent à des archives architecturales, des informations techniques de construction concernant les matériaux utilisés, les registres initialement installés, le système de soufflerie, les tuyaux… Si ces données sont évidemment indispensables pour les facteurs en cas de restauration par exemple, la caractéristique la plus importante de l'orgue, à savoir le son (ou plutôt les sons) qu'il produit, n'est pas systématiquement documentée. La seule exception notable au niveau Français est la série d'études menées par le LAM pour plusieurs instruments dans le cadre de la Commission Supérieure des Monuments Historiques ou de la Commission des Orgues non Protégés (Saint Maximin, Notre Dame et Saint Sulpice de Paris, Notre de Dame de Chartres, Ebermünster, Dôle). Les enregistrements discographiques sont une source de documentation, mais difficile à utiliser pour l'étude acoustique des instruments. Ainsi, le patrimoine sonore associé à l'orgue en question pourrait se perdre, et sa qualité sonore mal rétablie après une restauration. La documentation acoustique a donc pour but d'aider à mieux comprendre et faire comprendre le son produit par l'instrument, de façon à faciliter sa conservation et éventuellement sa restitution lors d'une restauration.

Cette approche introduit toutefois des problématiques importantes à prendre en considération. Tout d'abord, les besoins en termes de documentation sonore ne sont pas encore clairs. Diverses questions sont soulevées. Quels types de sons enregistrer (notes isolées, accords, combinaison de jeux, extrait de pièces musicales…)? Quelles caractéristiques des sons sont intéressantes, pertinentes, utiles ? De plus, l'orgue est un instrument particulier sous bien des aspects. Il est indissociable de la salle dans laquelle il est situé. Il est parfois même construit sur les contraintes géométriques qu'impose l'église. L'acoustique de la salle est donc d'une importance capitale, d'autant plus que les églises présentent les temps de réverbération les plus longs. L'instrument présente aussi une configuration très complexe avec une multitude de sources sonores individuelles réparties dans l'espace (sur des distances de plusieurs mètres voire dizaines pour les grands orgues), combinables à souhait par l'instrumentiste et incluses dans plusieurs buffets séparés. Toutes ces particularités impliquent un champ acoustique rayonné extrêmement complexe et autant de signaux différents enregistrables que de positions dans la salle. Ceci implique également que cette approche s'écarte de l'étude physique d'un tuyau seul en chambre sourde.

Quelques études acoustiques d'orgues en vue d'une documentation ont déjà été réalisées. Michèle Castellengo [2] et son équipe ont été chargés de la documentation sonore du fameux orgue de Saint Maximin avant sa restauration. L'auteur y analyse les problèmes rencontrés et fait part de la méthode employée. Elle y explique ses réflexions au sujet des causes de la variabilité de la qualité sonore. Du point de vue esthétique, les harmonies appréciées changent avec les époques ; du point de vue technique, l'état des tuyaux (saleté, vétusté…) et de la soufflerie sont d'un grande importance sur la façon d'harmoniser les tuyaux et donc sur leur son. De plus, les variations de température impliquent des variations de diapason et donc des changements perceptifs de timbre. Les diverses positions des tuyaux dans les buffets sont également la cause de diverses sensations sonores. La méthode de prise de son et de documentation est aussi discutée. Le microphone a été placé face au grand orgue (à 9m du buffet) et à hauteur du toit du positif pour éviter la part importante de la réverbération pour la situation au sol. Ces positions ont été soigneusement notées et marquées de façon à assurer une bonne reproductibilité en vue des enregistrements après restauration. Les sons enregistrés ont été les gammes chromatiques de tous les jeux (tous les tuyaux individuellement) et principaux mélanges, puis des accords successivement dans le grave et l'aigu, enfin, des pièces et séquences musicales jouées par un organiste. Des mesures des particularités de la salle ont aussi été réalisées (réponse des buffets au bruit blanc, réverbération de l'église). L'auteur tente ensuite d'exploiter ces mesures en termes de caractérisation de l'homogénéité sonore des tuyaux d'un même jeu. Elle indique que d'importantes variations de paramètres, comme le centre de gravité spectral, interviennent entre les sons des tuyaux d'un même jeu et conclut sur la nécessité de comparer ces résultats avec ceux obtenus après restauration.

Stepanek et al. [11] proposent une méthode de mesure et de documentation des orgues historiques en République Tchèque. Elle est basée, pour tous les jeux, sur l'enregistrement de la partie stationnaire périodique de triades consécutives ainsi que sur l'enregistrement des transitoires d'attaque des notes "do" en plusieurs positions. Plusieurs microphones sont placés dans l'église à 4 m au dessus du sol ; un autre à la position de l'organiste. Des mesures des bruits de fonds et des temps de réverbération ont également été réalisées. Le positionnement des microphones dans la salle ainsi que leur nombre sont déterminés par des calculs basés sur un modèle probabiliste de champ acoustique dans une grande salle fermée. L'analyse des signaux fournit les spectres d'amplitude ainsi que le niveau sonore des harmoniques en dB SPL pour les triades successives de chaque jeu.

Les mêmes auteurs [12] proposent une méthode de comparaison pour des sons de plein-jeu. Ils réalisent des analyses par bandes de fréquences à bornes adaptées à chaque fois à la nouvelle fréquence fondamentale (bornes glissantes), de sorte que chaque bande comporte les mêmes harmoniques d'une note à la suivante. Les auteurs tirent des propriétés spectrales permettant des conclusions de deux types : des caractéristiques spectrales (CGS, irrégularité de l'enveloppe spectrale…) intrinsèques aux différents sons de chaque tuyau et des caractéristiques générales comparatives sur chaque jeu, provenant de la comparaison des spectres par analyse statistique.

Judith Angster et Andras Miklos [7] proposent également une procédure de documentation du son des orgues historiques. Les auteurs font remarquer que, du point de vue des facteurs, la qualité sonore et le timbre sont principalement influencés par l'ajustement des transitoires d'attaque lors de l'harmonisation de chaque tuyau. De plus, ils rappellent que l'influence des paramètres de la salle est primordiale sur la qualité sonore (la position dans la salle, la température, le degré d'hygrométrie, la présence ou non de public lors d'un concert…). Le son précoce étant souvent réduit au son direct dans les églises, une séparation dans le domaine temporel du champ direct du champ réverbéré semble la meilleure méthode. Ils proposent alors d'analyser les transitoires d'attaque avec des microphones très proches de la bouche des tuyaux (quelques cm) de façon à minimiser l'influence de la salle. La méthode retenue est donc l'analyse des transitoires d'attaque pour quelques tuyaux caractéristiques de chaque jeu. En effet, elle est valable du point de vue des facteurs (harmonisation), des phénomènes de salle, et de la perception (forte influence de l'attaque). L'analyse des enregistrements a été réalisée en calculant une transformée de Fourier à court terme des sons, puis en traçant l'évolution temporelle des amplitudes des dix premiers harmoniques. Ces figures permettent de définir plusieurs paramètres : le temps global d'attaque, l'ordre d'apparition des harmoniques, les harmoniques les plus rapides, les plus forts… Les auteurs déterminent des caractéristiques d'attaques communes au sein d'un jeu ainsi que les différences entre les jeux. Ils remarquent toutefois que les différences entre les jeux ne sont pas toujours évidentes et sont souvent de plus en plus floues dans le registre aigu.

La lecture des articles cités précédemment suscite des questions. La position de l'enregistrement, les variations du signal avec cette position, les influences des paramètres de la salle, sont des points qu'il s'agit de prendre en considération. Pour notre étude, nous avons décidé de nous limiter au positif de dos, partie de l'orgue située le plus près de la nef, derrière

le dos de l'organiste assis à la console. En effet, il s'agit de la partie de l'orgue la plus accessible, par sa position et la taille modérée de ses tuyaux. Il comporte 9 jeux dont 4 jeux d'anches (basse de basson - dessus de hautbois 8', trompette 8' et clairon 4' soit 162 tuyaux) et 5 jeux à bouche (flûte 8', kéraulophone 8', bourdon 8', prestant 4' et nasard 2'2/3 soit 258 tuyaux). Le présent rapport développe la procédure d'enregistrement, les analyses du signal effectuées et les résultats obtenus concernant la variabilité du signal dans l'espace et la caractérisation de sonorité.

La documentation acoustique nécessite également de connaître, au moins dans ses aspects principaux, l'historique et les particularités de l'instrument étudié : l'orgue de Sainte Elisabeth.

Figure 1 : Photo de l'orgue de Sainte Elisabeth

L'église Sainte Elisabeth du Temple est située rue du Temple (proche de la place de la République) à Paris (IIIème). Ancienne chapelle du couvent des Filles-de-Sainte-Elisabeth, ouvert en 1630 par le Père Vincent Mussard (monastère de religieuses du tiers-ordre de Saint-François), sa première pierre fut posée le 14 avril 1628 par la reine Marie de Médicis. L'église, dédiée à Sainte Elisabeth de Hongrie, fut consacrée le 14 juillet 1646. A la

Révolution, le monastère a été vendu et l'église transformée en magasin de fourrage ! Rendue au culte en 1802, elle fut agrandie en 1829.

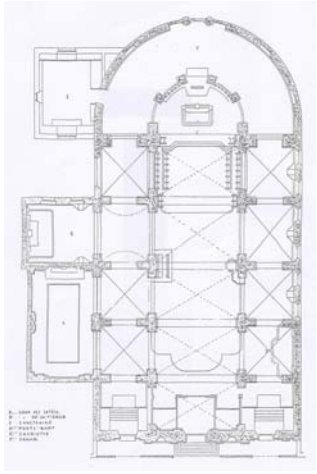


Figure 2 : Plan de l'église Sainte Elisabeth

En 1852-1853, Marie-Antoine-Louis Suret (né en 1807), et son fils Marie-François-Auguste Suret vont construire leur plus grand instrument, qui restera leur chef-d'œuvre. L'orgue de Sainte-Elisabeth est inauguré le 28 avril 1853. L'instrument, un grand 16 pieds, aurait eu à l'époque 36 jeux, sur trois claviers et un pédalier. L'instrument reçoit une médaille d'or aux expositions des produits de l'industrie en 1855. En cette année, l'orgue de Sainte Elisabeth est cité par Schmitt (*Manuel de l'Organiste*, encyclopédie Roret) mais pour 38 jeux, quatre claviers manuels et pédale séparée. Il est probable que Schmitt a compté comme un clavier séparé le plan sonore de bombarde du grand orgue, qui possède un appel séparé. Le remarquable buffet est classé monument historique 52 ans après sa construction, le 20 février 1905. Il faut attendre 1927 pour retrouver une description de l'orgue (par Félix Raugel), dans un état qui est celui d'origine à quelques détails près (il a alors 39 jeux, et la soufflerie possède un ventilateur électrique depuis 1914).

Dans les années 30 et 40, plusieurs devis de restauration apparaissent, qui vantent la qualité de l'instrument. Ils regrettent toutefois son esthétique surannée et la dureté d'une mécanique presque centenaire. Le projet de Gutschenritter de 1941, est ajourné en raison de la Seconde Guerre Mondiale, mais est finalement réalisé au sortir du conflit entre 1955 et 1959. L'instrument Suret-Gutchenritter est reçu le 22 janvier1959 par la ville de Paris. L'incohérence du plan de reconstruction et la piètre qualité de sa réalisation entraînent une détérioration

assez rapide, mais éveille un intérêt pour la partie instrumentale Suret, classée le 18 janvier 1980.

Une seconde restauration, en fait une "dé-restauration" complète (tribune, buffet, instrument) est décidée par les monuments historiques, et est arrêtée en 1991. Les travaux, financés à parité par la ville de Paris et l'Etat sont confiés à la manufacture Giroud et sont réalisés entre 1994 et 1998. Jacques Nonnet assure la direction des travaux et l'harmonisation de l'instrument. L'instrument Suret-Giroud est reçu le 21/01/1999 par la DRAC Ile-de-France.

Actuellement, cet instrument de 42 registres (39 jeux) contient toutes les innovations de la facture romantique parisienne de la première moitié du XIXe siècle, à l'exception notable de la machine Barker. La tuyauterie est coupée sur le ton, sauf quelques jeux plus tardifs du récit. Les 3 claviers manuels ont 54 notes, et la pédale 30 (24 à l'origine). La palette sonore est très riche et colorée, avec toutes les familles de fonds (montres de 16' 8' et 4', gambes de 8' et 4', kéraulophone, bourdons, flûte de 16' 8' 4' et 2'), 2 cornets (de 5 rangs chaque, en 16' et en 8'), un nasard et une grosse proportion d'anches (16 sur 39, soit 2 bombardes, 5 trompettes, 3 clairons, 2 hautbois, clarinette, voix humaine, cor anglais, basson). On note le kéraulophone, un des premiers posés en France. Ce jeu possède un gros trou à l'arrière d'une bague mobile, procédé archaïque de pavillonage. Les différences entre l'orgue Suret-Giroud et l'orgue Suret initial sont mineures : un plein jeux de 5 rangs est mis en place de l'euphone, fondu en 1955 ; les jeux à anches libres disparus ont été reconstitués à anches battantes ; la console, la charpente et la mécanique disparues ou altérées en 1955 ont été reconstituées. Le tableau ci-dessous récapitule les jeux de l'orgue de Sainte Elisabeth.

Positif (ut^1- fa^5)	**Grand-Orgue** (ut^1- fa^5)	**Récit** (ut^1- fa^5)	**Pédale** (ut^1- fa^3)
basse de flûte 8'	flûte 16'	flûte allemande 8'	Bombarde 16'
Dessus de flûte 8'	grand cornet V rangs 16'	bourdon 8'	Trompette 8'
bourdon 8'	montre 8'	gambe 8'	Clairon 4'
kéraulophone 8'	bourdon 8'	voix céleste 8'	Soubasse 16'
prestant 4'	flûte 8'	flûte octaviante 4'	Flûte 8'
nasard 2'2/3	gambe 8'	gambe 4'	Flûte 4'
basse de basson 8'	prestant 4'	cornet V rangs 8'	
dessus de hautbois 8'	octavin 2'	cor anglais 16'	
Trompette 8'	plein jeu V rangs	trompette 8'	
basse de clairon 4'	bombarde 16'	clarinette 8'	
dessus de clairon 4'	$1^{ère}$ trompette 8'	hautbois 8'	
	$2^{ème}$ trompette 8'	voix humaine 8'	
	clairon 4'		

La figure suivante est une photo de la partie de l'orgue étudiée, le positif. Elle permet de ce faire une idée de la disposition des tuyaux dans le buffet. On peut y remarquer notamment : les anches situées au premier plan, le bourdon à cheminée juste derrière et au fond les basses de flûte et de bourdon bouchées en bois.

Figure 3 : Vue générale (à gauche) et de l'intérieur (à droite) du positif

Première partie :
Protocole d'enregistrement.

I) Protocole d'enregistrement

1) Procédure

La campagne d'enregistrement a été menée en trois étapes.

La première a consisté à calibrer les microphones et à régler le gain du préamplificateur de façon à avoir le maximum de dynamique. Pour ce faire, nous avons joué une combinaison de jeux d'anches (niveau maximal que nous n'allions pas dépasser de toute façon pendant les enregistrements proprement dit). Les microphones étaient alors situés l'un en bout de tribune et l'autre au centre du buffet. Pendant la tenue de la note, le gain du préamplificateur était réglé et fixé à la limite de la saturation. Ensuite, un calibrateur, délivrant un signal acoustique à la fréquence de 1000 Hz de 94 dB SPL quand sa sortie est collée au microphone, a été utilisé de façon à connaître le niveau dB SPL correspondant à l'amplitude sur chacune des voies enregistrées.

La deuxième étape fut l'enregistrement en deux positions de la totalité des tuyaux du positif (un microphone en bout de tribune et un autre au centre du buffet ; tous deux fixes, comme lors de la calibration). Pour chacun des 9 jeux, tous les tuyaux ont été joués en descendant la gamme chromatique (54 notes par jeu sauf pour le kéraulophone qui en présente 42). Chaque note était maintenue environ trois secondes puis relâchée un temps suffisant pour attendre la fin de la réverbération dans l'église. Les fichiers contenant les gammes chromatiques ont ensuite été découpés à la main (à l'aide du logiciel Adobe Audition) pour permettre l'analyse note par note des signaux.

La troisième étape a été effectuée dans le but de réaliser des tests sur l'influence de la position du microphone par rapport à un tuyau, dans le buffet. Le tuyau choisi était dans le registre médium du prestant (jeu habituellement accordé en premier). Nous avons donc fait varier la position d'un microphone situé dans le buffet, et laissé l’autre microphone dans la salle en bout de tribune. Le premier microphone a été placé près de la bouche, entre la bouche et l'extrémité, près de l'extrémité et à des distances croissantes de l'extrémité du tuyau.

Lorsque cela a été possible, les enregistrements ont été réalisés le soir assez tard, de façon à limiter le bruit de fond provenant de la rue située dans un quartier très passant et animé.

Le tableau ci-dessous récapitule la campagne d'enregistrement menée sur l'instrument :

Description de l'enregistrement	Nb de micros	Position micro buffet	Position micro salle	Commentaire
Réglage preampli / étalonnage	2	Au centre du buffet	En bout de tribune	Note seule
Enregistrement basson-hautbois	2	Au centre du buffet	idem	Gamme chromatique
Enregistrement bourdon	2	Au centre du buffet	idem	Gamme chromatique
Enregistrement clairon	2	Au centre du buffet	idem	Gamme chromatique
Enregistrement flûte	2	Au centre du buffet	idem	Gamme chromatique
Enregistrement kéraulophone	2	Au centre du buffet	idem	Gamme chromatique
Enregistrement nasard	2	Au centre du buffet	idem	Gamme chromatique
Enregistrement prestant	2	Au centre du buffet	idem	Gamme chromatique
Enregistrement trompette	2	Au centre du buffet	idem	Gamme chromatique
Test position micro 1	2	Mi tuyau	idem	Note seule
Test position micro 2	2	2/3 longueur tuyau	idem	Note seule
Test position micro 3	2	5 cm bouche axe	idem	Note seule

Test position micro 4	2	15 cm bouche axe	idem	Note seule
Test position micro 5	2	24 cm bouche axe	idem	Note seule
Test position micro 6	2	24 cm bouche décallé de 15 cm à gauche	idem	Note seule
Test position micro 7	2	24 cm bouche décallé de 15 cm à droite	idem	Note seule
Test position micro 8	2	80 cm bouche axe	idem	Note seule

2) Matériel

Pour réaliser ce type d'enregistrements, le matériel suivant a été utilisé :

- Deux microphones Earthworks QTC1 omnidirectionnels sortie XLR, de sensibilité 30mV/Pa et de réponse fréquentielle suivante :

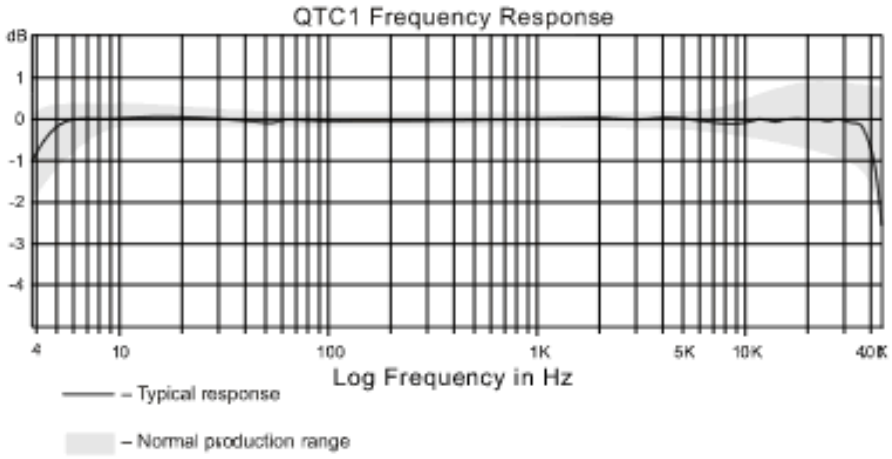


Figure 4 : Réponse fréquentielle des microphones

- Un préamplificateur USBPre Sound Device, alimenté par USB, permettant un enregistrement du signal en numérique en 16 bits sur 2 voies, à une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHZ, et connecté à un PC portable DELL. Ce préamplificateur fait aussi office d'alimentation fantôme de 48 V pour les deux microphones.

- Un calibrateur B&K type 4231 délivrant un signal de 1000 Hz ± 0.1% et 94dB SPL ± 0.20 dB lorsque ce dernier est collé au microphone. Un adaptateur spécial pour notre type de microphones a été utilisé de façon à ne pas fausser la mesure.

- Des câbles XLR de diverses tailles.

Voici un schéma du montage réalisé :

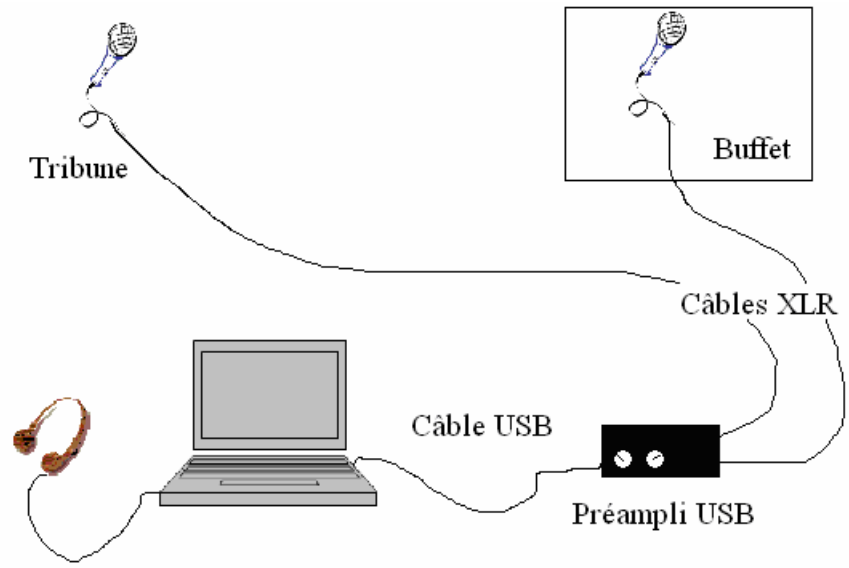


Figure 5 : Schéma du système d'enregistrement

Deuxième partie :
Analyse du signal.

II) Analyse du signal

Les analyses acoustiques des enregistrements sont destinées à fournir des informations compréhensibles et interprétables par des acousticiens, par des chercheurs mais aussi par les facteurs eux-mêmes pour les aider en cas de restauration. A terme, ces analyses visent également à permettre une évaluation acoustique comparative du style des instruments. Nous nous sommes donc basés sur les modifications recherchées par les facteurs lors de l'harmonisation pour déterminer quels types d'analyses nous allions effectuer.

Lors de l'harmonisation, le facteur cherche à ajuster la partie stationnaire périodique du son (amplitude relative des harmoniques, par exemple). Pour étudier cette partie, Stepanek et al. [12] calculent des propriétés spectrales (centre de gravité spectral, irrégularité spectrale…) afin d'étudier leurs variations au sein d'un jeu et de comparer les jeux entre eux.

Le facteur cherche aussi à ajuster le transitoire d'attaque (vitesse, contenu et évolution harmonique). Angster et al. [7] relève plutôt cette partie en indiquant qu'il s'agit de la partie la plus importante et la plus délicate. Les auteurs basent donc leur documentation sur l'analyse de l'évolution temporelle du niveau des harmoniques.

Le facteur ajuste également le niveau sonore des tuyaux et vise une égalisation de ces niveaux. Ce paramètre est important et peu d'études ont été réalisées sur le sujet.

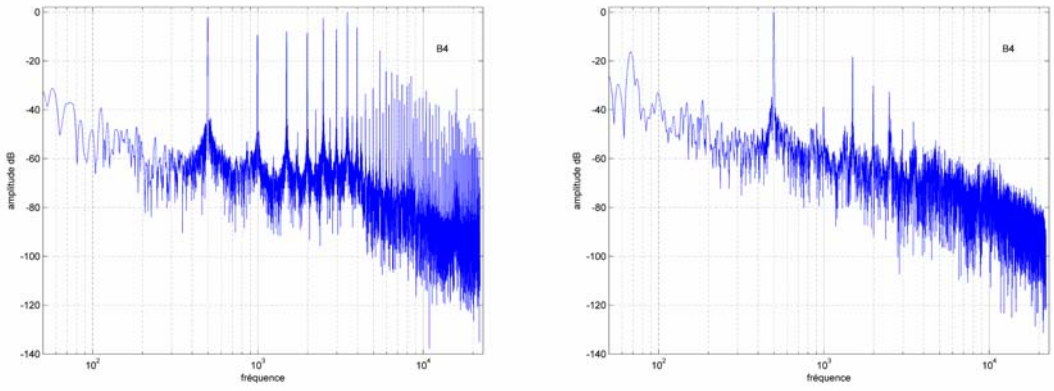
Nous avons donc entrepris de réaliser ces analyses suivant ces trois axes. L'analyse du niveau sonore et son évolution dans les différents jeux ont été possibles grâce à la calibration des enregistrements. L'analyse de la partie stationnaire périodique des sons a été effectuée en calculant la transformée de Fourier à long terme et en récupérant les amplitudes des harmoniques. Enfin, l'analyse des transitoires d'attaque a été réalisée par filtrage autour des harmoniques et récupération de l'enveloppe des signaux filtrés. Toutes ces analyses ont été effectuées avec MATLAB.

1) Partie stationnaire périodique

Cette partie du son a été analysée en calculant la transformée de Fourier à long terme puis en effectuant une recherche des pics pour récupérer les amplitudes des harmoniques. Pour cela, une fois le spectre d'amplitude calculé, une estimation de pitch a été réalisée par la méthode du produit spectral. Une recherche de maxima autour des multiples de cette fréquence fondamentale (dans la limite de la demi fréquence d'échantillonnage) est ensuite effectuée pour la récupération des amplitudes des harmoniques. Le nombre d'harmoniques renvoyé est limité par la fréquence fondamentale de la note la plus aigue du jeu et la demi fréquence d'échantillonnage (22,05 kHz) car le programme analyse toutes les notes d'un jeu automatiquement. Par exemple, pour un jeu de 8 pieds, la fréquence fondamentale de la note la plus aigue est d'environ 1400 Hz, ce qui signifie que l'on aura au maximum les amplitudes des 14 premiers harmoniques (1400*14=19600 Hz $<$ 22,05 kHz).

L'idée est de donner des cartes d'identités sonores des différents jeux en traçant la totalité des spectres d'amplitude pour chaque jeu. Ceci permet de repérer la présence d'éventuels formants, d'évaluer la pente spectrale et de calculer diverses propriétés spectrales (comme le centre de gravité).

Les figures suivantes montrent deux exemples de spectres d'amplitude de deux notes (troisième si du clavier) de même fréquence fondamentale de deux jeux différents : trompette et bourdon.



.

Figure 6 : Exemples de spectres d'amplitude pour deux jeux très différents

Cette figure est un exemple de l'évolution du centre de gravité spectral (sur les dix premiers harmoniques) pour la flûte.

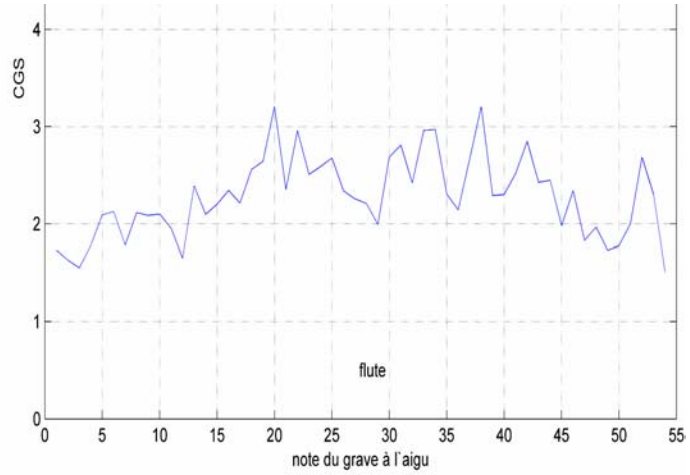


Figure 7 : Evolution du centre de gravité spectral de la flûte 8'

2) Partie transitoire d'attaque

Les transitoires d'attaques sont des parties très importantes pour la perception globale de la qualité sonore et leurs ajustements sont particulièrement importants lors de l'harmonisation de l'orgue.

Cette partie du son a été analysée en filtrant (filtre RIF) les signaux transitoires autour des fréquences harmoniques déterminées par l'analyse de la partie stationnaire. On récupère ensuite l'enveloppe des signaux filtrés en calculant le module de leurs transformées de Hilbert. On obtient alors l'évolution temporelle de l'amplitude des harmoniques lors du transitoire. Ceci peut également être réalisé en calculant la transformée de Fourier à court terme du signal puis en traçant les bandes de fréquences contenant l'harmonique que l'on désire étudier. Mais cette méthode n'était pas toujours satisfaisante. En effet, la grande plage de fréquence fondamentale sur la tessiture de l'orgue (de 1400 Hz à 65 Hz environ pour un jeu de 8 pieds) nécessite un changement de résolution fréquentielle et donc un changement de la taille de fenêtre d'analyse. Cette fenêtre temporelle a été fixée à 3 fois la période. Pour les notes les plus graves, la résolution fréquentielle doit devenir plus importante et la fenêtre d'analyse devenait trop grande (une dizaine d'échantillons pour le transitoire) ce qui ne permettait pas

une analyse correcte. Les deux méthodes ont toutefois été implémentées et les allures des transitoires obtenues étaient tout à fait similaires. Nous avons donc choisi la méthode utilisant la transformée de Hilbert, plus précise pour les notes graves.

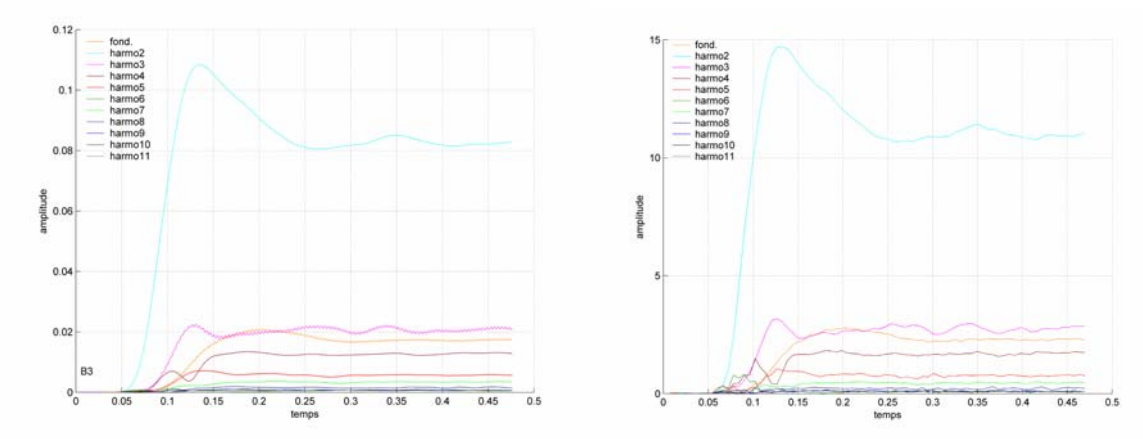


Figure 8 : Comparaison entre les deux méthodes de visualisation des transitoires d'attaque : filtrage-enveloppe à gauche et TFCT à droite.

Les figures suivantes montrent deux exemples de transitoires d'attaques de deux notes (deuxième la du clavier) de même fréquence fondamentale de deux jeux différents : basson-hautbois (à droite) et bourdon (à gauche).

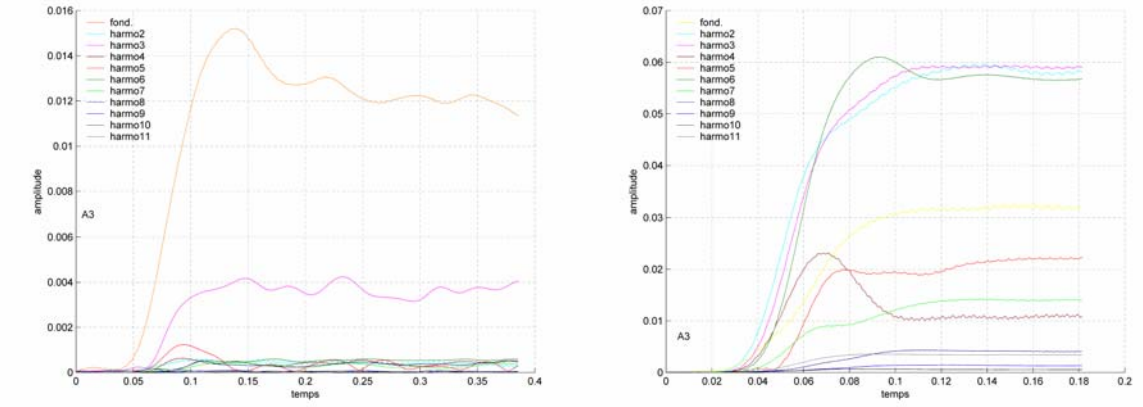


Figure 9 : Exemples de transitoires d'attaque pour deux jeux très différents

3) Niveau sonore

Les niveaux sonores de tous les tuyaux ont été calculés en se basant sur la calibration réalisée auparavant. L'amplitude du signal de référence enregistré correspondait au niveau de référence de 94 dB SPL. On peut donc en déduire en récupérant l'amplitude de chaque nouvelle note, le niveau enregistré par le microphone en suivant la formule :

Niveau(note) = 20*log10(amp_note/amp_ref) + 94 en dB SPL

Une remarque est toutefois nécessaire ici. En effet, le microphone était fixe au centre du buffet mais n'était pas à une distance fixe des sources sonores. Cependant, aux vues des dimensions du buffet du positif (2,64 m de haut, 2,62 m de long et 1 m de profondeur) et de la disposition des tuyaux à l'intérieur (dimension du sommier 1,74 m de large sur 0,72 m de profondeur), la distance minimale (tuyau à la verticale du micro) était d'environ 60 cm et la distance maximale environ 1 m. Une variation d'une cinquantaine de centimètres ne génère que des erreurs de quelques dB.

La figure suivante présente l'évolution du niveau de la trompette (beaucoup plus fort dans le grave que dans l'aigu).

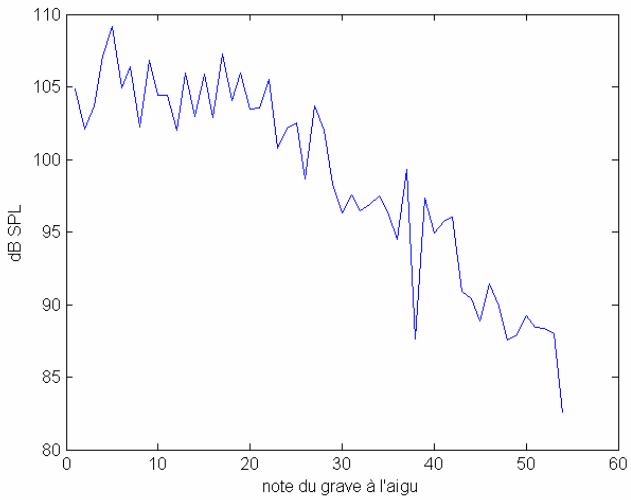


Figure 10 : Evolution du niveau sonore pour la trompette 8'

Troisième partie :
Résultats.

III) Résultats

1) Caractéristiques sonores des jeux et comparaisons entre jeux

Les enregistrements de la totalité des tuyaux du positif (microphone fixe situé à l'intérieur du buffet au centre) ont permis de dégager des propriétés générales ainsi que de montrer des inégalités au sein des jeux.

a) Partie stationnaire périodique des sons

Pour la partie stationnaire des sons, l'analyse des deux harmoniques les plus importants (Figure 11) a permis de distinguer globalement les grandes familles de jeux :

- les flûtes (bourdon et nasard) de timbre pauvre, la fondamentale domine toujours assez fortement les harmoniques supérieurs,

- les principaux (flûte, prestant et kéraulophone) de timbre plus riche avec une dominance du fondamental ou du second harmonique,

- les anches (trompette, clairon et basson-hautbois) de timbre très riche avec très souvent des harmoniques élevés dominant de peu les premiers.

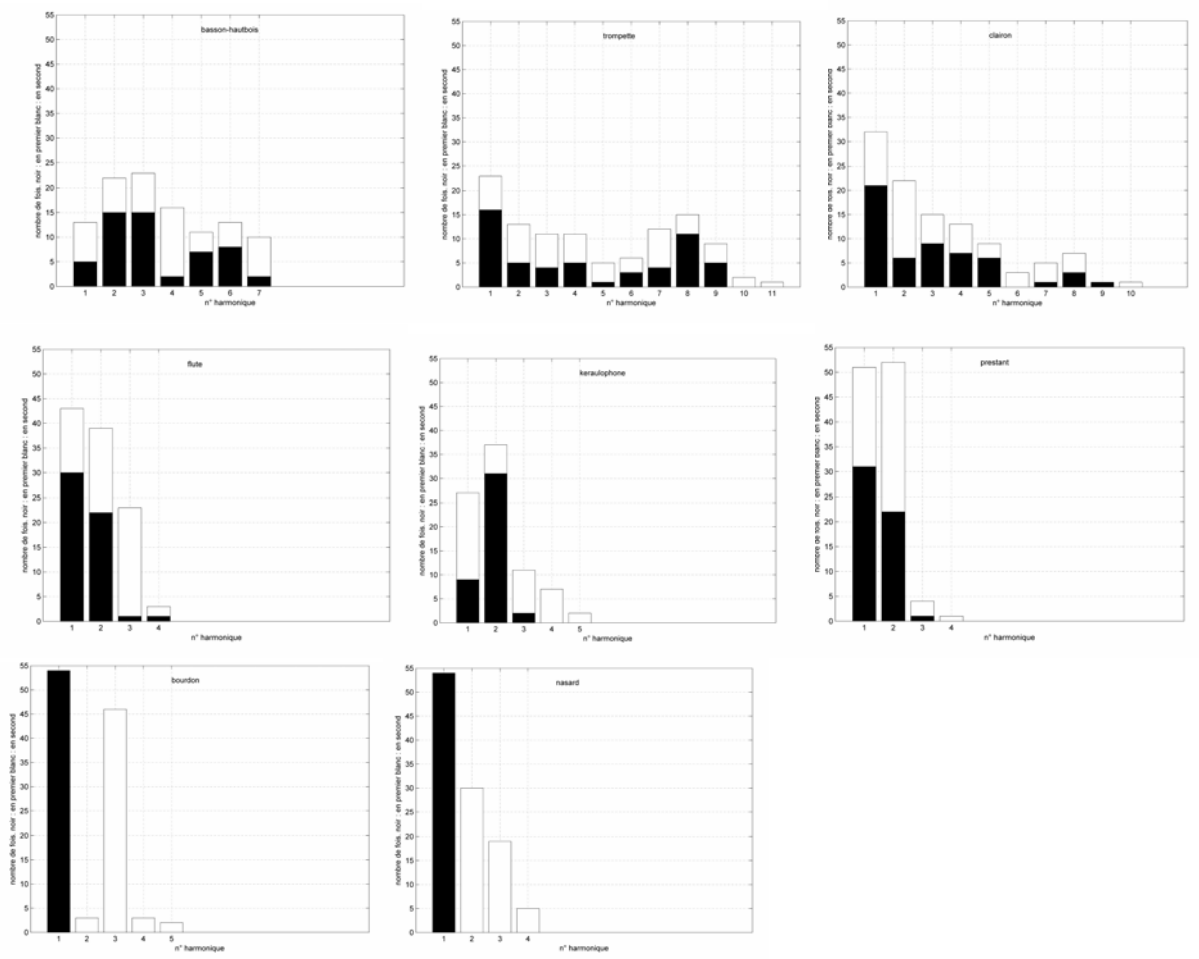


Figure 11 : Importance des harmoniques pour tous les jeux du positif.

L'analyse des spectres fournit des renseignements plus précis (Voir Annexe). En effet, elle permet de comparer entre elles toutes les notes d'un jeu et de déterminer des caractéristiques comme la pente spectrale ou le centre de gravité spectral. On peut également y remarquer les transitions qu'il existe dans certains jeux. Par exemple, la flûte dans le registre grave présente une extrémité bouchée (de façon à diminuer la taille des tuyaux graves et ainsi diminuer l'encombrement), on peut remarquer qu'alors seuls les harmoniques impairs sont présents. De même, le bourdon est à cheminée dans le registre aigu et medium, pour passer à un bourdon bouché complètement, ce qui se traduit par une disparition complète de l'harmonique 2. Enfin, on peut noter que le clairon est à 8' dans le registre aigu du fa6 au do6 puis reprise au si6, sinon les tuyaux seraient trop petits et compliqués à réaliser. On peut également noter que le basson-hautbois présente une caractéristique formantique sans doute due à la forme en double cône du jeu alors que les autres anches (clairon et trompette) présentent une fondamentale souvent prédominante.

Toutefois ces caractéristiques ne sont pas constantes au sein de chaque jeu. Les rapports d'amplitude des premiers harmoniques peuvent varier énormément comme c'est le cas pour la flûte. La zone du formant du basson-hautbois est également assez variable. Un bon moyen de rendre compte de ces variations « intra-jeu » est de tracer le centre de gravité spectral (sur les 10 premiers harmoniques) en fonction de la note jouée (Figure 12). On reconnaît ici aussi les jeux de grande taille (bourdon et nasard) par leur CGS faible entre 1 et 2, les principaux (flûte, prestant et kéraulophone) par leur CGS de 2 à 3,5 et les anches dont le CGS décroît fortement (de 6,5 à 2,5) du grave à l'aigu. On constate que ces valeurs présentent des variations de quelques dizaines voire centaines de pourcents !

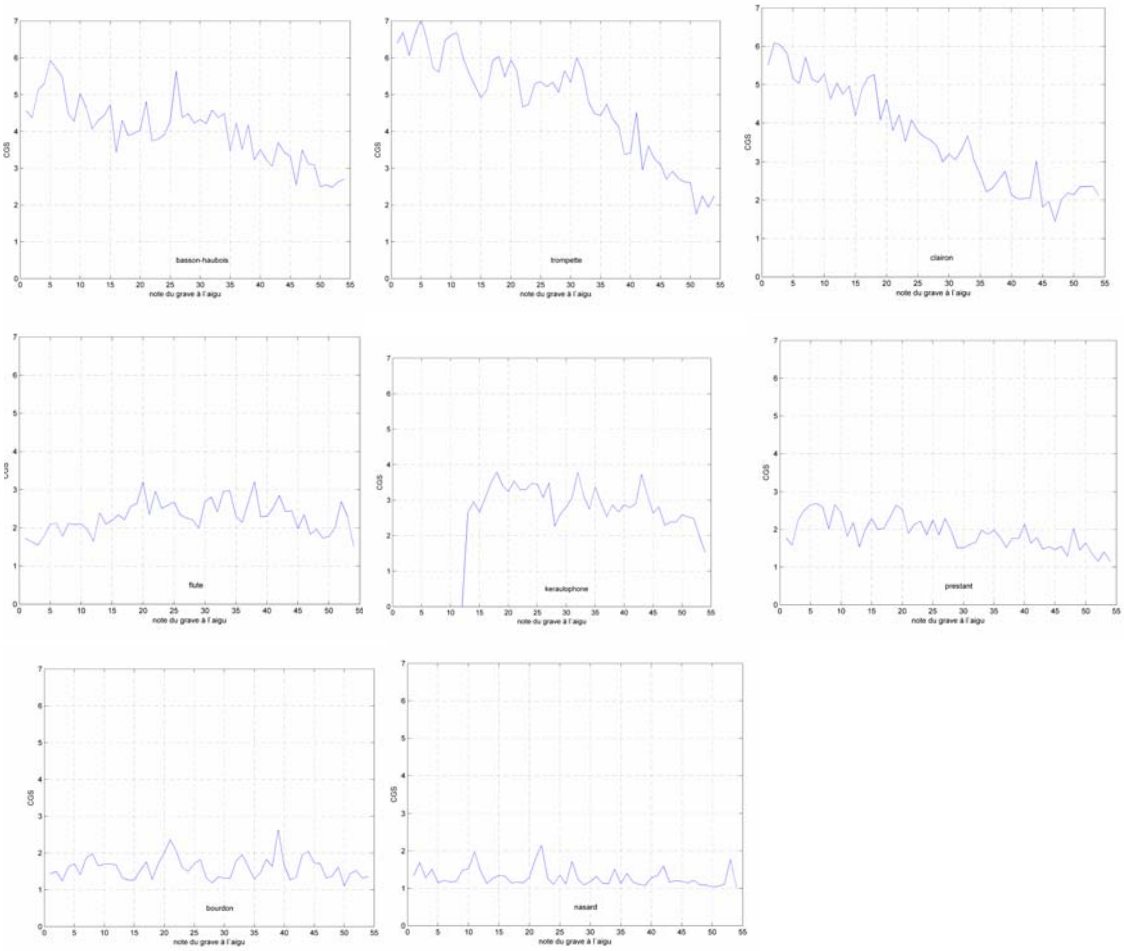


Figure 12 : Evolution du centre de gravité spectral pour tous les jeux du positif.

b) Transitoire d'attaque

L'étude des transitoires d'attaque permet de tirer des conclusions du même type (Voir Annexe).

Tout d'abord, on distingue aisément les tuyaux à anches des tuyaux à bouches par leur temps global d'attaque. Les anches présentent des temps d'attaque à peu près constants sur tout le jeu, de 0,1 s à 0,15 s environ. C'est cette rapidité d'attaque qui est recherchée par les facteurs pour les anches. Les temps d'attaque des tuyaux à bouche décroissent assez régulièrement lorsque l'on va du grave à l'aigu, de 0,5 s jusqu'à 0,1 s environ.

Pour le nasard, le fondamental apparaît le plus souvent le premier (de l'ordre de 0,03 s plus rapidement que les harmoniques supérieurs).

Il en va de même pour le bourdon, excepté dans le registre grave où le tuyau a tendance à quintoyer (l'harmonique 3 apparaît en premier) au début de l'attaque.

Dans le registre aigu du prestant, c'est le fondamental qui apparaît en premier puis dans les registres medium et grave, le tuyau a tendance à octavier.

C'est l'octave de la flûte qui est le plus souvent la plus rapide sauf dans le registre grave, les tuyaux étant bouchés, c'est la quinte qui domine en début d'attaque.

De même, l'harmonique 2 du kéraulophone est souvent le plus rapide.

Pour les anches, il n'y a pas vraiment de caractéristique claire. Tous les harmoniques commencent plus ou moins en même temps et s'établissent à un régime stable à peu près à la même vitesse. En effet, le facteur recherche la vitesse et la simultanéité ; une attaque lente et irrégulière est alors perçue par l'auditeur comme un "canard" d'anche.

Ici encore, ces caractéristiques générales ne sont pas constantes au sein des jeux. En effet, la forme des attaques n'est jamais exactement semblable d'une note à l'autre.

Ces variations internes aux jeux, tant spectrales que d'attaque, posent la question de l'homogénéité de sonorité. En effet, l'auditeur perçoit une unité de sonorité malgré ces variations parfois importantes. Si ces changements permettent d'éviter de tomber dans l'ennui à l'écoute, quelle est la limite maximale d'irrégularités permettant à l'auditeur d'affirmer que le jeu est encore bien harmonisé ? Il serait sans doute intéressant de réaliser des tests de perception, en demandant par exemple de grouper des sons de caractéristiques variables quand l'auditeur estime qu'ils font partie d'un même jeu. Ceci permettrait d'en tirer des conclusions sur les paramètres importants perceptivement pour la documentation acoustique.

c) Niveau sonore

Les variations de niveaux sonores ont été étudiées. Pour les anches, le niveau décroît fortement et assez linéairement lorsque l'on passe du registre grave au registre aigu. On peut identifier sur le clairon le passage de 4' à 8' dans le registre aigu. Les niveaux de la trompette et du clairon sont globalement supérieurs à ceux du basson-hautbois. Les niveaux des tuyaux à bouches sont plus constants mais présentent toutefois des variations importantes allant de 10 dB à 20 dB. Ces variations sont importantes pour le nasard, qui doit être difficile à harmoniser à cause de sa tessiture décalée vers l'aigu (2' 2/3). Les variations importantes de la flûte sont sans doute dues au fait que certains de ses tuyaux sont situés en montre, le son est donc étouffé par rapport aux tuyaux situés dans le buffet même. On peut remarquer également que le kéraulophone est bien égalisé (des variations de quelques dB seulement d'une note à l'autre).

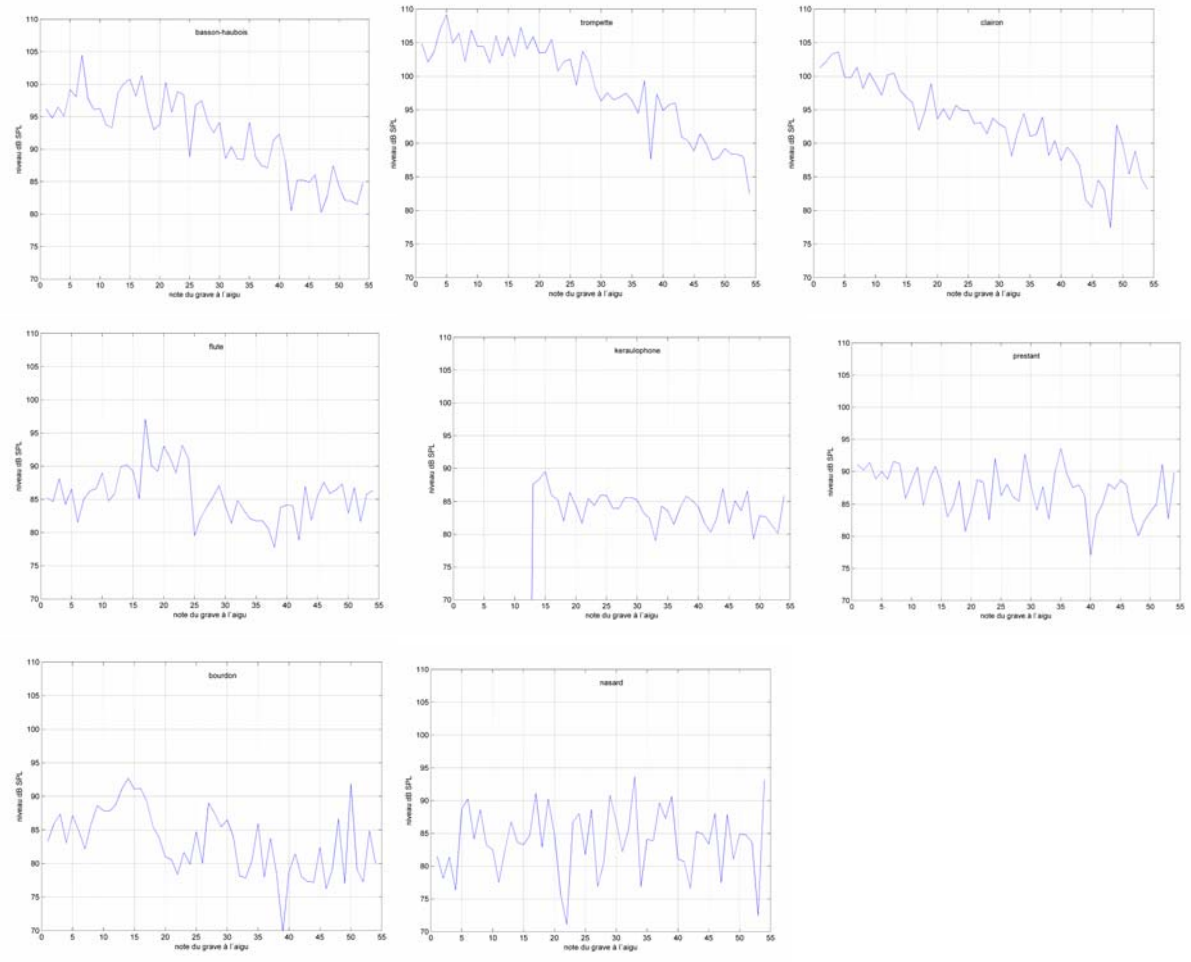


Figure 13 : Niveau en dB SPL pour tous les jeux du positif

2) Etude de l'influence de la position du microphone

Dans le but de vérifier l'influence de la position du microphone, nous avons procédé à des enregistrements tests :

- en faisant varier la distance du microphone au tuyau (le la du diapason du prestant),
- en comparant les signaux enregistrés dans la salle et dans le buffet.

a) Variations en fonction de la position du microphone par rapport au tuyau dans le buffet

En réalisant ces mesures, nous avons remarqué que les signaux dépendent assez fortement de la position du microphone.

Les spectres à long terme montrent des disparités importantes, notamment dans l'amplitude relative des premiers harmoniques. Sur la figure suivante, on peut constater que le fondamental domine à mi tuyau, alors qu'à 80 cm dans l'axe, c'est l'octave qui domine. Ces phénomènes vont induire des variations du centre de gravité spectral par exemple. Ainsi, il existe plusieurs valeurs de CGS pour un même tuyau mais pour plusieurs positions de microphone.

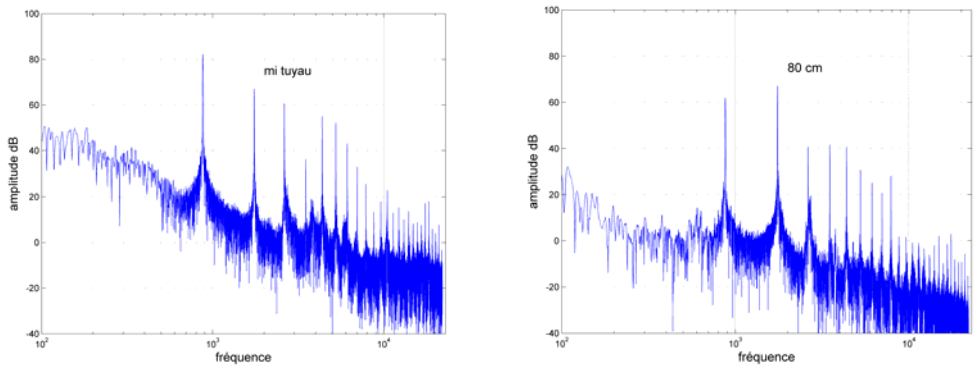


Figure 14 : Spectres pour deux positions différentes du microphone

De même, les transitoires d'attaque présentent des variations importantes et étonnantes. Ainsi, sur la figure suivante, on peut constater qu'à mi tuyau, le fondamental est de loin le plus rapide et le plus important, alors qu'à 80 cm l'octave est plus rapide à se stabiliser.

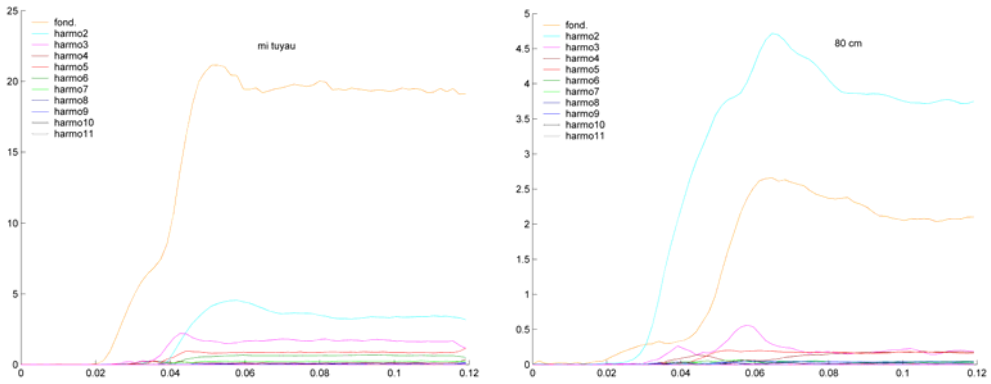


Figure 15 : Transitoire d'attaque pour deux positions différentes du microphone

Ces variations peuvent probablement s'expliquer par le fait que le buffet possède ses modes propres présentant des nœuds et des ventres à certaines fréquences, mais aussi par le fait que le rayonnement d'un tuyau à bouche est particulier. Le rayonnement par la bouche et l'extrémité ouverte du tuyau implique un champ de pression comportant des interférences. En effet, pour les harmoniques pairs, les deux sources sont d'amplitude comparable mais en opposition de phase. Théoriquement, en se plaçant à égale distance de ces deux sources, il y a annulation totale du son. Par contre pour le fondamental et les harmoniques impairs, les deux sources sont en phase et le rayonnement est omnidirectionnel.

b) Variations entre les signaux enregistrés dans la salle et dans le buffet

La part de la réverbération est beaucoup plus importante dans la salle que dans le buffet, et les propriétés de la salle (modes propres) sont ressenties beaucoup moins fortement à l'intérieur du buffet. Cependant, l'écoute par un auditeur (facteur excepté) se fait beaucoup plus souvent dans la salle que dans le buffet. Ces enregistrements ont donc été réalisés afin de rechercher et mettre en évidence le cas échéant, les différences des signaux entre les positions dans le buffet et dans la salle.

La figure suivante montre des différences importantes pour l'exemple du La4 de la flûte. On peut constater que le fondamental domine pour le microphone situé en bout de tribune, alors qu'il est de 2O dB inférieur à l'octave pour le microphone situé dans le buffet.

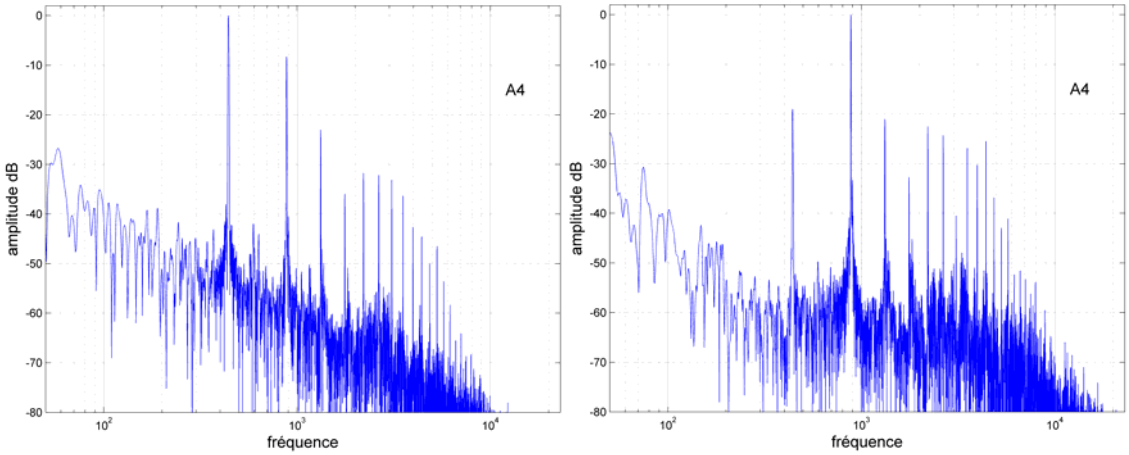


Figure 16 : Spectre du La4 de la flûte dans la salle (à gauche) et au centre du buffet (à droite)

De même, les transitoires d'attaque présentent des différences très importantes. En effet, pour le même exemple, on peut constater que dans le buffet, l'harmonique 2 précède largement le fondamental et s'établit rapidement alors que dans la salle, le fondamental apparaît en même temps et s'établit plus rapidement que l'harmonique 2.

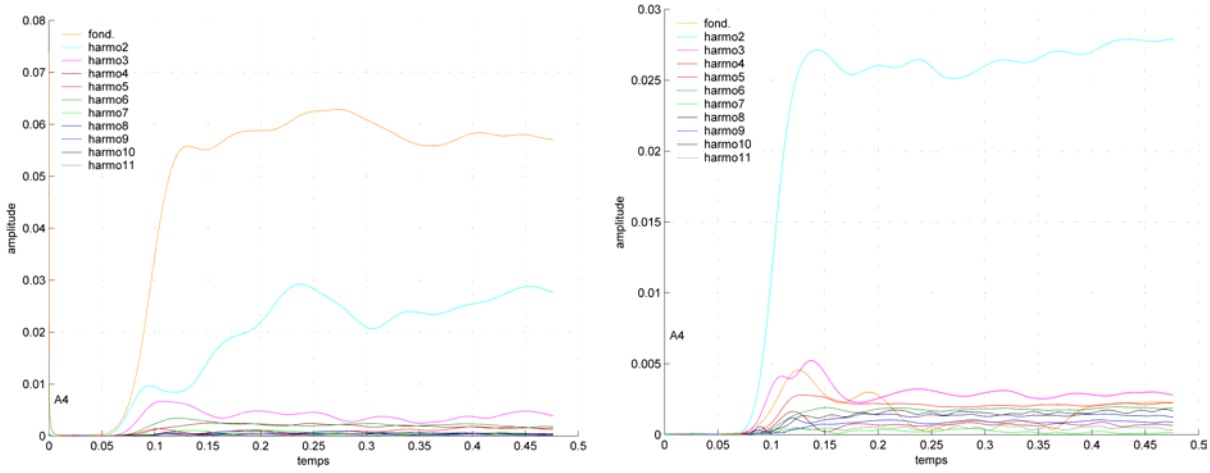


Figure 17 : Transitoire d'attaque du La4 de la flûte dans la salle (à gauche) et au centre du buffet (à droite)

Ces variations impliquent les mêmes conclusions que pour celles mesurées en déplaçant le microphone par rapport au tuyau. La variation spatiale du signal provenant d'un unique tuyau nécessite d'être prise en considération.

Malgré la sensation d'unicité sonore ressentie par un auditeur se déplaçant dans l'église, les variations des signaux dans l'espace impliquent que l'enregistrement en un point est une particularisation qui peut conduire à des ambiguïtés d'appréciation lors de l'analyse du signal. Une méthode de documentation serait plus satisfaisante si les enregistrements étaient réalisés en plusieurs positions classiques d'écoute de l'orgue comme la position de l'organiste, celle du facteur dans le buffet, et celle de l'auditeur dans la salle.

Conclusion

Conclusion

Cette étude a permis d'établir différentes pistes en vue de la documentation acoustique d'un orgue historique. Les techniques d'enregistrement et d'analyse du signal utilisées ont été pensées pour être compréhensibles notamment par les facteurs.

L'enregistrement de tous les tuyaux du « positif de dos » individuellement, jeu après jeu, a été réalisé en deux positions : un microphone dans la salle en bout de tribune, et un autre dans le buffet au centre de ce dernier. Ces enregistrements ont permis de donner des éléments pour caractériser les différents jeux d'orgues, sur trois aspects des sons : la partie stationnaire, le transitoire d'attaque ainsi que le niveau sonore. Des disparités sonores au sein d'un même jeu ont également été mises en évidence.

Des tests sur l'influence de la position du microphone par rapport à un tuyau ont aussi été réalisés. Ces tests ont montré qu'il existait une variabilité assez importante des paramètres mesurés avec cette position. Il est nécessaire d'en avoir conscience pour la documentation.

Etant donné qu'une unique position est trop particularisante, nous suggérons que la documentation acoustique soit réalisée en plusieurs positions classiques d'écoute de l'orgue : la position de l'organiste assis à la console, la position du facteur harmonisant dans le buffet, et une position d'écoute dans la nef de l'église. Les tests perceptifs réalisés par Stepanek et al. [13], vont dans ce sens. Des tentatives de caractérisation subjective des différentes sonorités d'un même tuyau dans les trois positions précédemment citées sont effectuées. Ces travaux pourraient sans doute être utilisés à des fins de documentation.

La mise en place d'un protocole d'enregistrement normalisé de ce type permettrait la construction de signaux de référence afin de pouvoir, à terme, comparer des orgues (époques, styles…) par leur documentation associée.

Bibliographie

Bibliographie

Ouvrages imprimés

[1] BEDOS DE CELLES, Dom François - *L'art du facteur d'orgues* -
Genève: Slatkine Reprints, 1984.

[2] CASTELLENGO, M. -*A propos de l'étude acoustique de l'orgue de Saint-Maximin.*- in *L'orgue de Jean-Esprit et Joseph Isnard dans la basilique de la Madeleine à Saint-Maximin.*
Nice: ARCAM-PACA, 1991. (p. 197-201).

[3] FLETCHER, N.H. & ROSSING T.D. - *The physics of musical instruments* -
New York: Springer-Verlag, 1991.

[4] MEYER, Jürgen - *Acoustics and the Performance of Music* -
Frankfurt: Verlag Das Musikinstruments, 1978.

[5] TEULON, Bernard - *De l'orgue* -
Aix en Provence: EDISUD, 1981.

Rapports imprimés

[6] RIOUX, Vincent. - *Sound quality of flue organ pipes* -
Göteborg, 2001.

Articles de périodiques imprimés

[7] ANGSTER J., MIKLOS A., -*Documentation of the sound of a historical pipe organ.*-
Applied Acoustic 46, 1995, p.61-82.

[8] ANGSTER J., MIKLOS A., -*Properties of the sound of flue organ pipes.*-
ACUSTICA acta acustica. Vol 86, 2000, p.611-622.

[9] BRAASCH J. & AHRENS C., -*Attack transients of free reed pipes in comparison to striking reed pipes and diapason pipes.*-
ACUSTICA acta acustica. Vol 86, 2000, p.662-670.

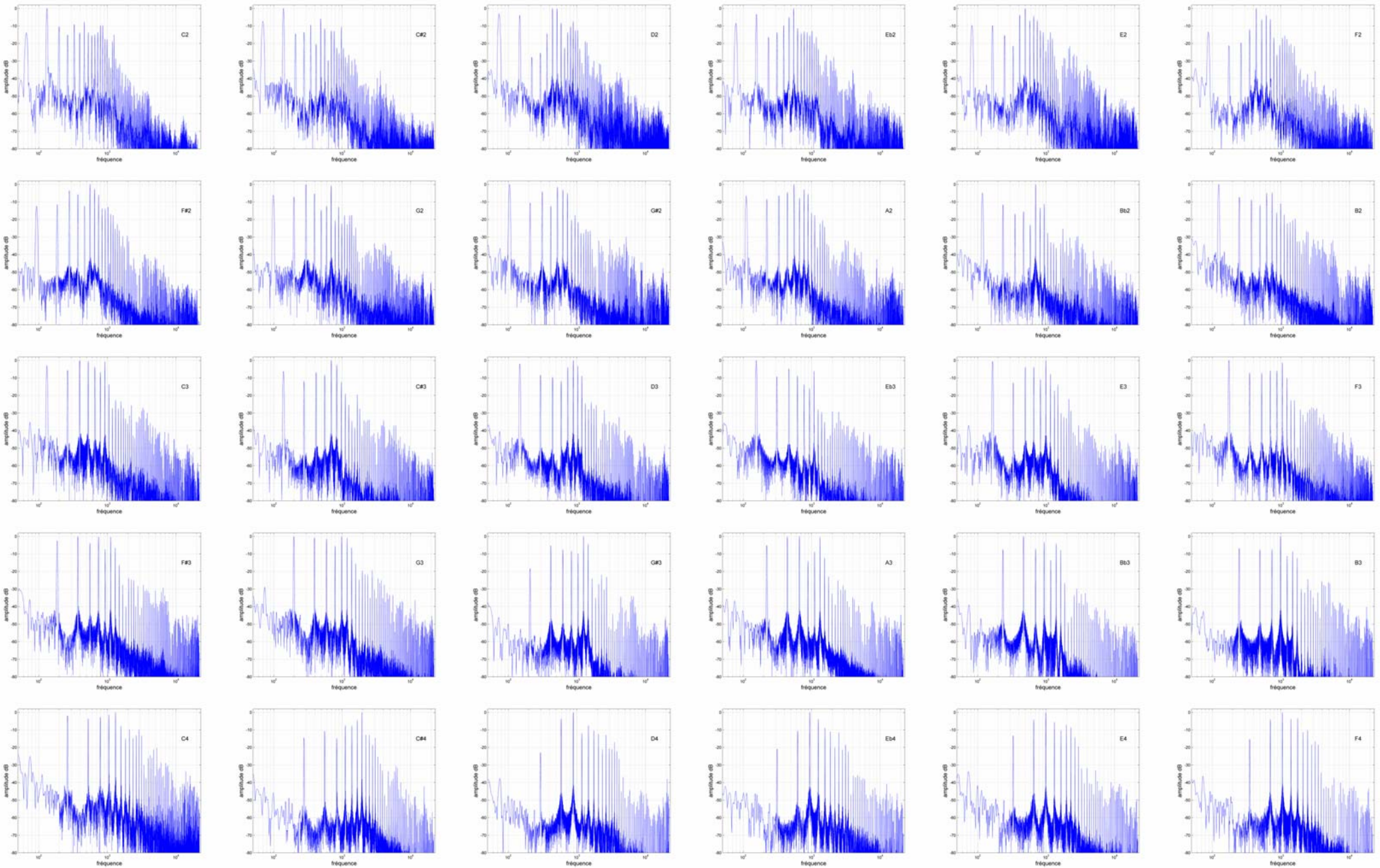
[10] CASTELLENGO, M. -*Acoustical analysis of initial transients in flute like instruments.*-
ACUSTICA acta acustica. Vol 85, 1999.

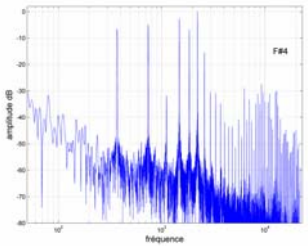
[11] STEPANEK J., OTCENASEK Z., SYROVY V., -*Acoustic documentation of church organ*-
Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference., 1994, p. 516-519

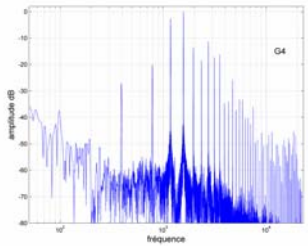
[12] STEPANEK J., OTCENASEK Z., -*Comparison of pipe organ plenum sounds*-
Proceedings of ISMA, 1995 p 86-92.
[13] SYROVY V., OTCENASEK Z., & STEPANEK J., -*Subjective evaluation of organ pipe timbre in the standard listener positions.*-
Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference., 2003.

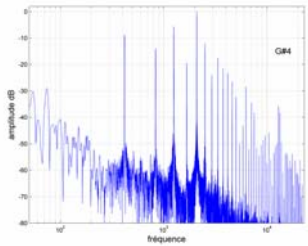
Annexe : Spectres et transitoires au complet

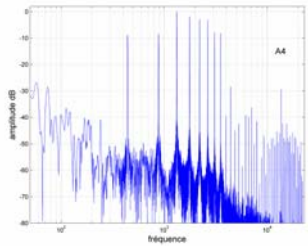
Spectres d’amplitude Basson-Hautbois

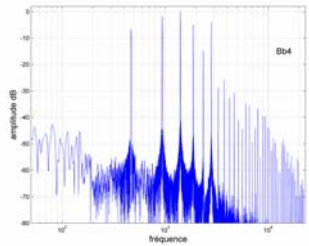


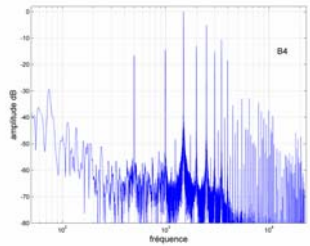

F#4
amplitude dB
fréquence

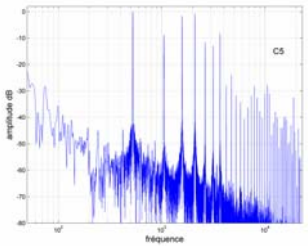

G4
amplitude dB
fréquence

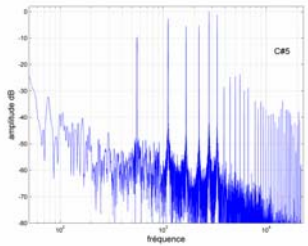

G#4
amplitude dB
fréquence

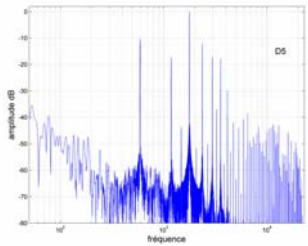

A4
amplitude dB
fréquence

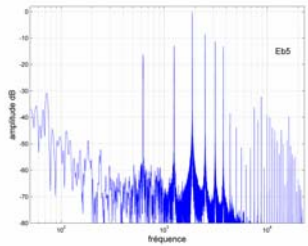

Bb4
amplitude dB
fréquence

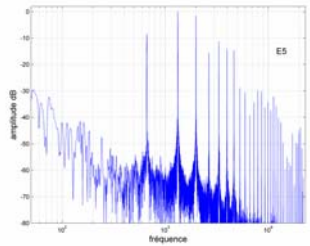

B4
amplitude dB
fréquence

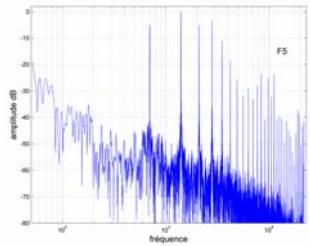

C5
amplitude dB
fréquence

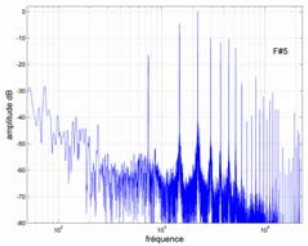

C#5
amplitude dB
fréquence

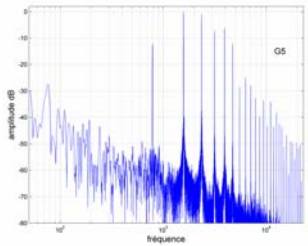

D5
amplitude dB
fréquence

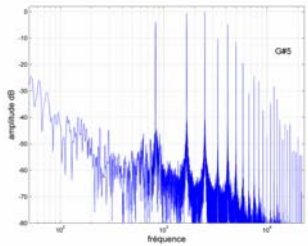

Eb5
amplitude dB
fréquence

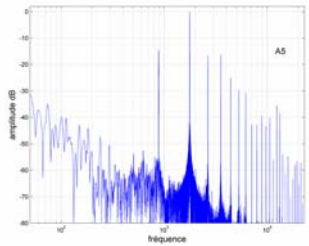

E5
amplitude dB
fréquence

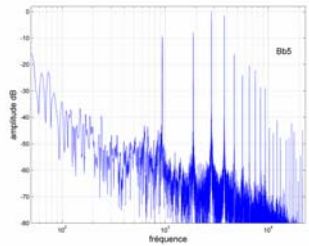

F5
amplitude dB
fréquence

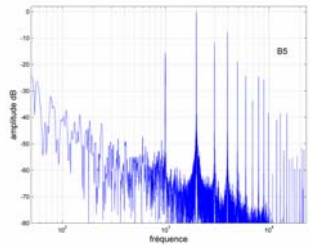

F#5
amplitude dB
fréquence

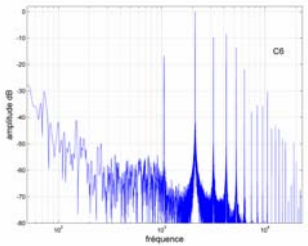

G5
amplitude dB
fréquence

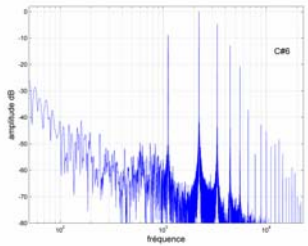

G#5
amplitude dB
fréquence

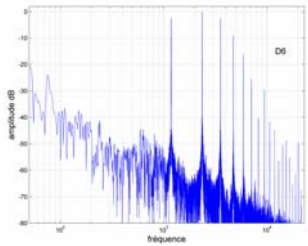

A5
amplitude dB
fréquence

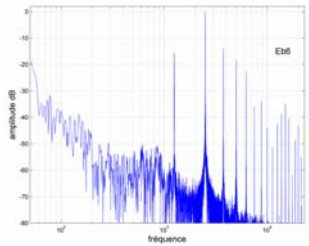

Bb5
amplitude dB
fréquence

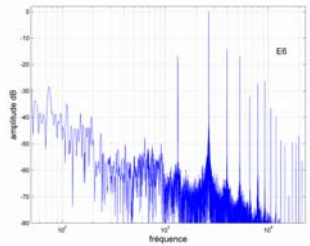

B5
amplitude dB
fréquence

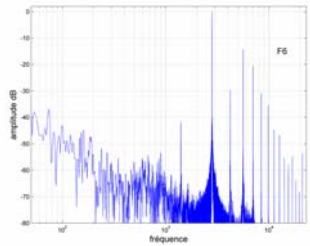

C6
amplitude dB
fréquence


C#6
amplitude dB
fréquence

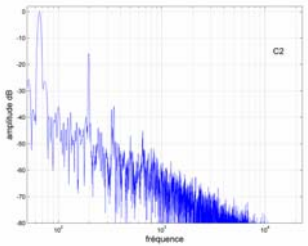

D6
amplitude dB
fréquence

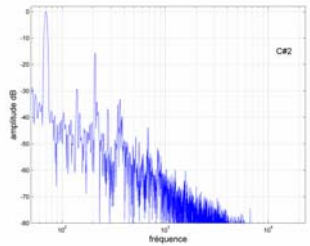

Eb6
amplitude dB
fréquence

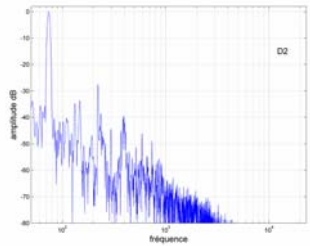

E6
amplitude dB
fréquence

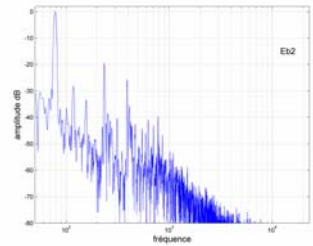

F6
amplitude dB
fréquence

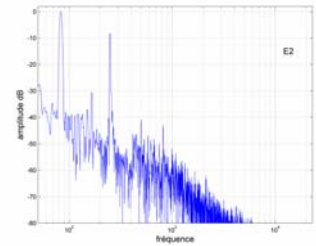
Spectres d’amplitude Bourdon

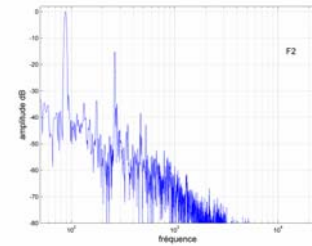


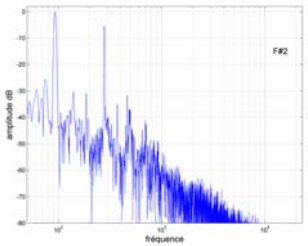


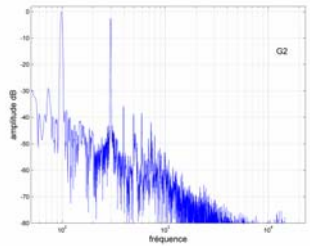


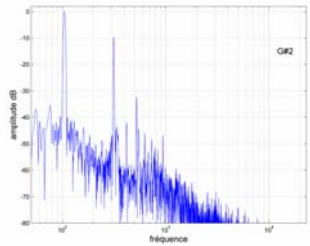


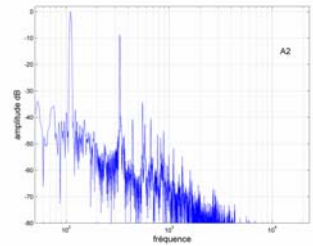


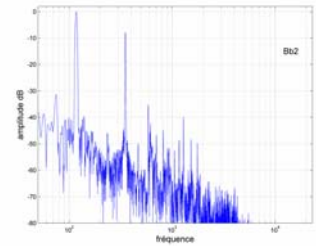


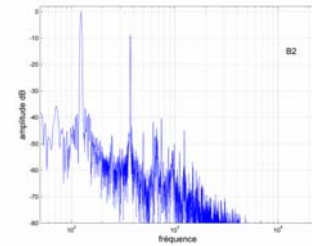


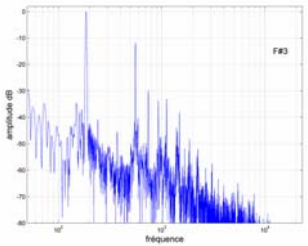


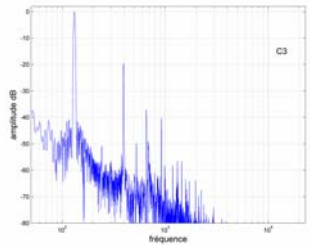


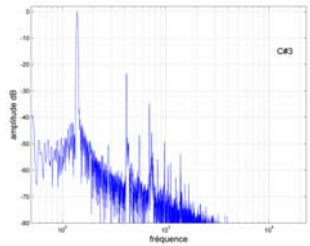


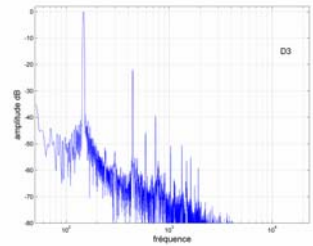


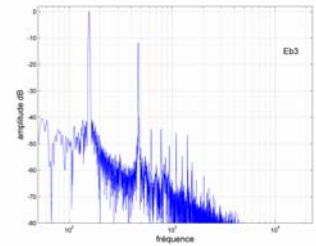


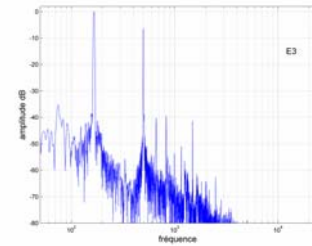


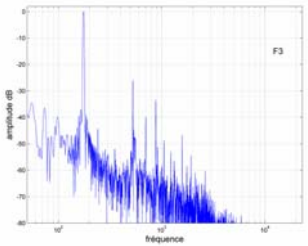


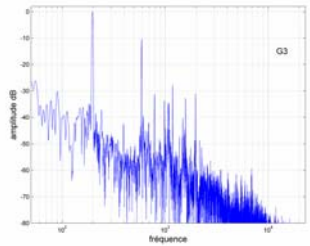


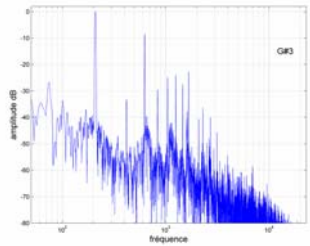


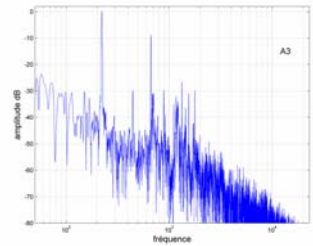


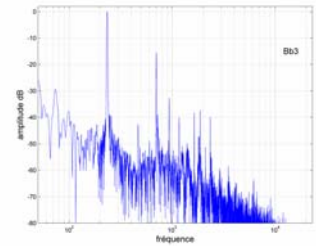


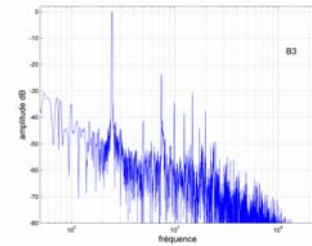


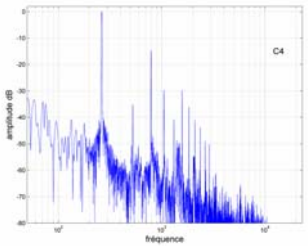


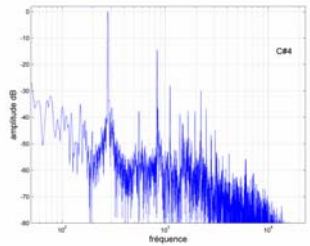


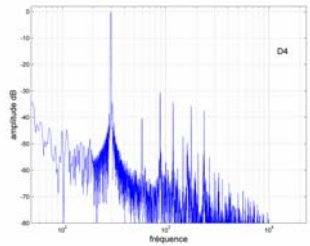


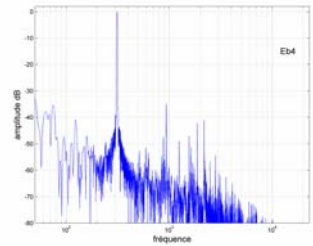


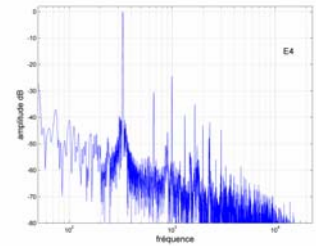


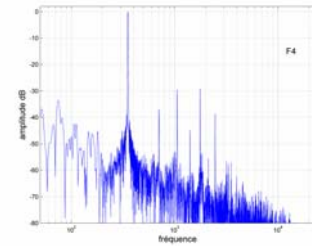


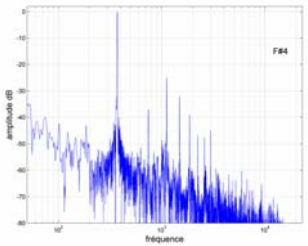


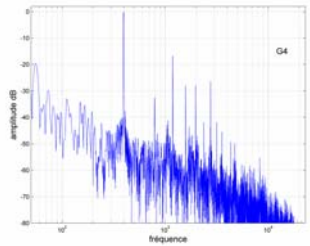


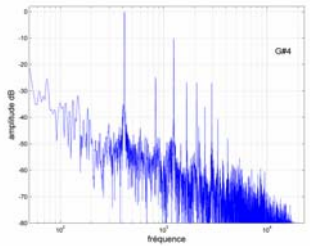


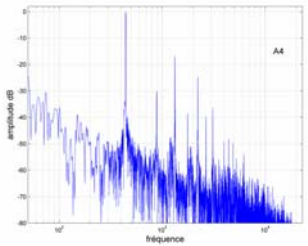


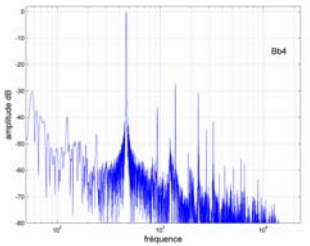


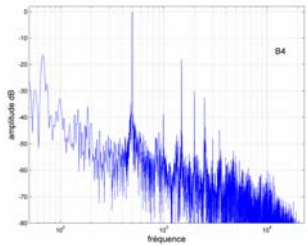

F#4
amplitude dB
fréquence

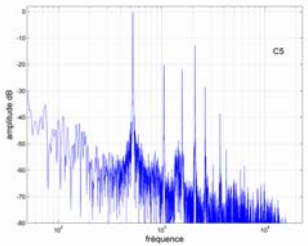

G4
amplitude dB
fréquence

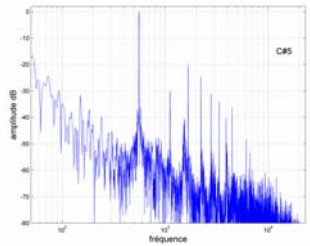

G#4
amplitude dB
fréquence

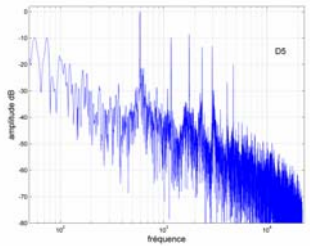

A4
amplitude dB
fréquence

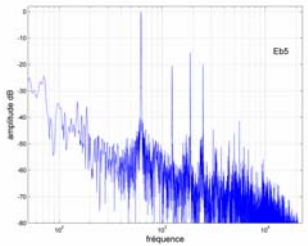

Bb4
amplitude dB
fréquence

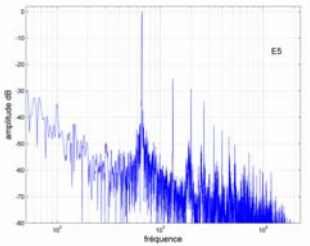

B4
amplitude dB
fréquence

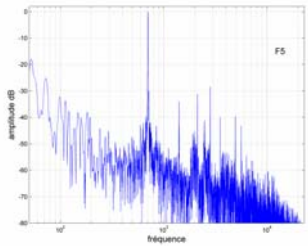

C5
amplitude dB
fréquence

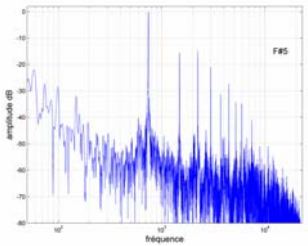

C#5
amplitude dB
fréquence

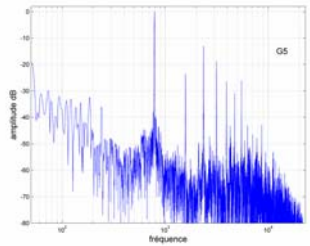

D5
amplitude dB
fréquence

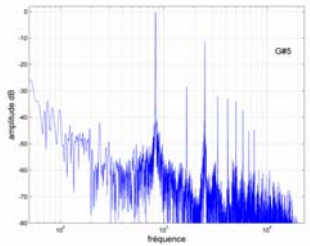

Eb5
amplitude dB
fréquence

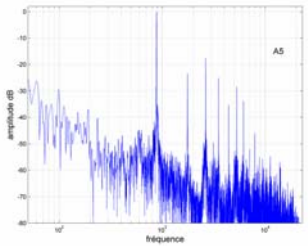

E5
amplitude dB
fréquence

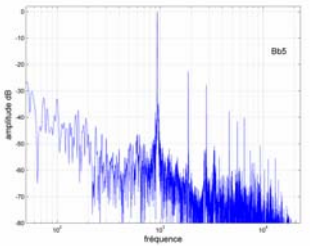

F5
amplitude dB
fréquence

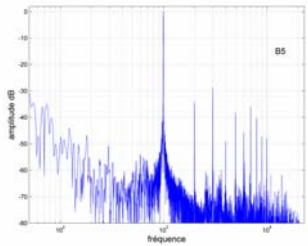

F#5
amplitude dB
fréquence

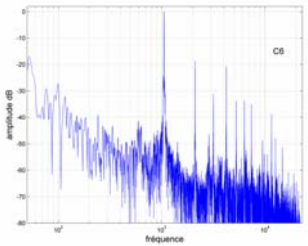

G5
amplitude dB
fréquence

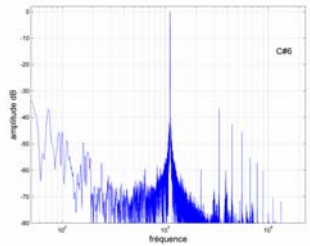

G#5
amplitude dB
fréquence

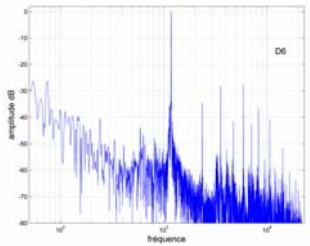

A5
amplitude dB
fréquence

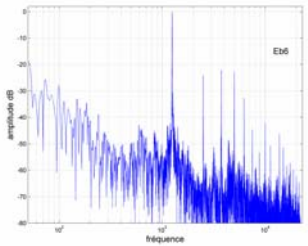

Bb5
amplitude dB
fréquence

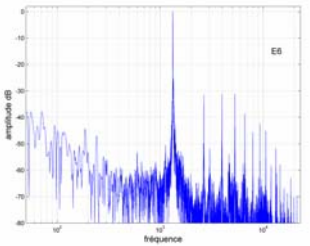

B5
amplitude dB
fréquence

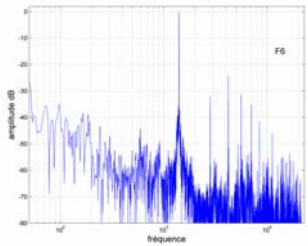

C6
amplitude dB
fréquence


C#6
amplitude dB
fréquence

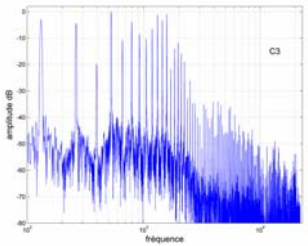

D6
amplitude dB
fréquence

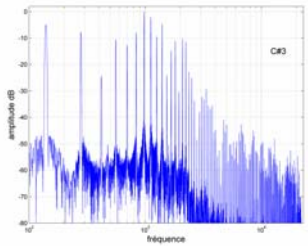

Eb6
amplitude dB
fréquence

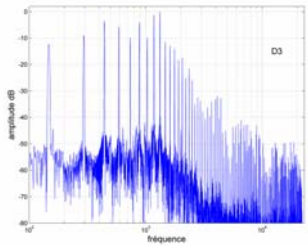

E6
amplitude dB
fréquence

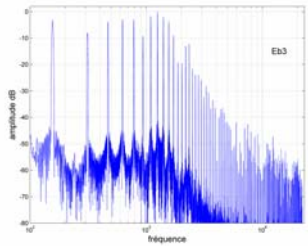

F6
amplitude dB
fréquence

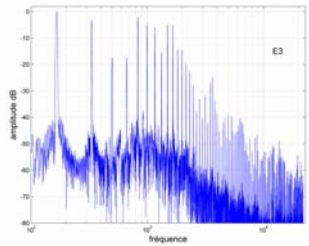
Spectres d’amplitude Clairon

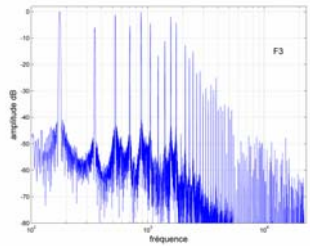


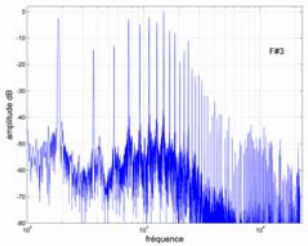


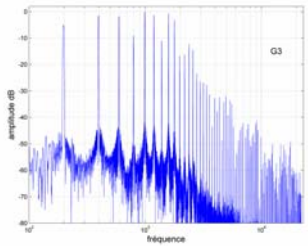


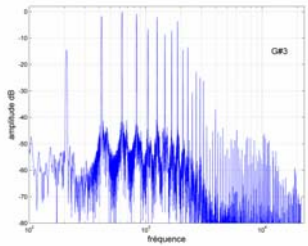


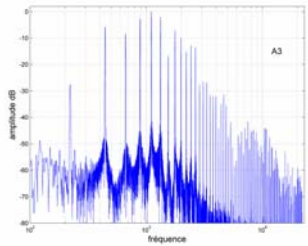


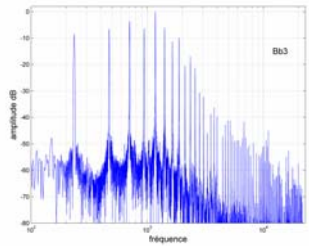


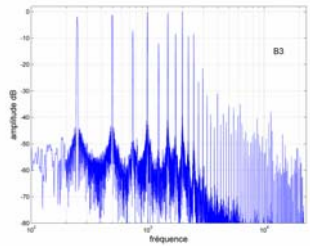


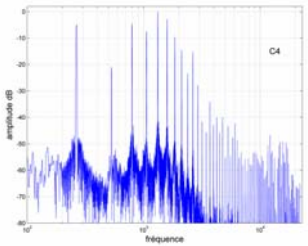


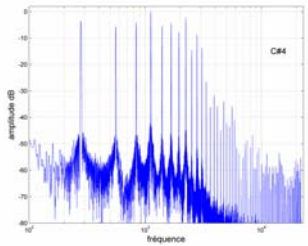


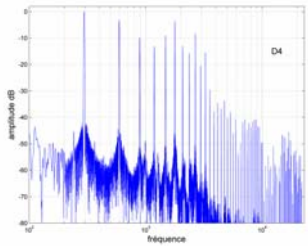


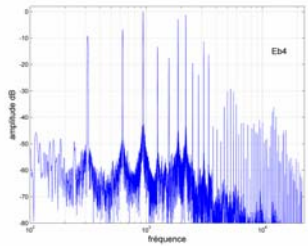


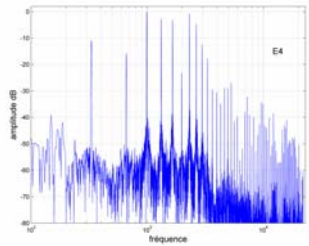


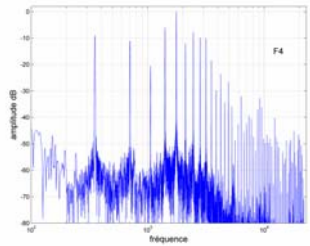


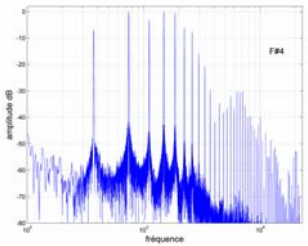


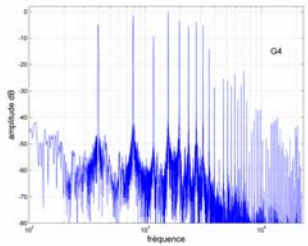


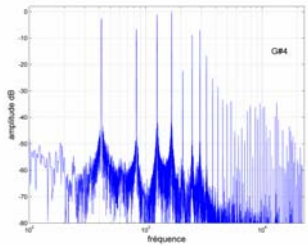


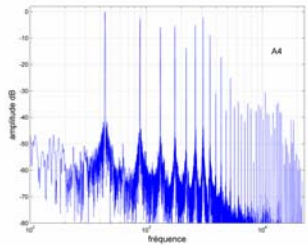


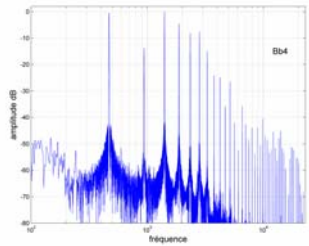


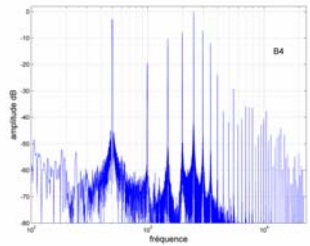


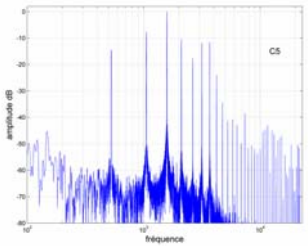


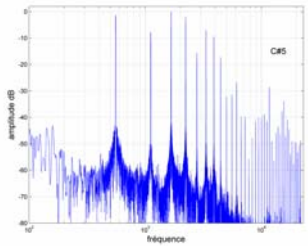


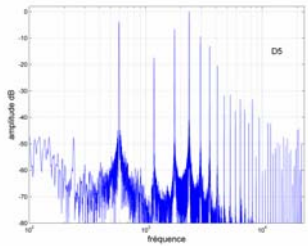


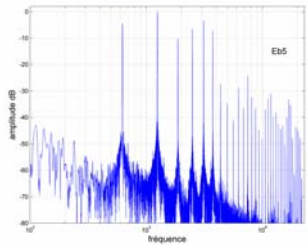


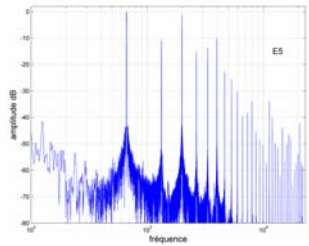


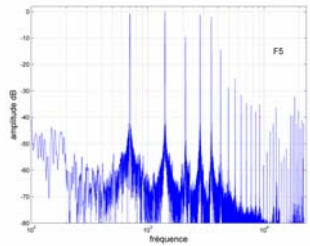


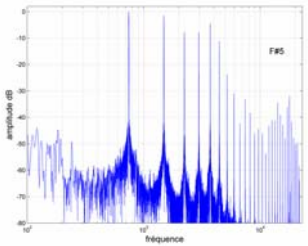


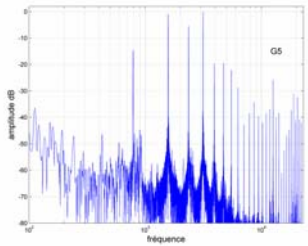


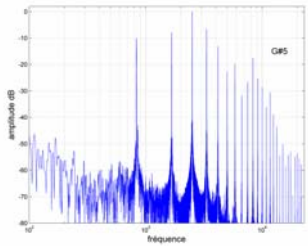


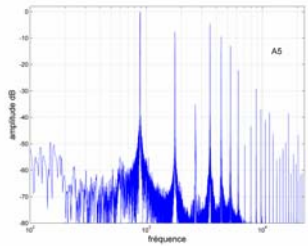


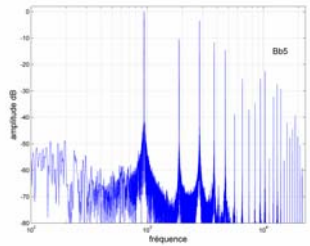


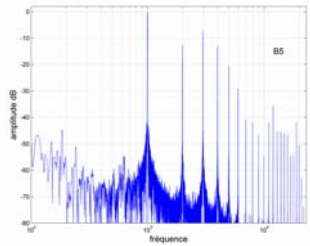

F#5
amplitude dB
fréquence

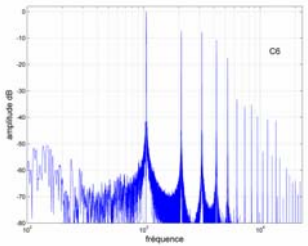

G5
amplitude dB
fréquence

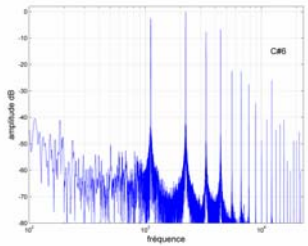

G#5
amplitude dB
fréquence

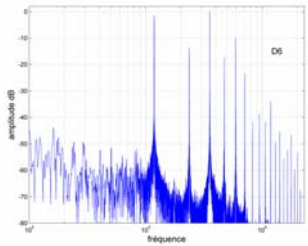

A5
amplitude dB
fréquence

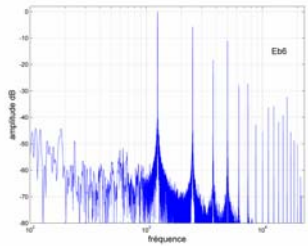

Bb5
amplitude dB
fréquence

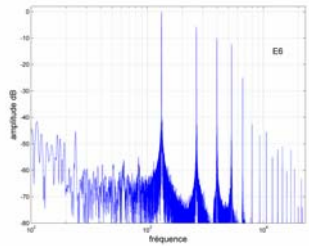

B5
amplitude dB
fréquence

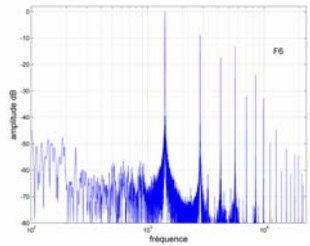

C6
amplitude dB
fréquence

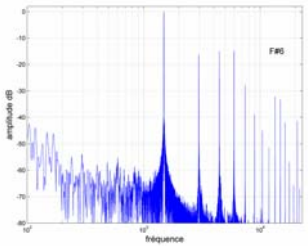

C#6
amplitude dB
fréquence

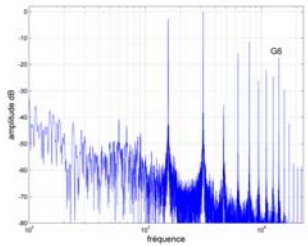

D6
amplitude dB
fréquence

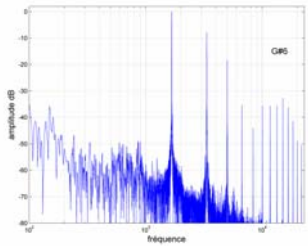

Eb6
amplitude dB
fréquence

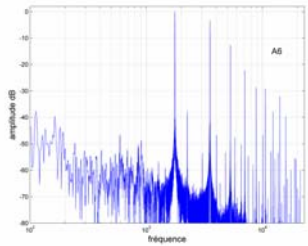

E6
amplitude dB
fréquence

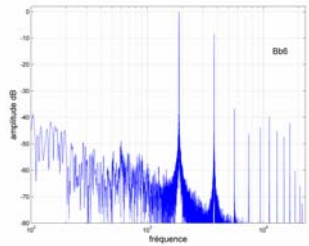

F6
amplitude dB
fréquence

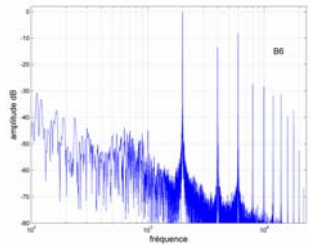

F#6
amplitude dB
fréquence

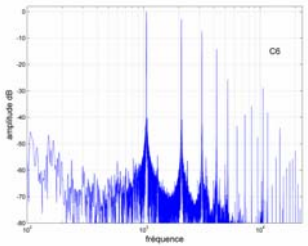

G6
amplitude dB
fréquence

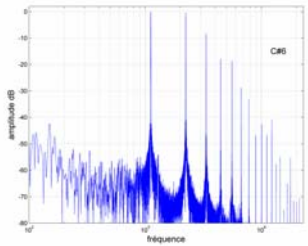

G#6
amplitude dB
fréquence

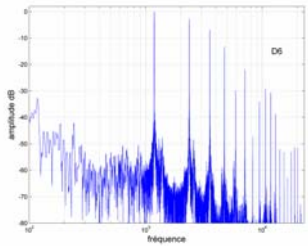

A6
amplitude dB
fréquence

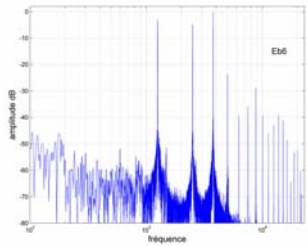

Bb6
amplitude dB
fréquence

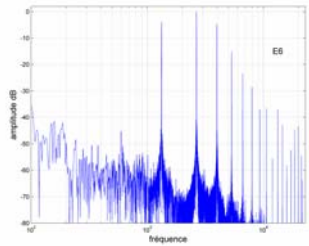

B6
amplitude dB
fréquence

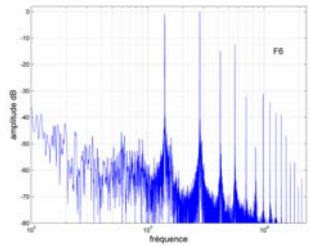

C6
amplitude dB
fréquence


C#6
amplitude dB
fréquence

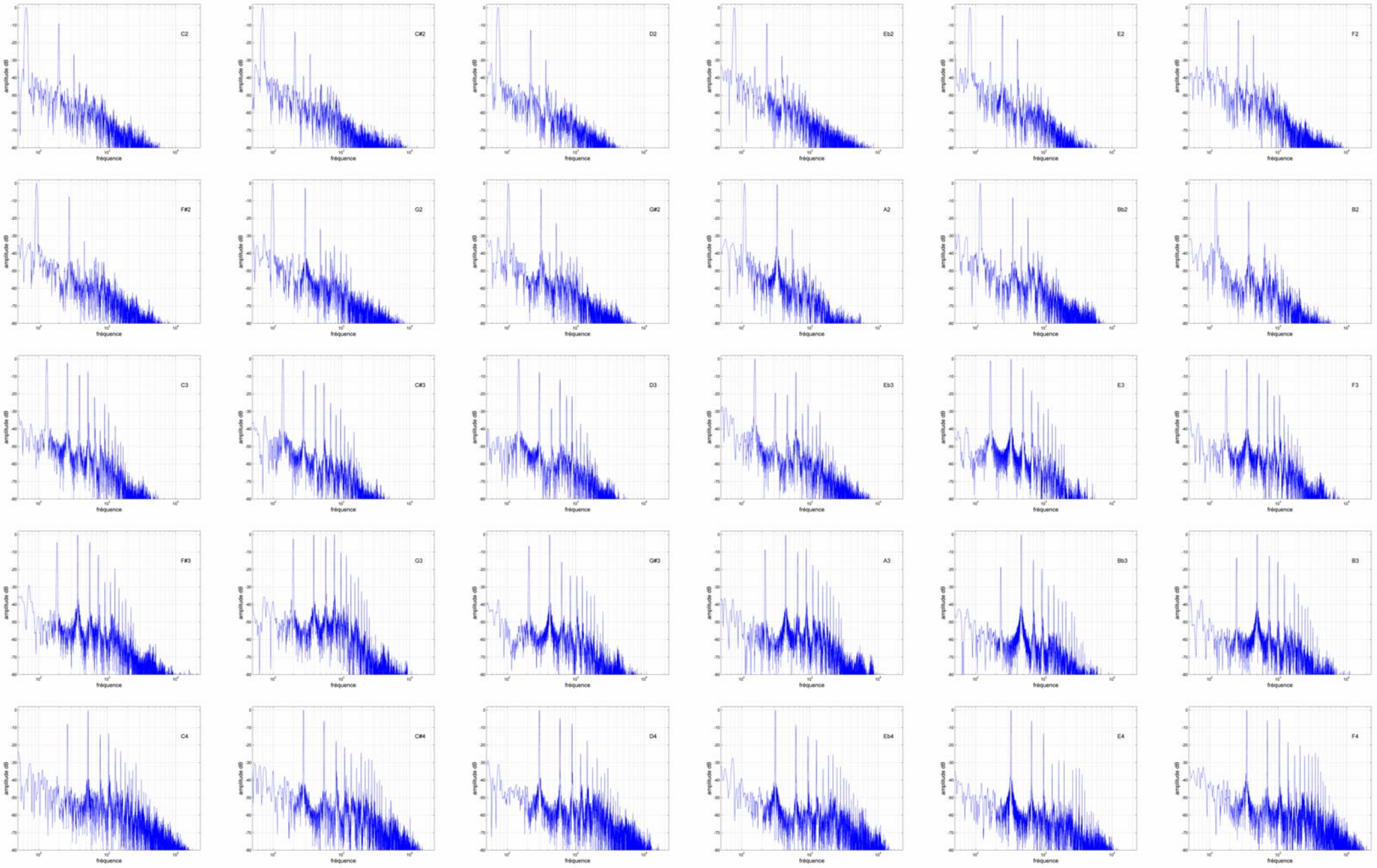

D6
amplitude dB
fréquence

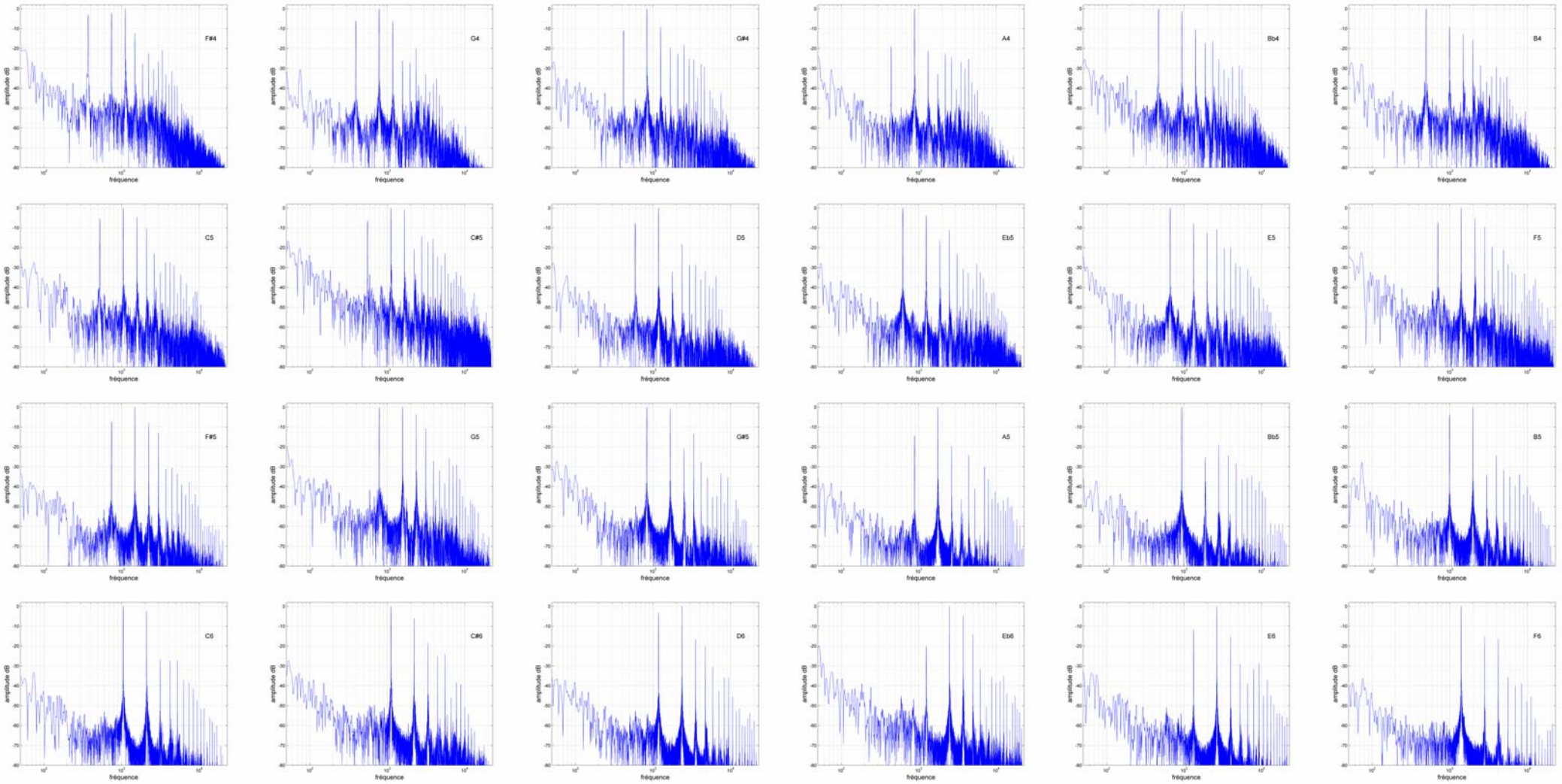

Eb6
amplitude dB
fréquence


E6
amplitude dB
fréquence

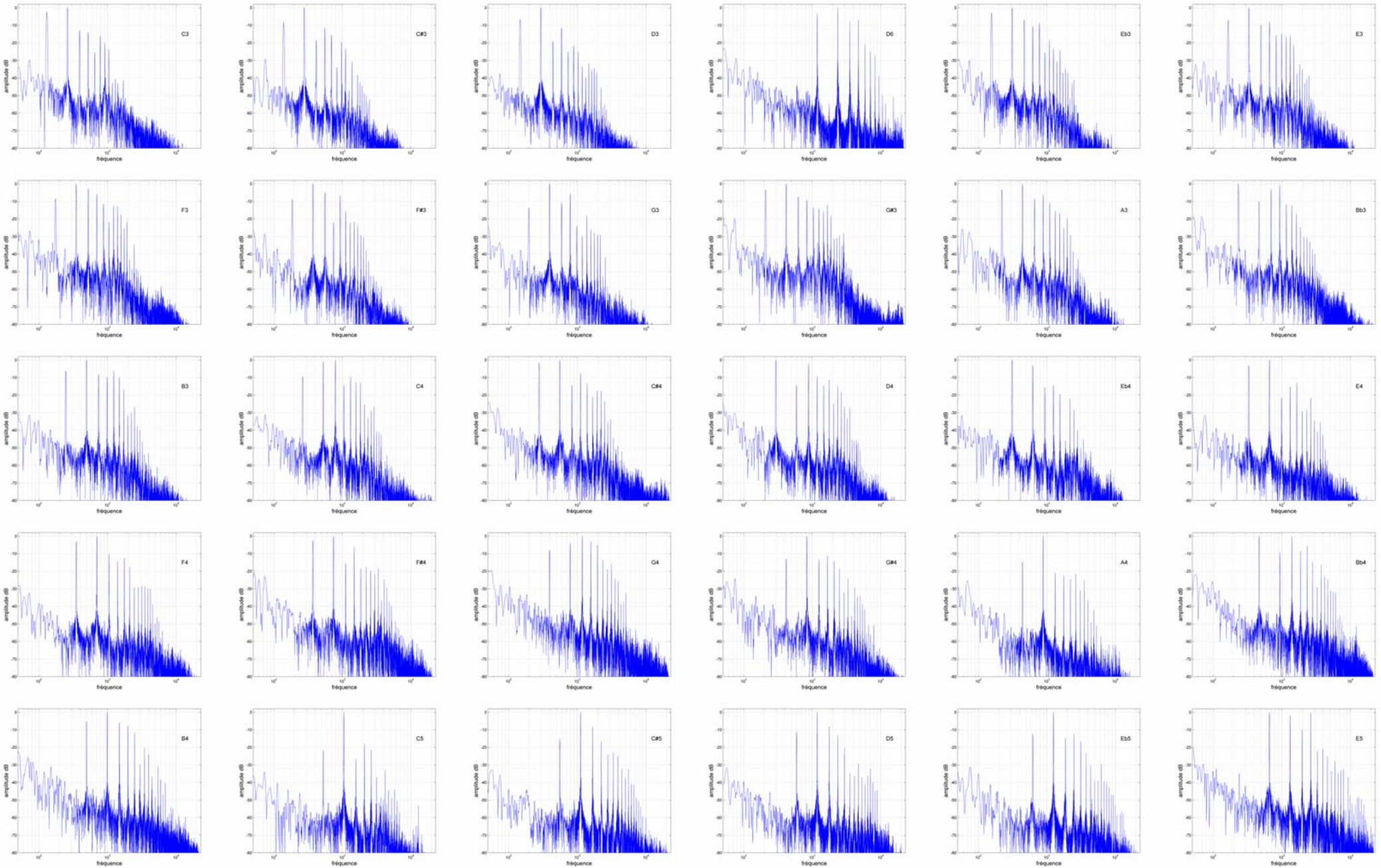

F6
amplitude dB
fréquence

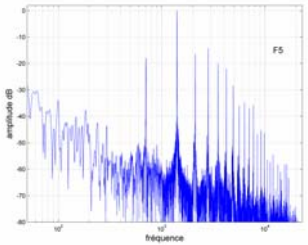
Spectres d’amplitude Flûte

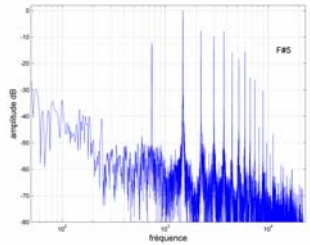


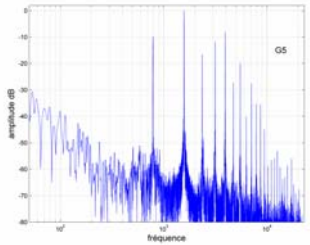

F#4
G4
G#4
A4
Bb4
B4
C5
C#5
D5
Eb5
E5
F5
F#5
G5
G#5
A5
Bb5
B5
C6
C#6
D6
Eb6
E6
F6
amplitude dB
fréquence

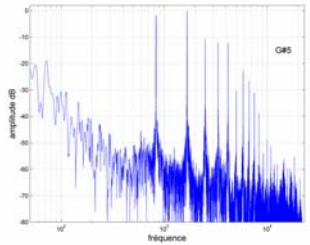
Spectres d’amplitude Kéraulophone

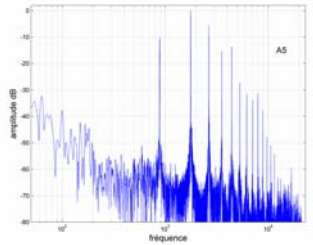


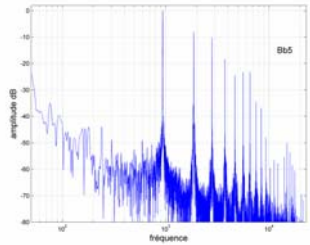

F5
amplitude dB
fréquence

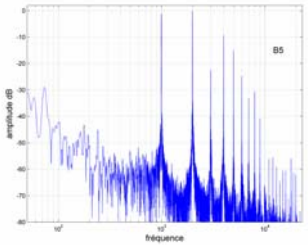

F#5
amplitude dB
fréquence

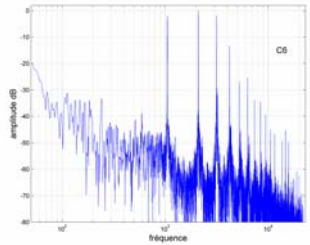

G5
amplitude dB
fréquence

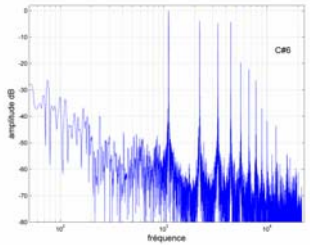

G#5
amplitude dB
fréquence

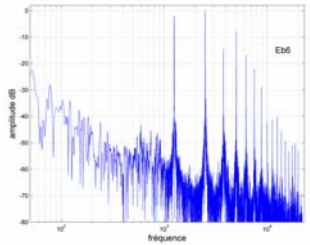

A5
amplitude dB
fréquence

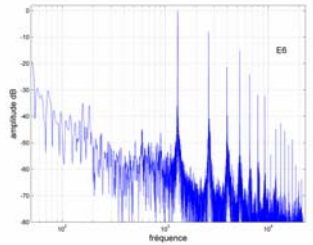

Bb5
amplitude dB
fréquence

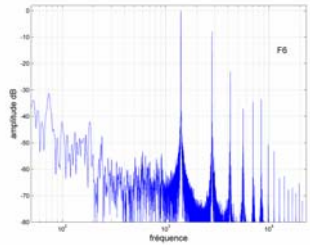

B5
amplitude dB
fréquence


C6
amplitude dB
fréquence

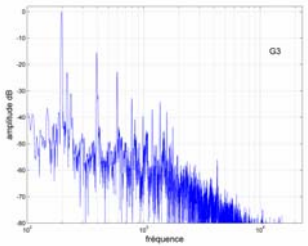

C#6
amplitude dB
fréquence

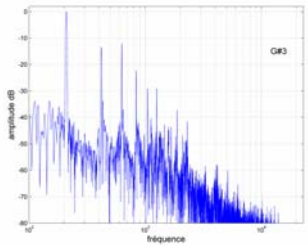

Eb6
amplitude dB
fréquence

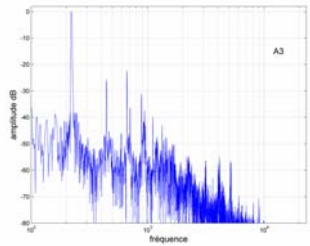

E6
amplitude dB
fréquence

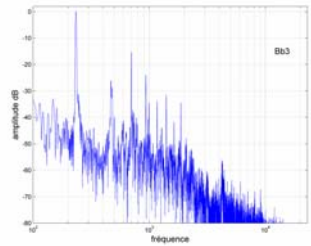

F6
amplitude dB
fréquence

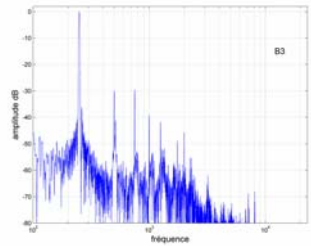
Spectres d’amplitude Nasard

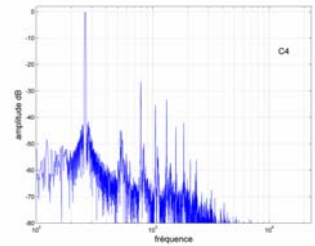


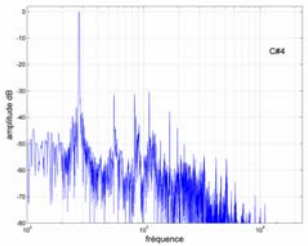


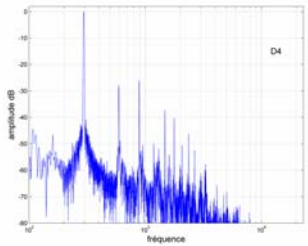


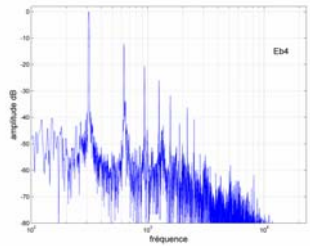


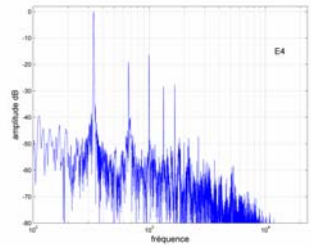


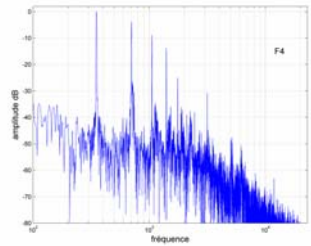


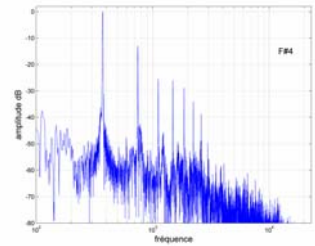


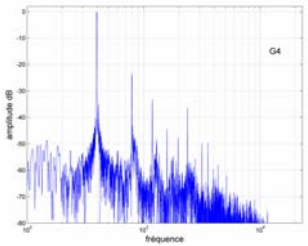


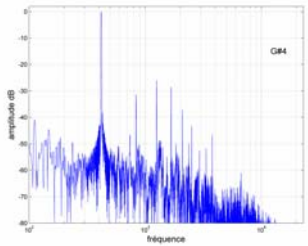


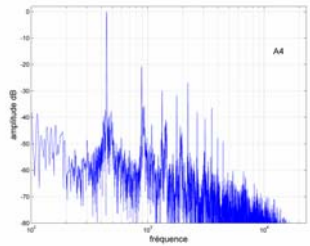


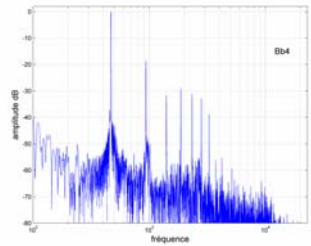


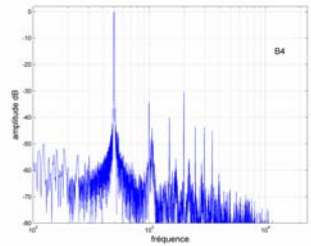


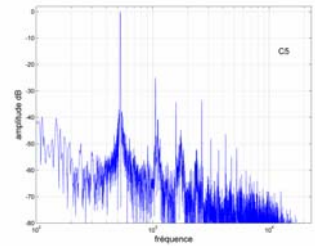


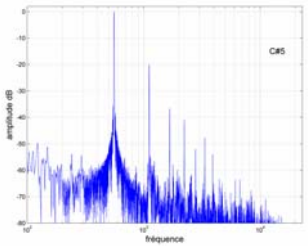


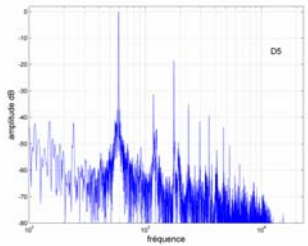


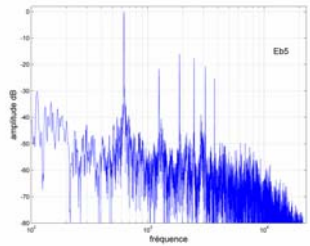


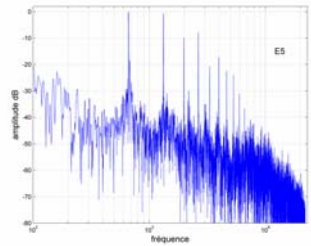


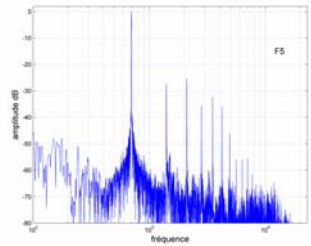


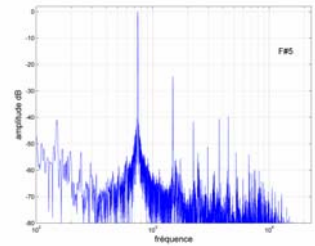


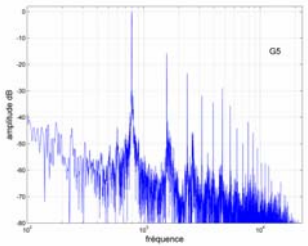


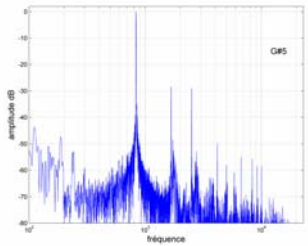


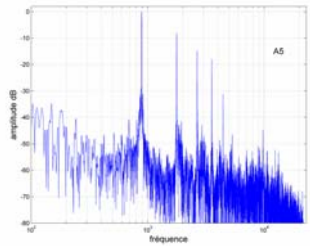


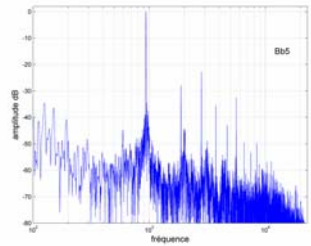


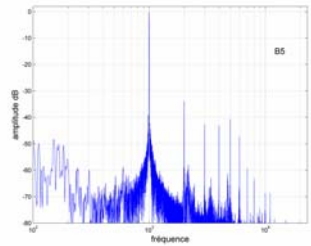


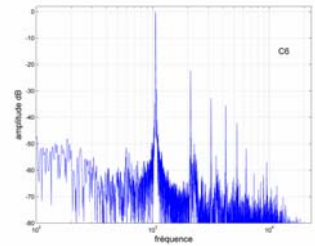


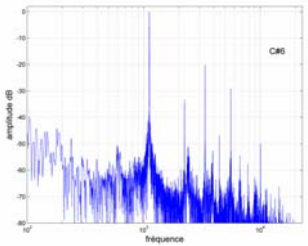


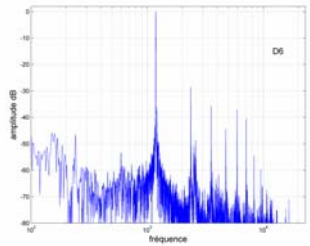


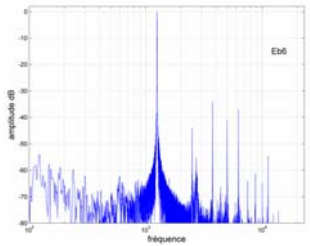


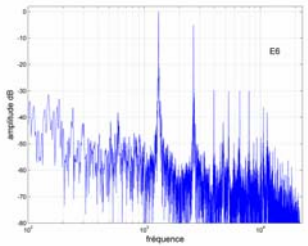


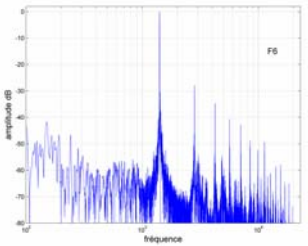


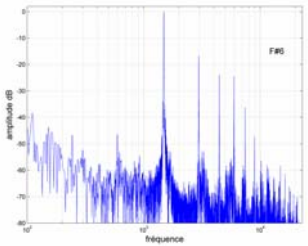

C#6
amplitude dB
fréquence

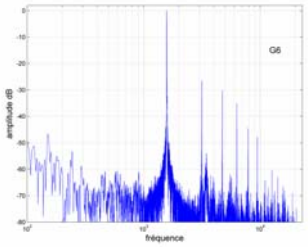

D6
amplitude dB
fréquence

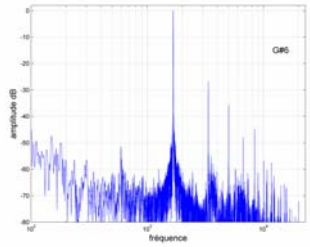

Eb6
amplitude dB
fréquence

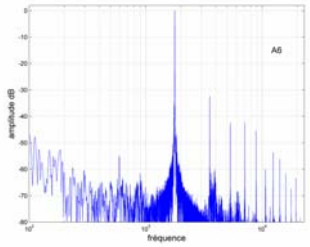

E6
amplitude dB
fréquence

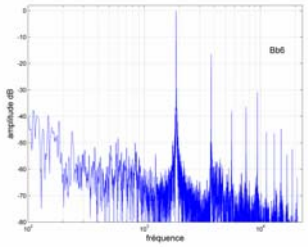

F6
amplitude dB
fréquence

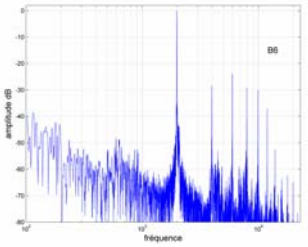

F#6
amplitude dB
fréquence

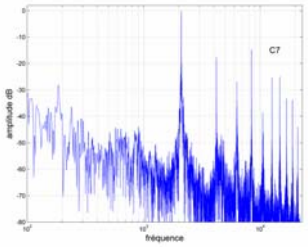

G6
amplitude dB
fréquence

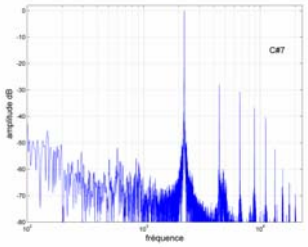

G#6
amplitude dB
fréquence

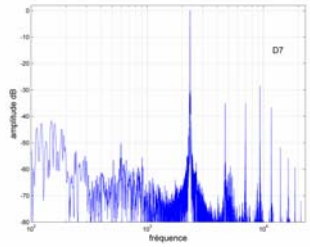

A6
amplitude dB
fréquence

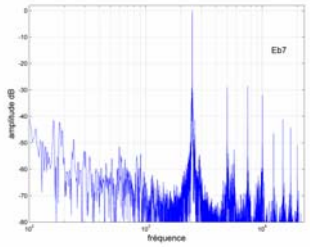

Bb6
amplitude dB
fréquence

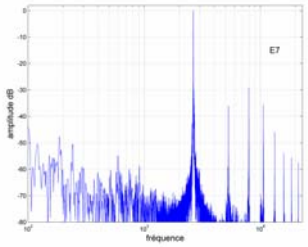

B6
amplitude dB
fréquence

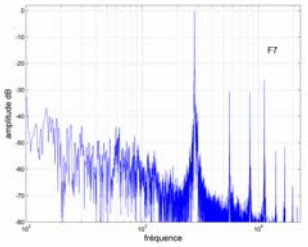

C7
amplitude dB
fréquence

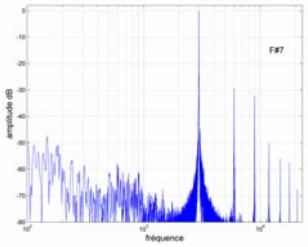

C#7
amplitude dB
fréquence

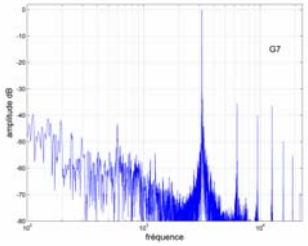

D7
amplitude dB
fréquence

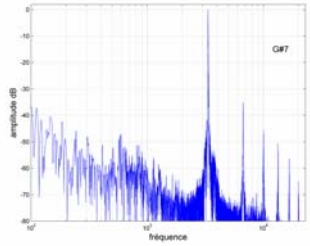

Eb7
amplitude dB
fréquence

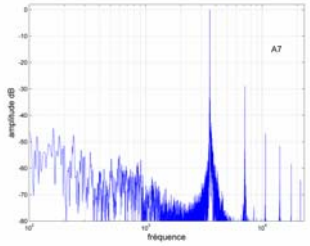

E7
amplitude dB
fréquence

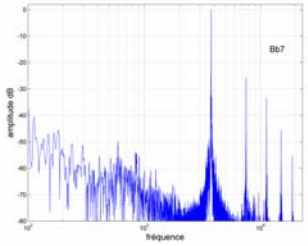

F7
amplitude dB
fréquence

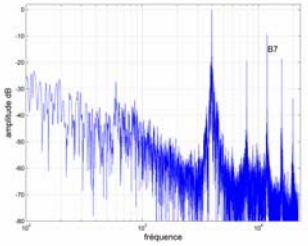

F#7
amplitude dB
fréquence

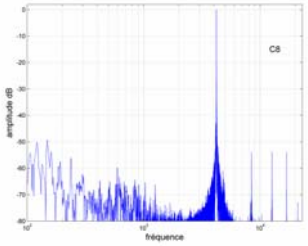

G7
amplitude dB
fréquence


G#7
amplitude dB
fréquence

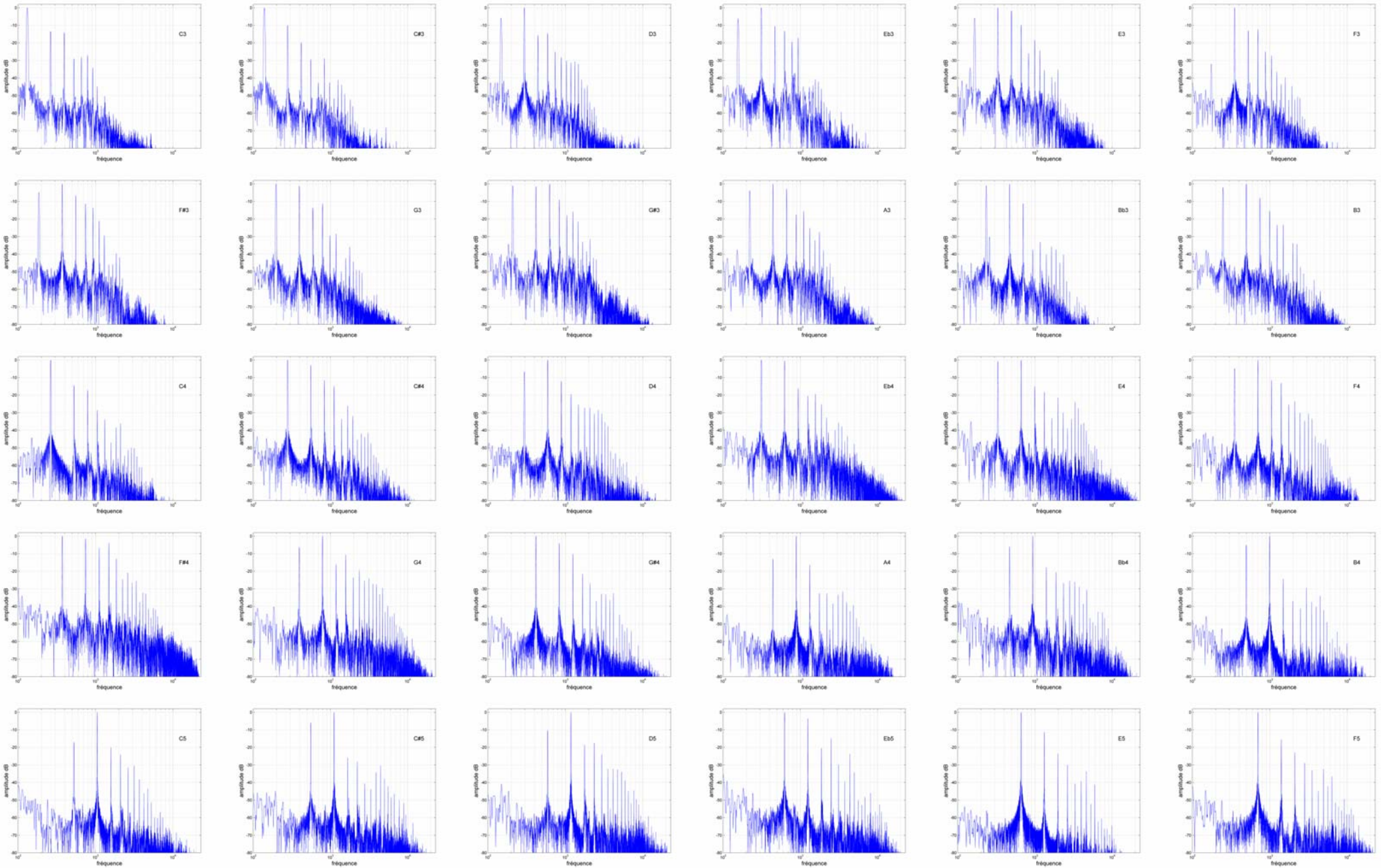

A7
amplitude dB
fréquence

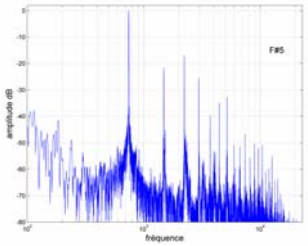

Bb7
amplitude dB
fréquence

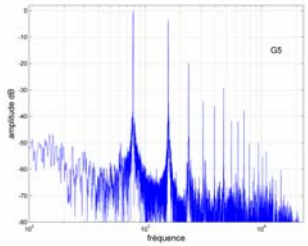

B7
amplitude dB
fréquence

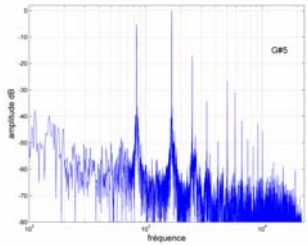

C8
amplitude dB
fréquence

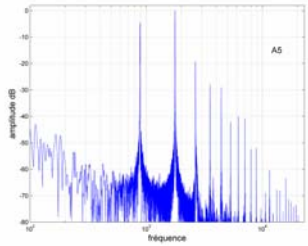
Spectres d’amplitude Prestant

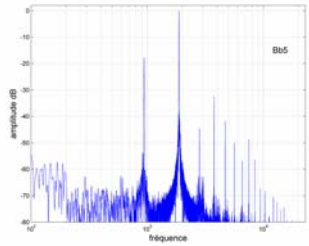


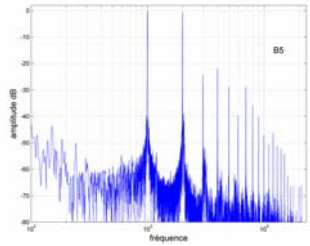

F#5
amplitude dB
fréquence

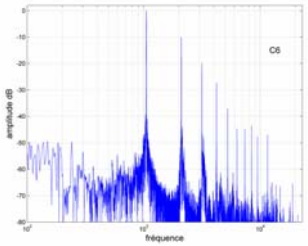

G5
amplitude dB
fréquence

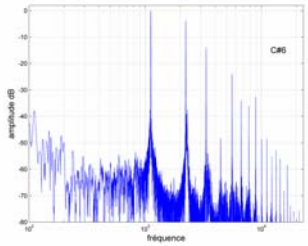

G#5
amplitude dB
fréquence

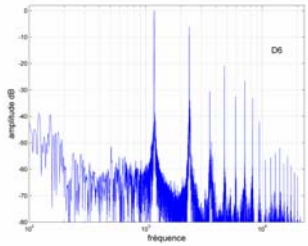

A5
amplitude dB
fréquence

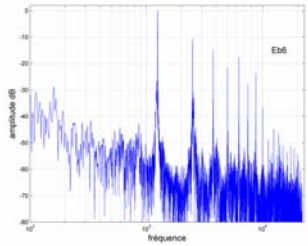

Bb5
amplitude dB
fréquence

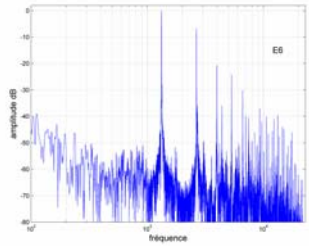

B5
amplitude dB
fréquence

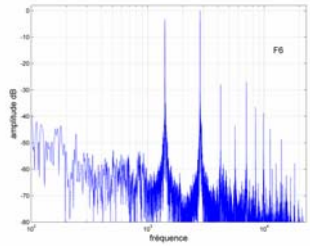

C6
amplitude dB
fréquence

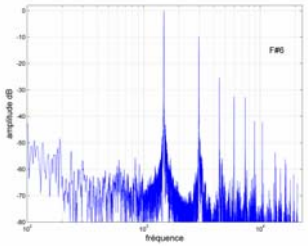

C#6
amplitude dB
fréquence

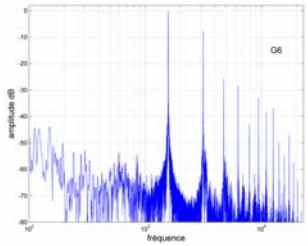

D6
amplitude dB
fréquence

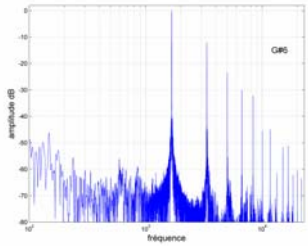

Eb6
amplitude dB
fréquence

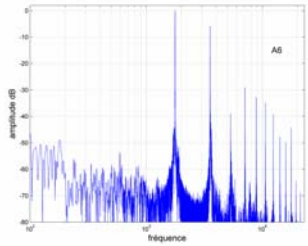

E6
amplitude dB
fréquence

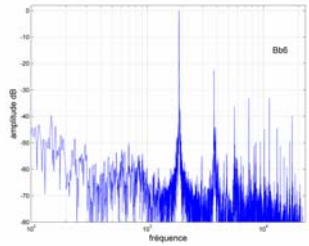

F6
amplitude dB
fréquence

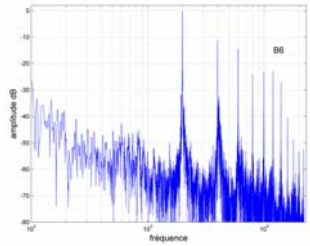

F#6
amplitude dB
fréquence

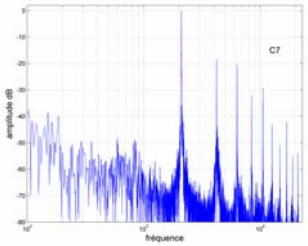

G6
amplitude dB
fréquence

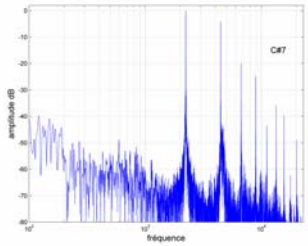

G#6
amplitude dB
fréquence

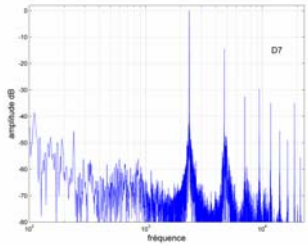

A6
amplitude dB
fréquence

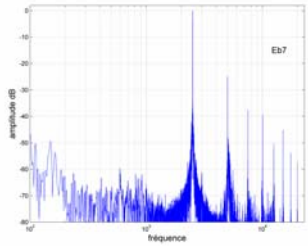

Bb6
amplitude dB
fréquence

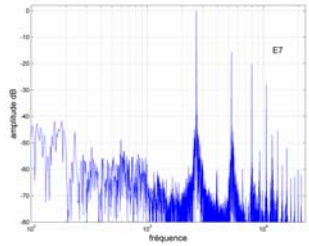

B6
amplitude dB
fréquence

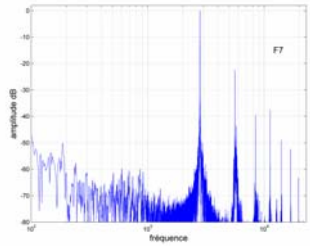

C7
amplitude dB
fréquence


C#7
amplitude dB
fréquence

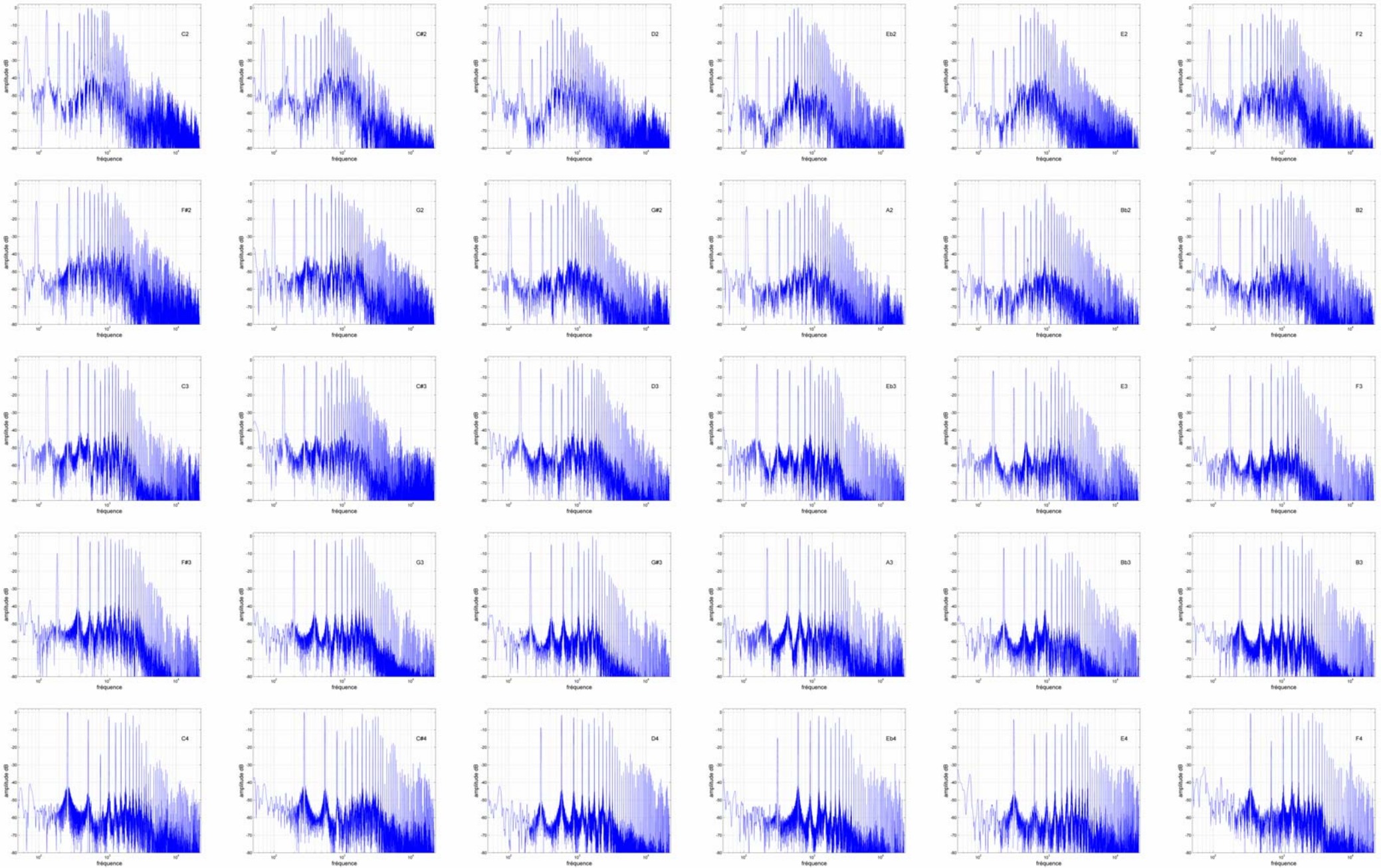

D7
amplitude dB
fréquence

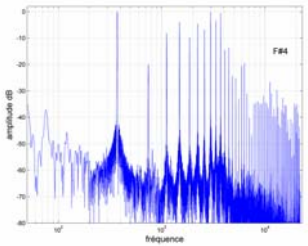

Eb7
amplitude dB
fréquence

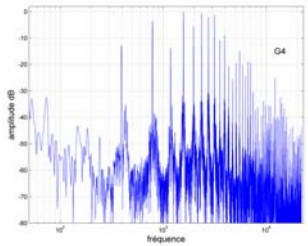

E7
amplitude dB
fréquence

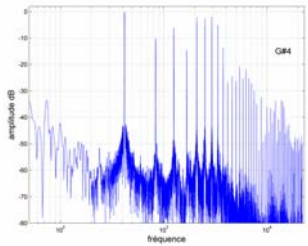

F7
amplitude dB
fréquence

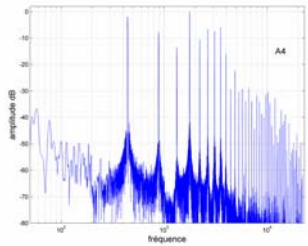
Spectres d’amplitude trompette

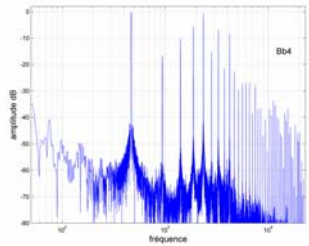


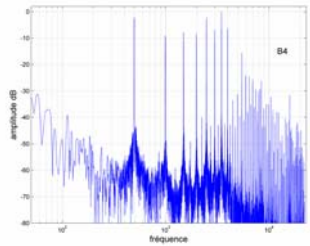

F#4
amplitude dB
fréquence

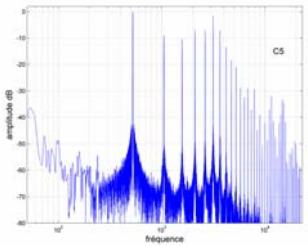

G4
amplitude dB
fréquence

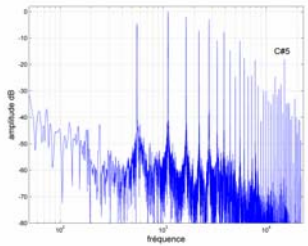

G#4
amplitude dB
fréquence

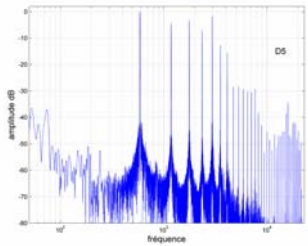

A4
amplitude dB
fréquence

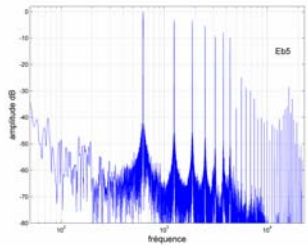

Bb4
amplitude dB
fréquence

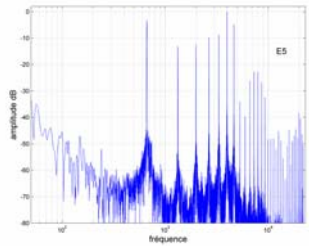

B4
amplitude dB
fréquence

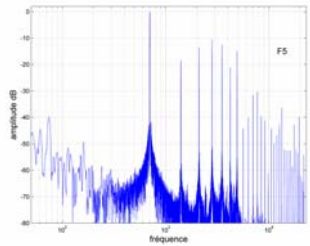

C5
amplitude dB
fréquence

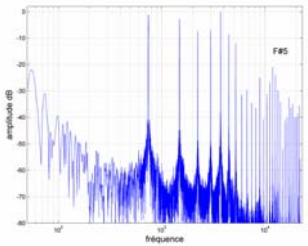

C#5
amplitude dB
fréquence

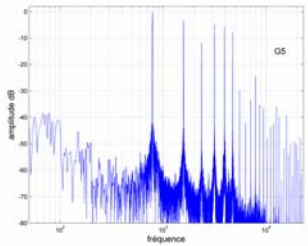

D5
amplitude dB
fréquence

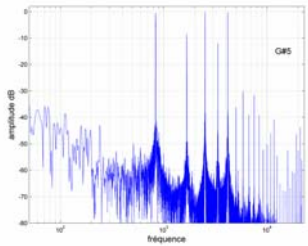

Eb5
amplitude dB
fréquence

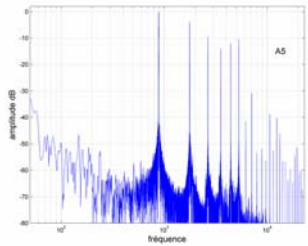

E5
amplitude dB
fréquence

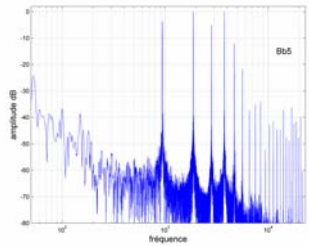

F5
amplitude dB
fréquence

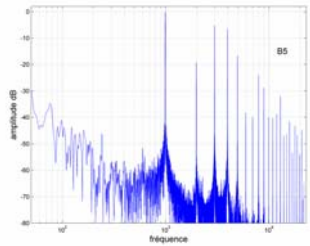

F#5
amplitude dB
fréquence

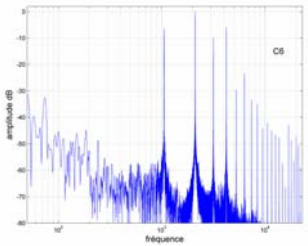

G5
amplitude dB
fréquence

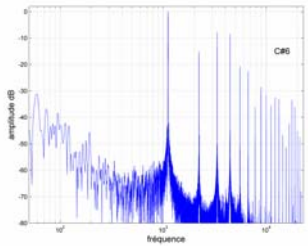

G#5
amplitude dB
fréquence

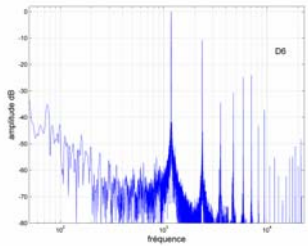

A5
amplitude dB
fréquence

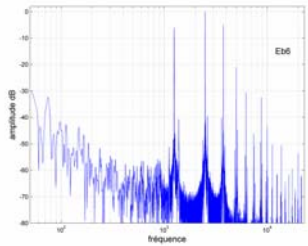

Bb5
amplitude dB
fréquence

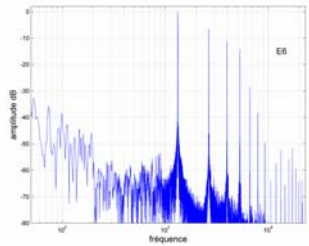

B5
amplitude dB
fréquence

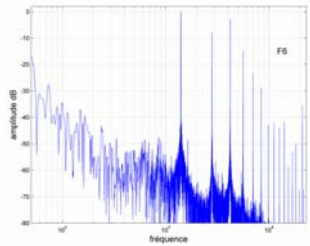

C6
amplitude dB
fréquence


C#6
amplitude dB
fréquence

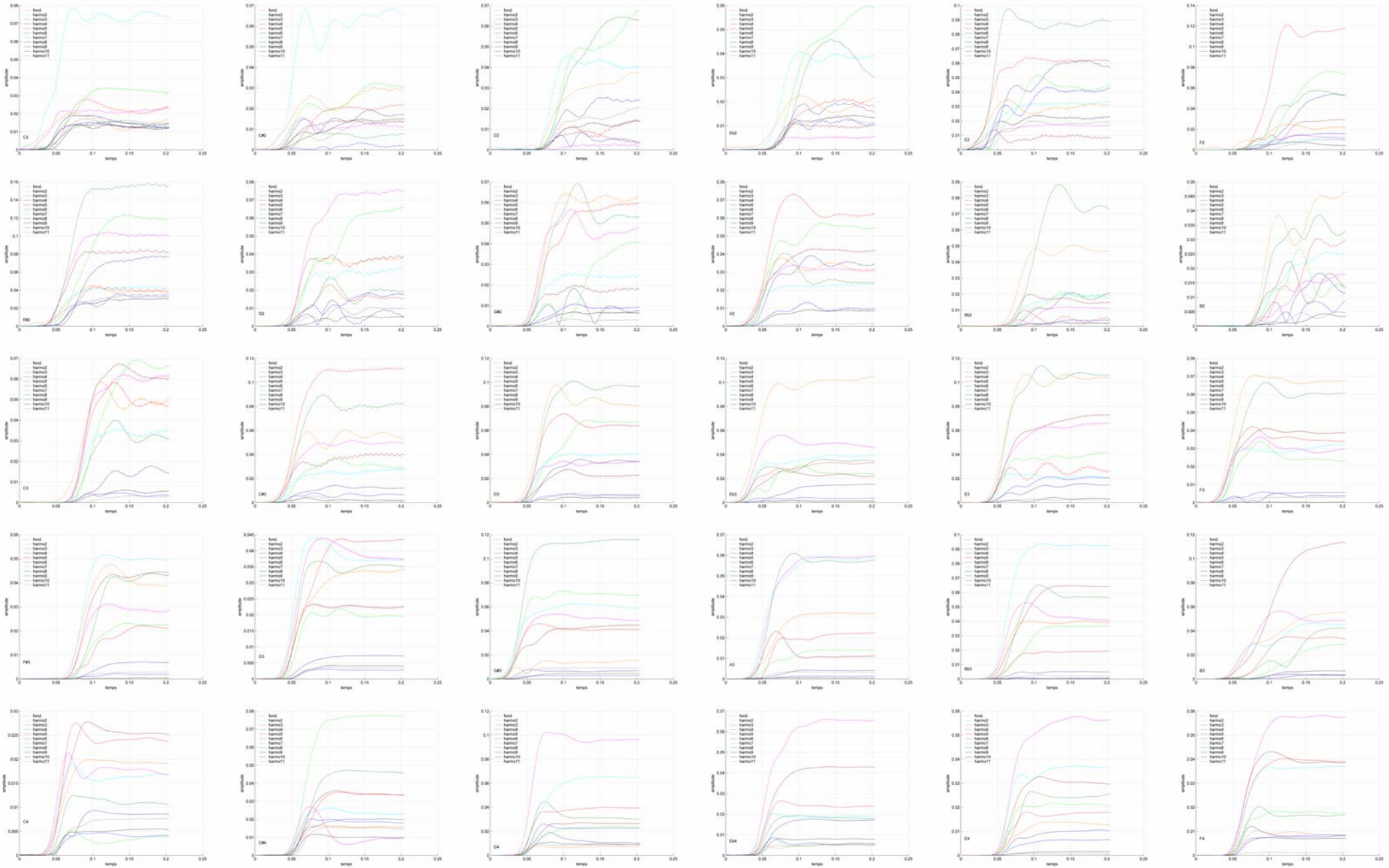

D6
amplitude dB
fréquence

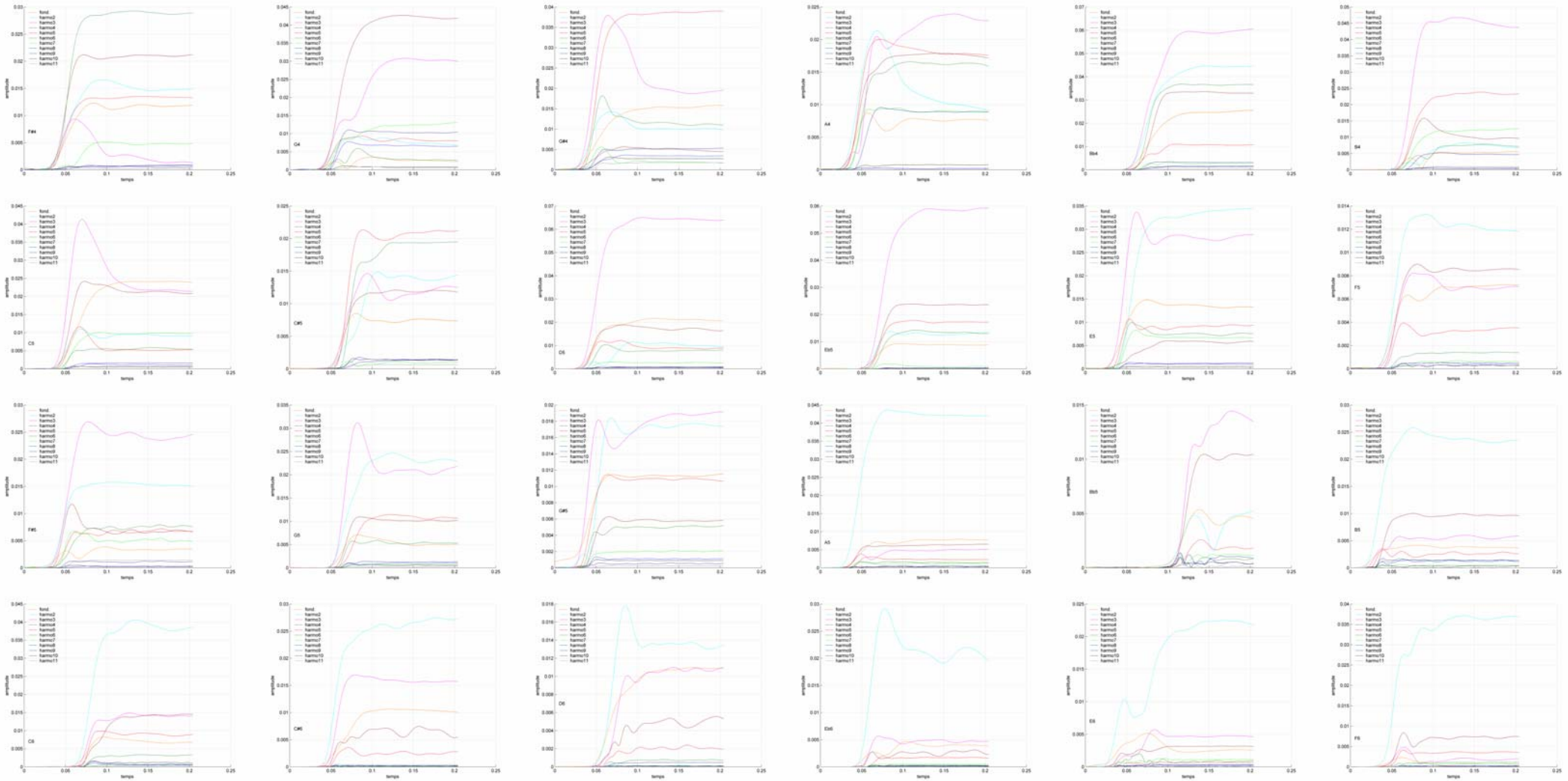

Eb6
amplitude dB
fréquence


E6
amplitude dB
fréquence

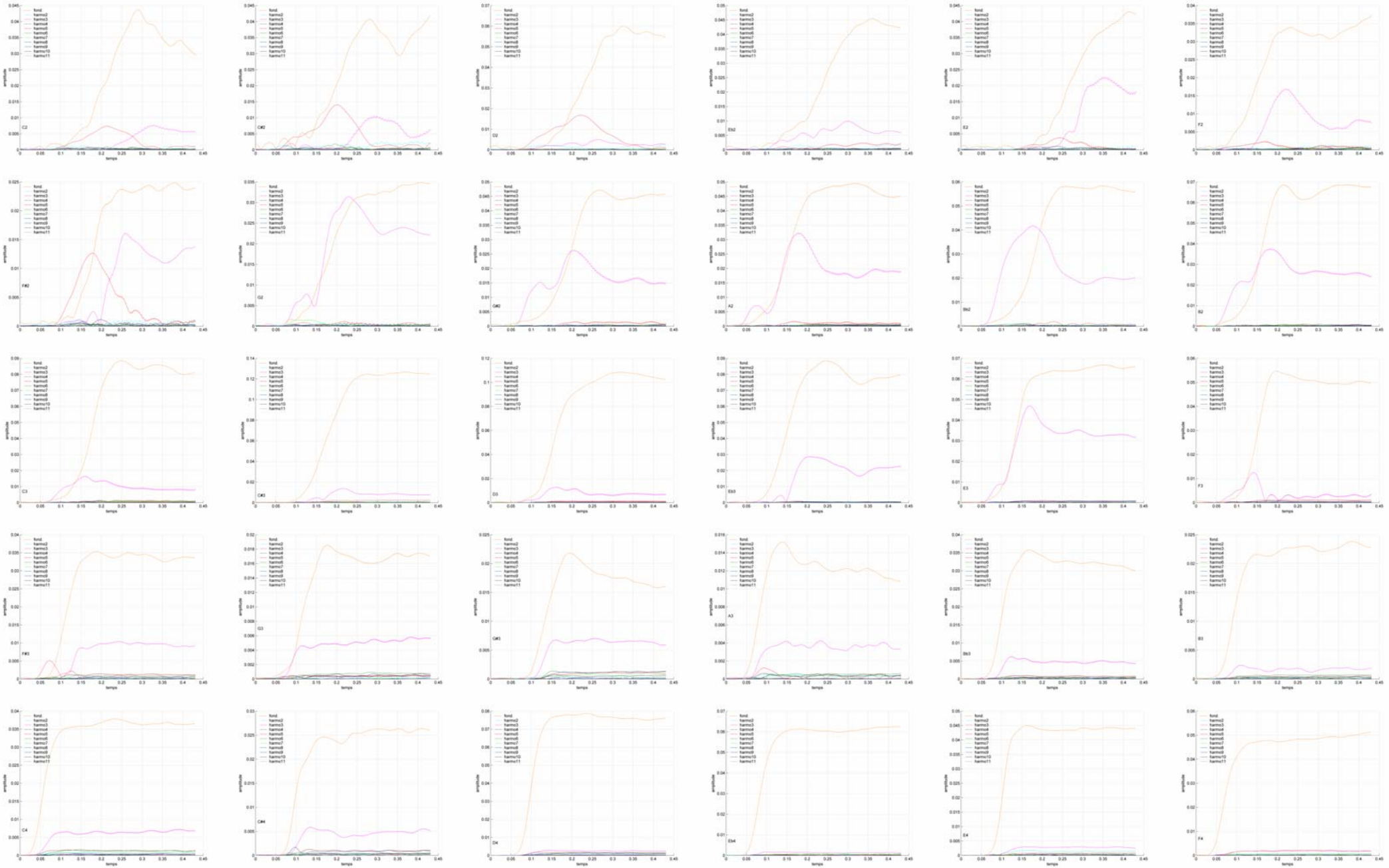

F6
amplitude dB
fréquence

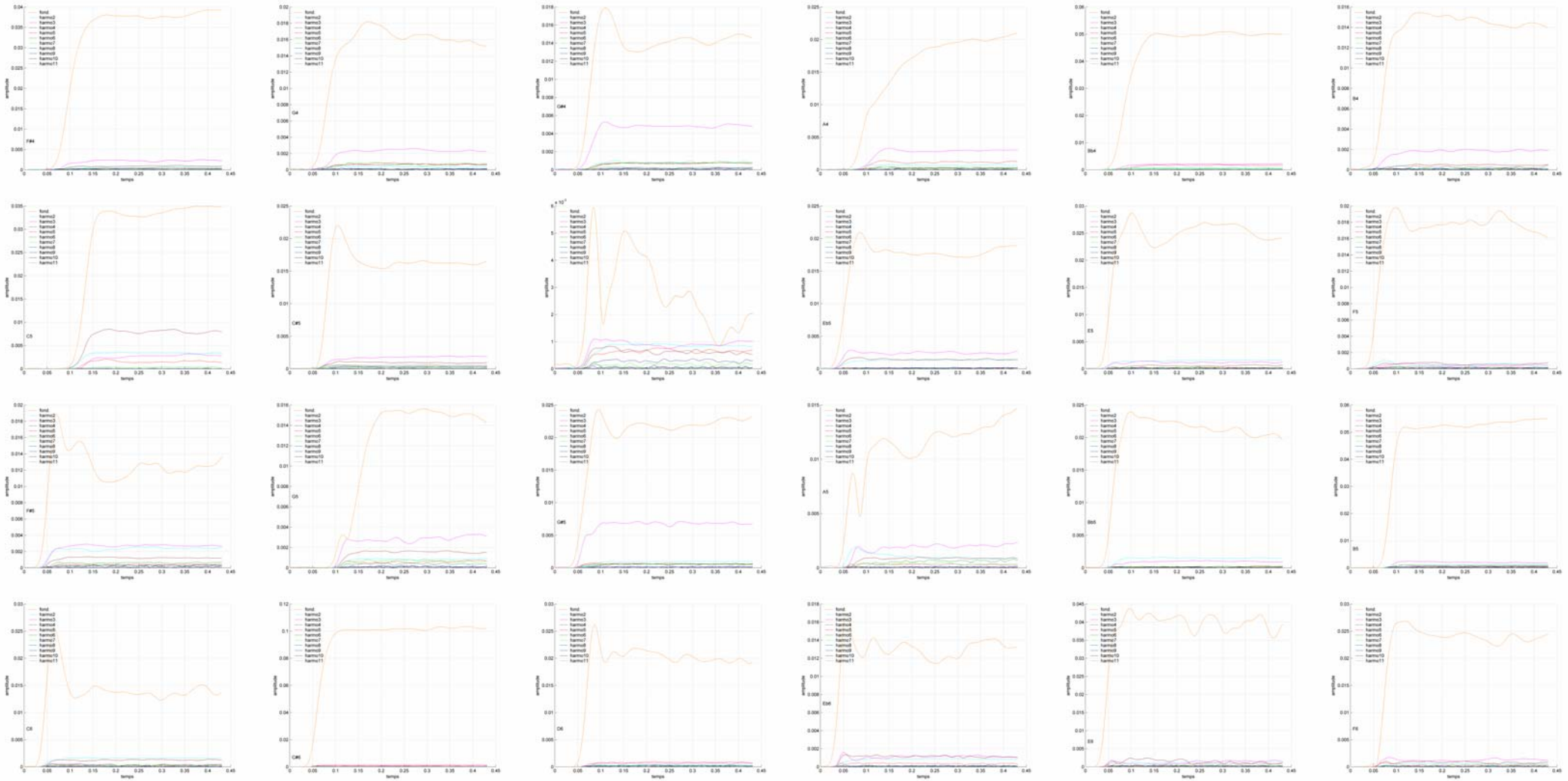
Transitoires d’attaque Basson-Hautbois



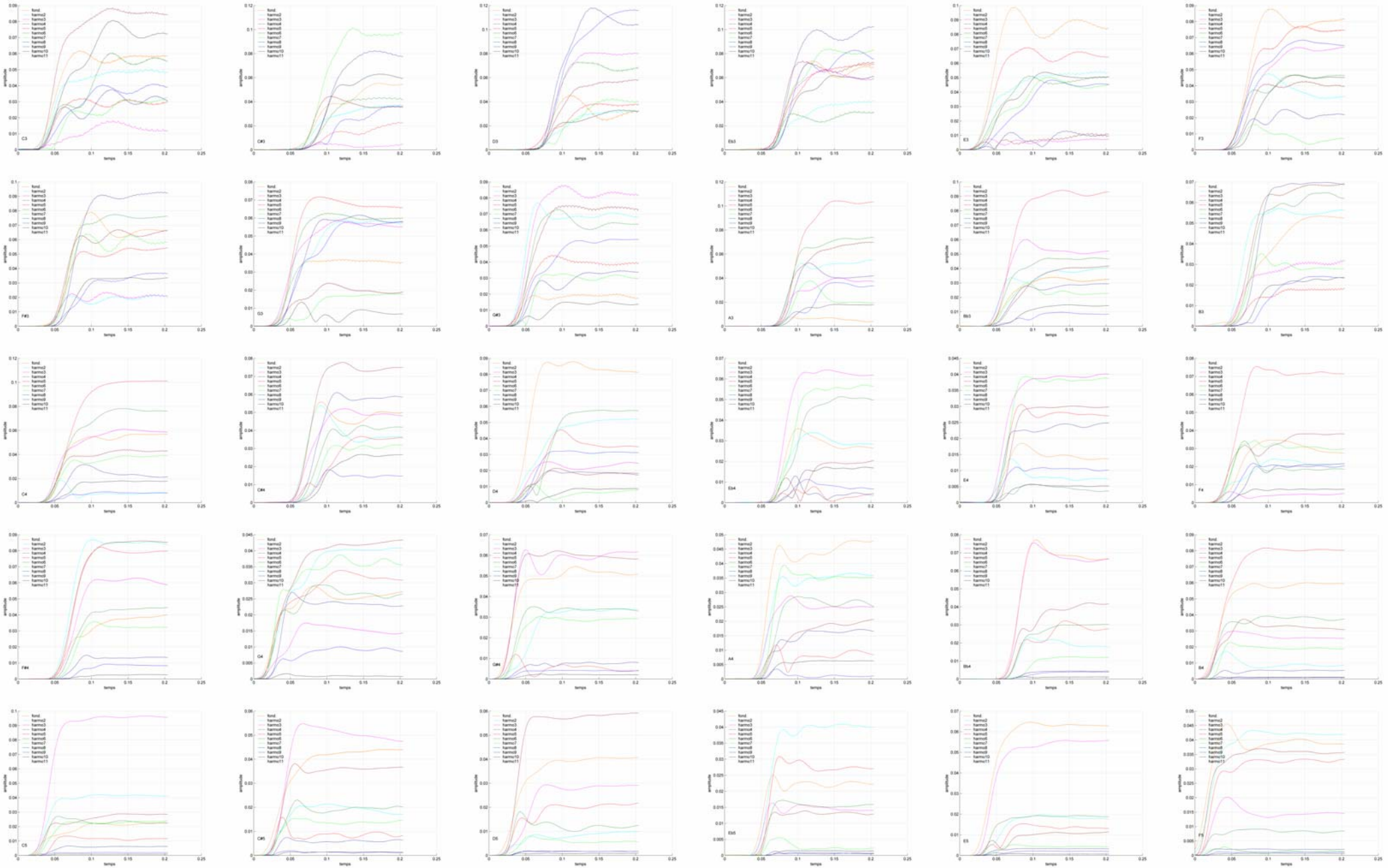

fond.
harmo2
harmo3
harmo4
harmo5
harmo6
harmo7
harmo8
harmo9
harmo10
harmo11
amplitude
temps
F#4
G4
G#4
A4
Bb4
B4
C5
C#5
D5
Eb5
E5
F5
F#5
G5
G#5
A5
Bb5
B5
C6
C#6
D6
Eb6
E6
F6

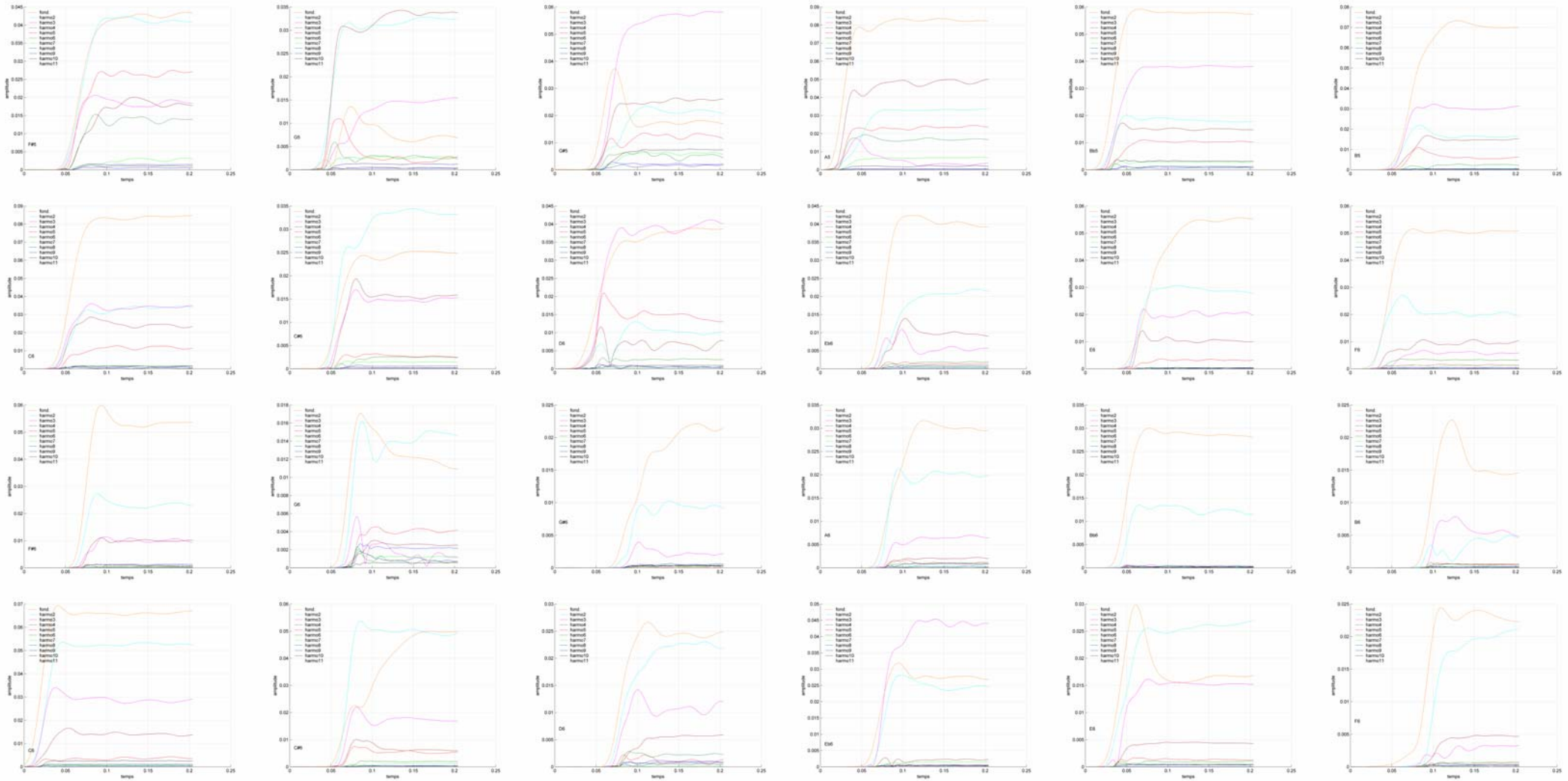
Transitoires d’attaque Bourdon



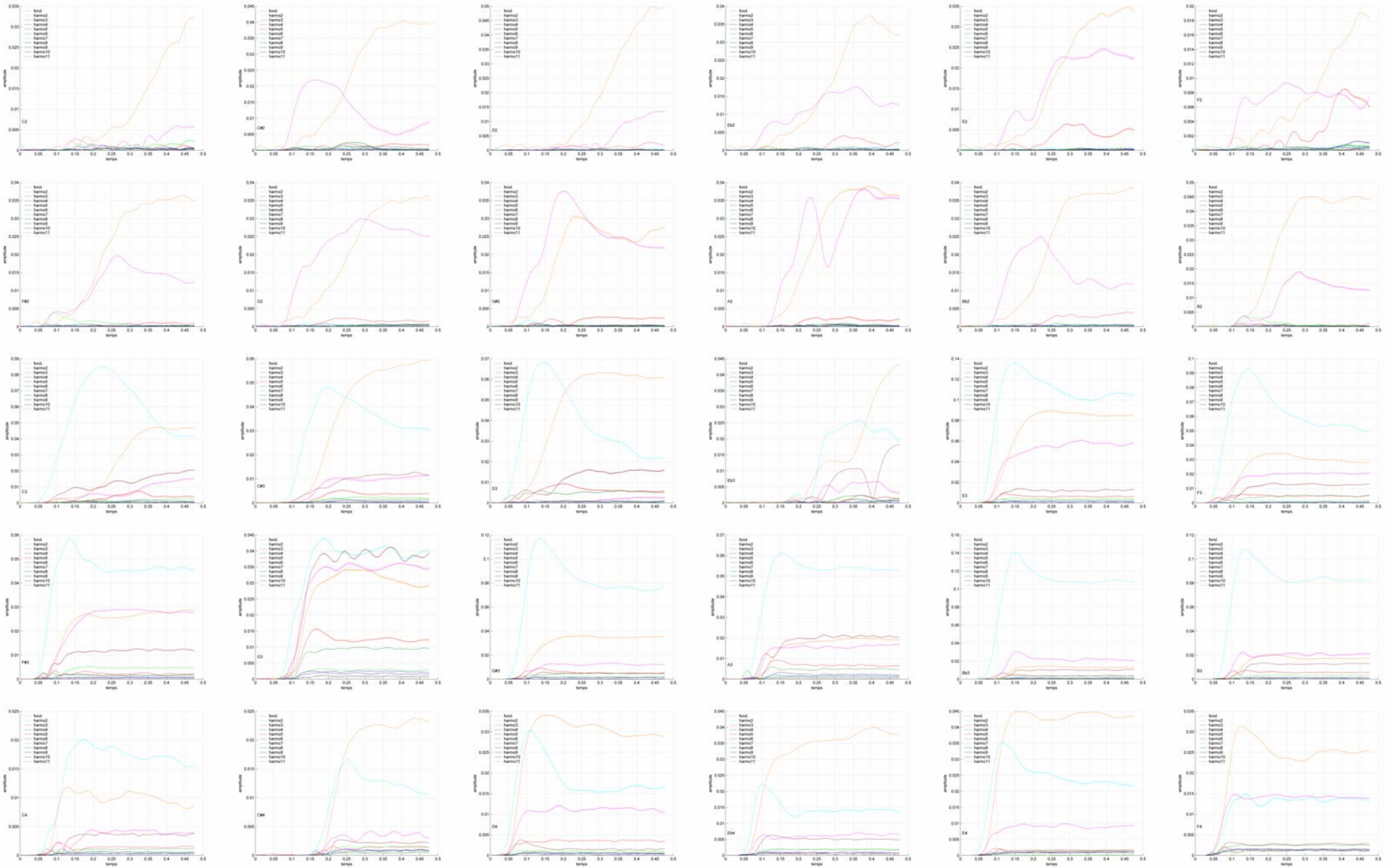

fond.
harmo2
harmo3
harmo4
harmo5
harmo6
harmo7
harmo8
harmo9
harmo10
harmo11
amplitude
temps
F#4
G4
G#4
A4
Bb4
B4
C5
C#5
Eb5
E5
F5
F#5
G5
G#5
A5
Bb5
B5
C6
C#6
Eb6
E6
F6

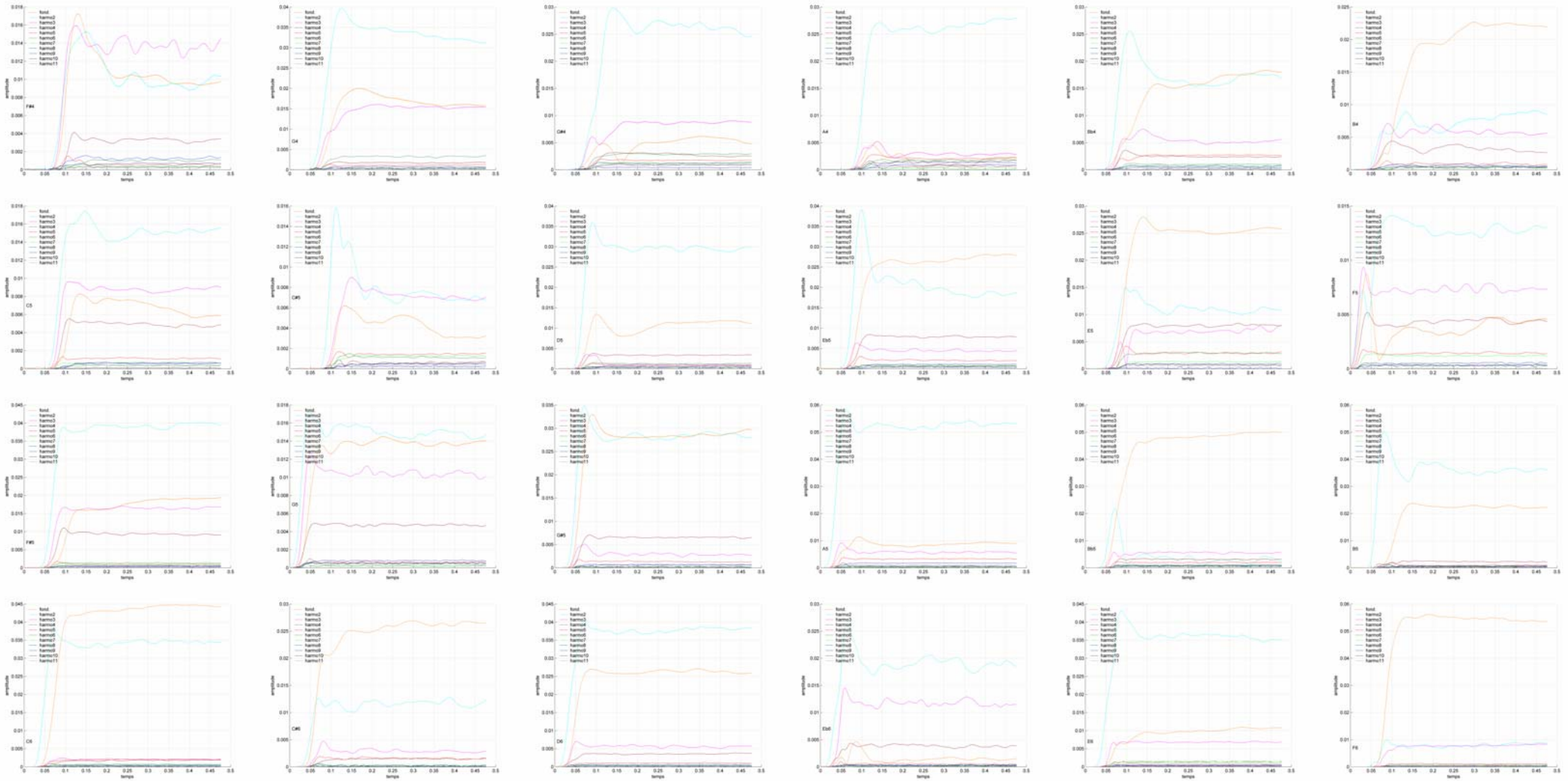
Transitoires d’attaque Clairon



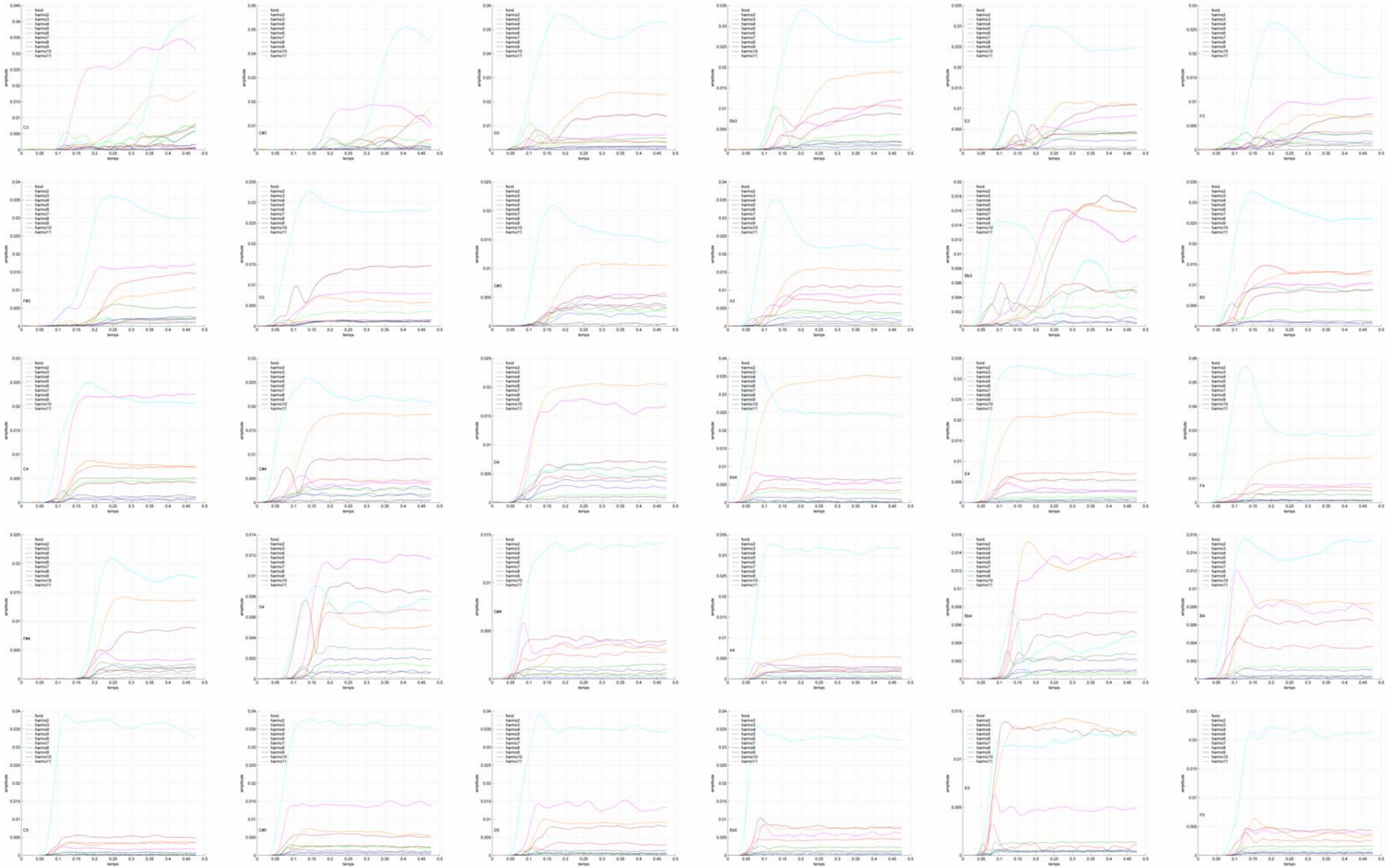

fond.
harmo2
harmo3
harmo4
harmo5
harmo6
harmo7
harmo8
harmo9
harmo10
harmo11
amplitude
temps

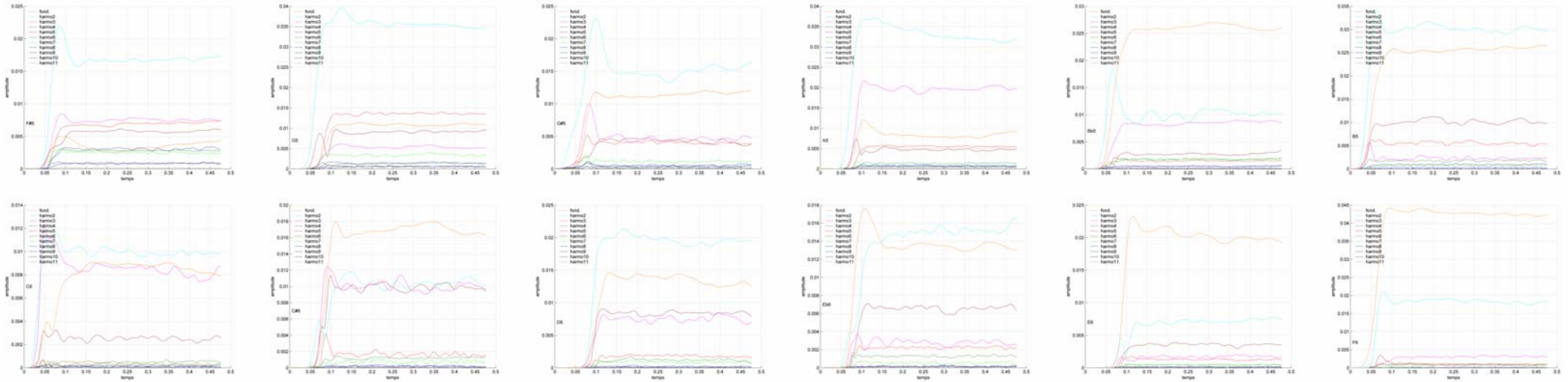
Transitoires d’attaque Flûte



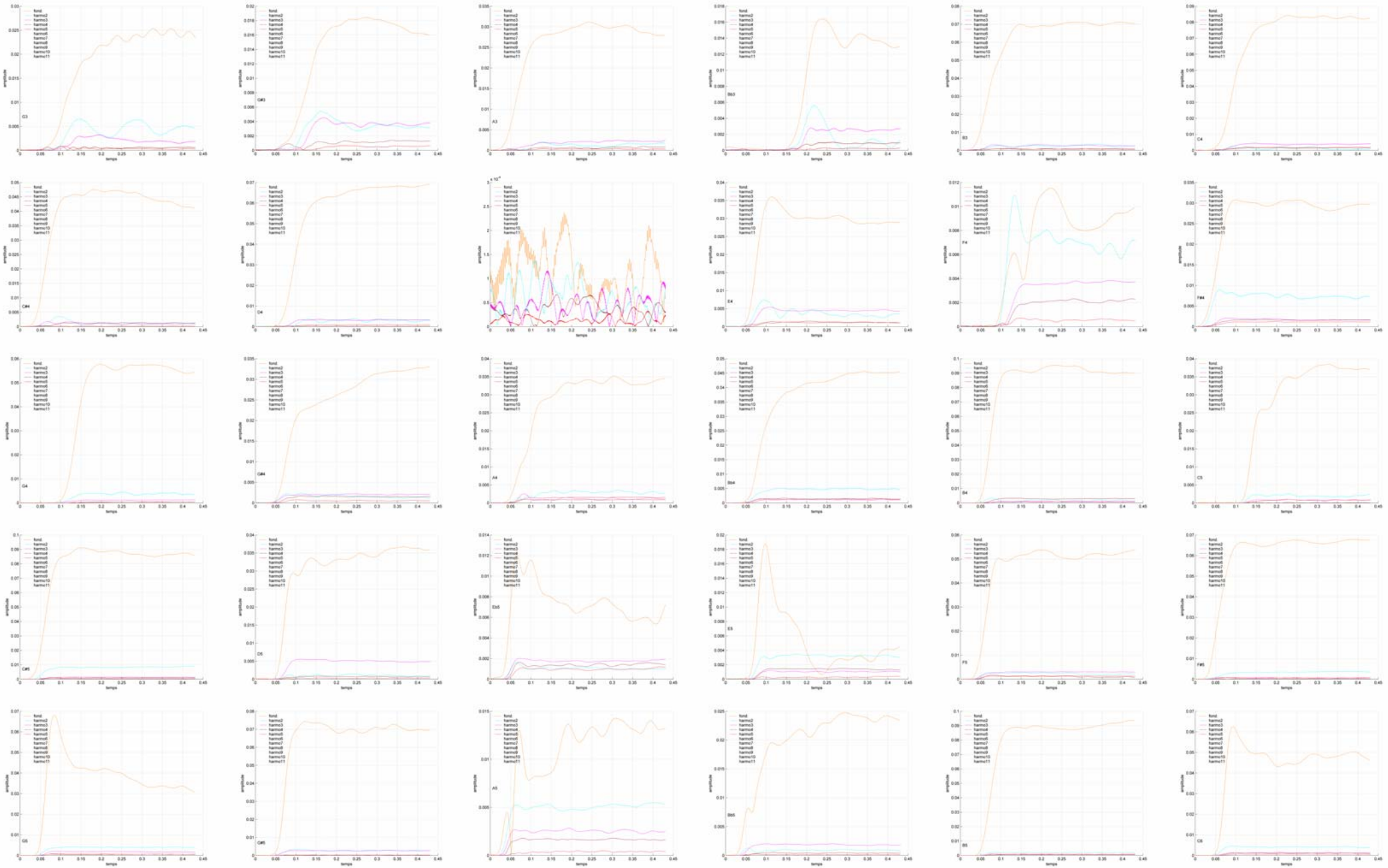


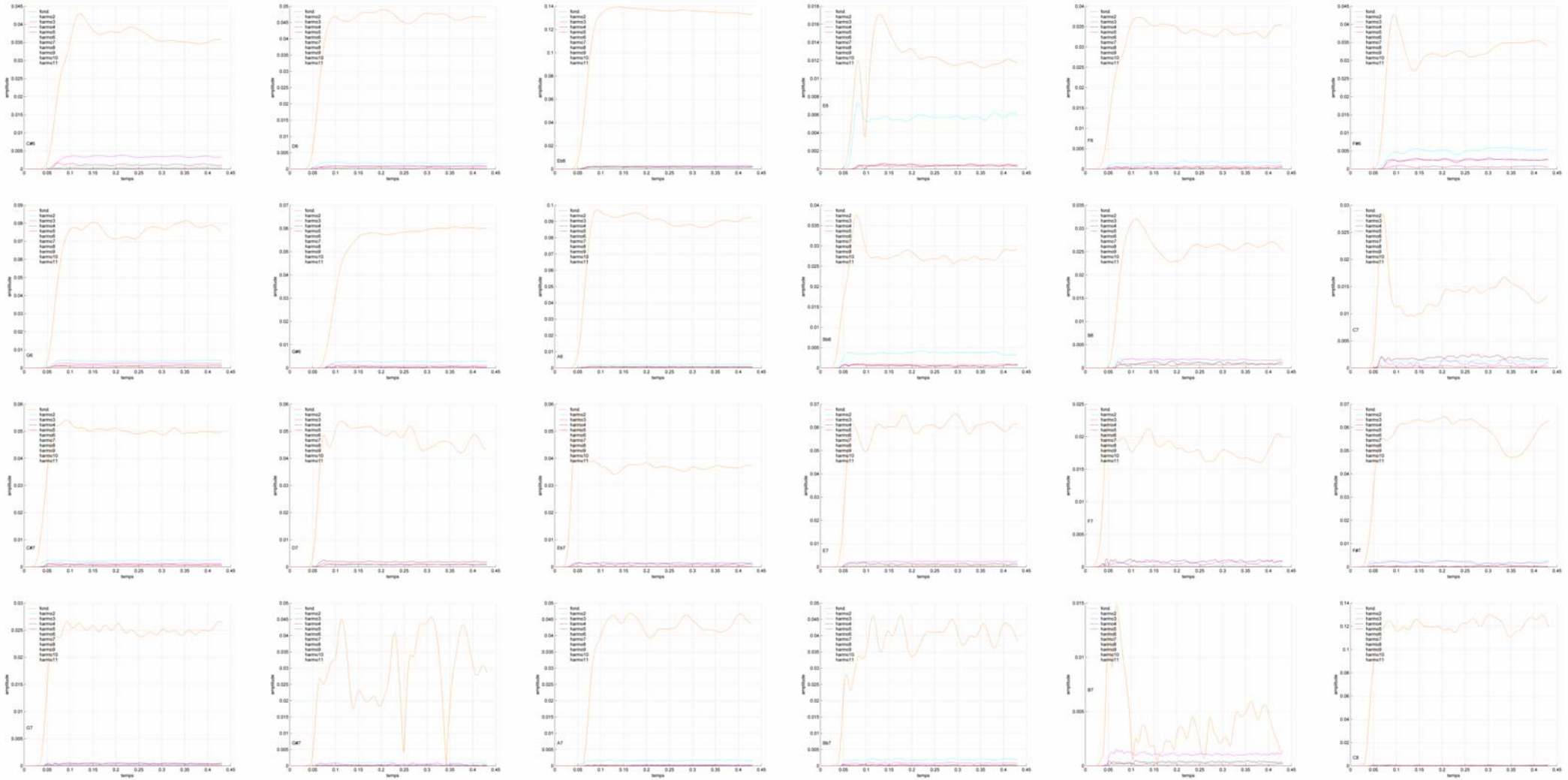
Transitoires d’attaque Kéraulophone



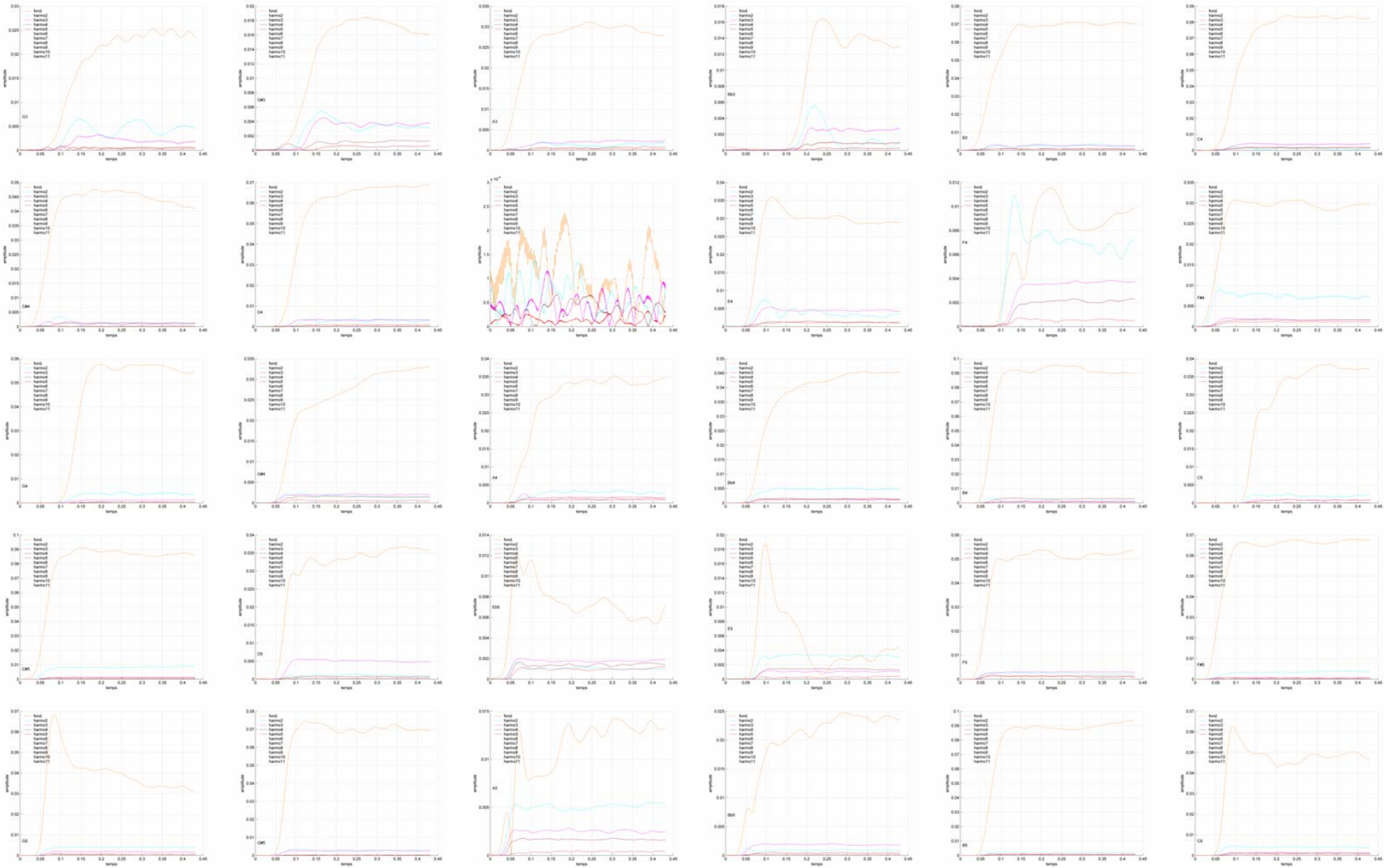


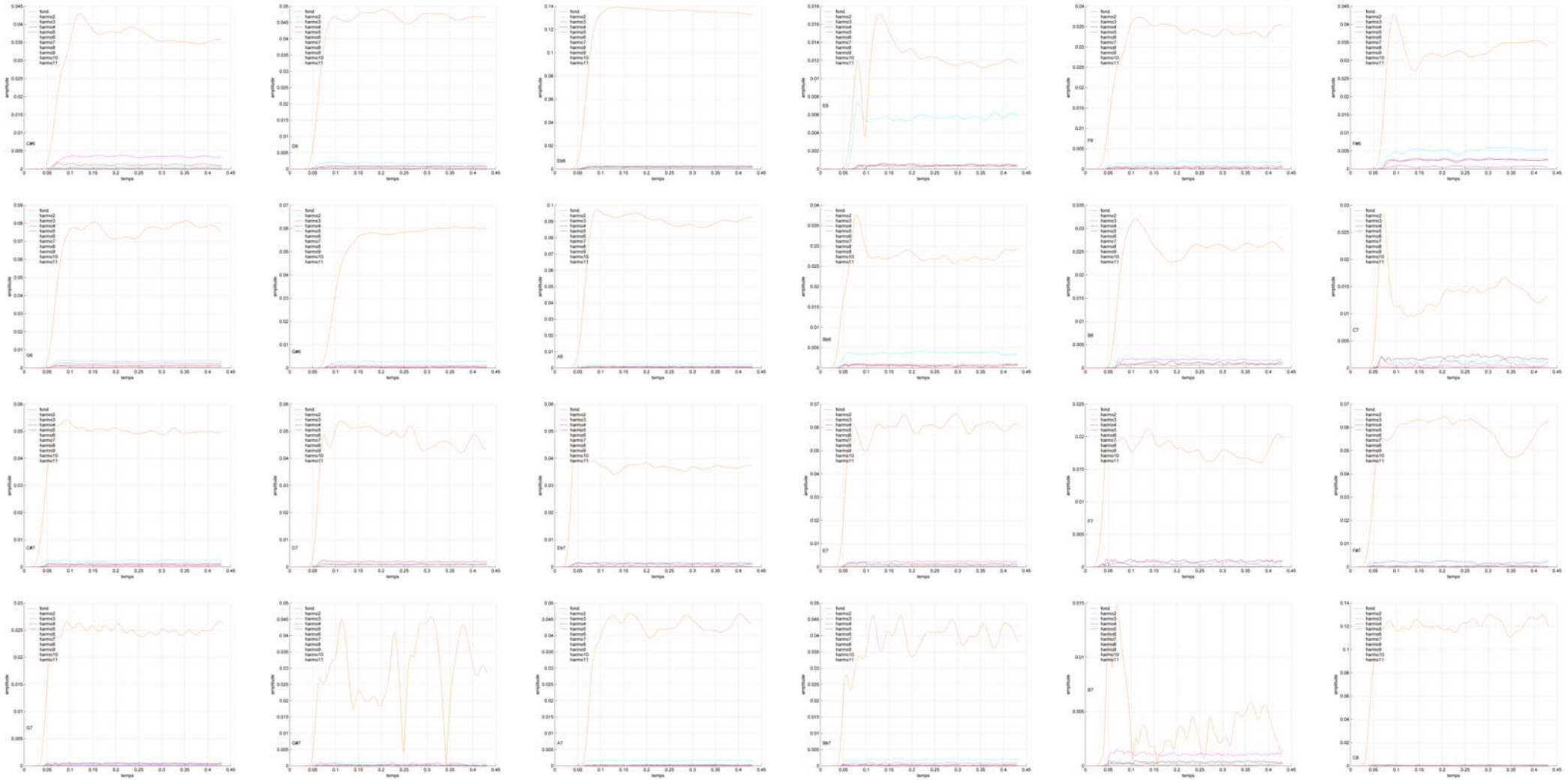
Transitoires d’attaque Nasard



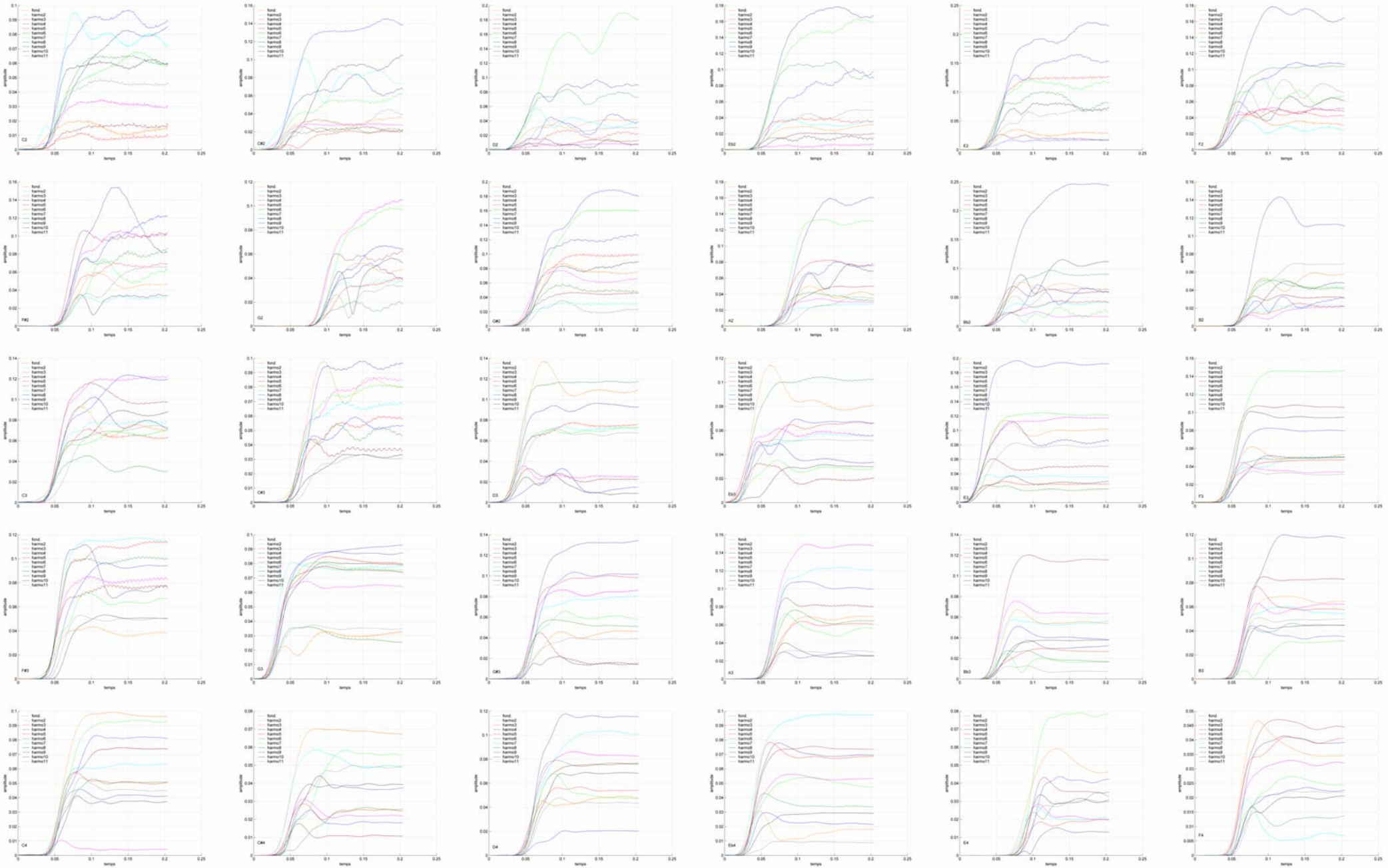


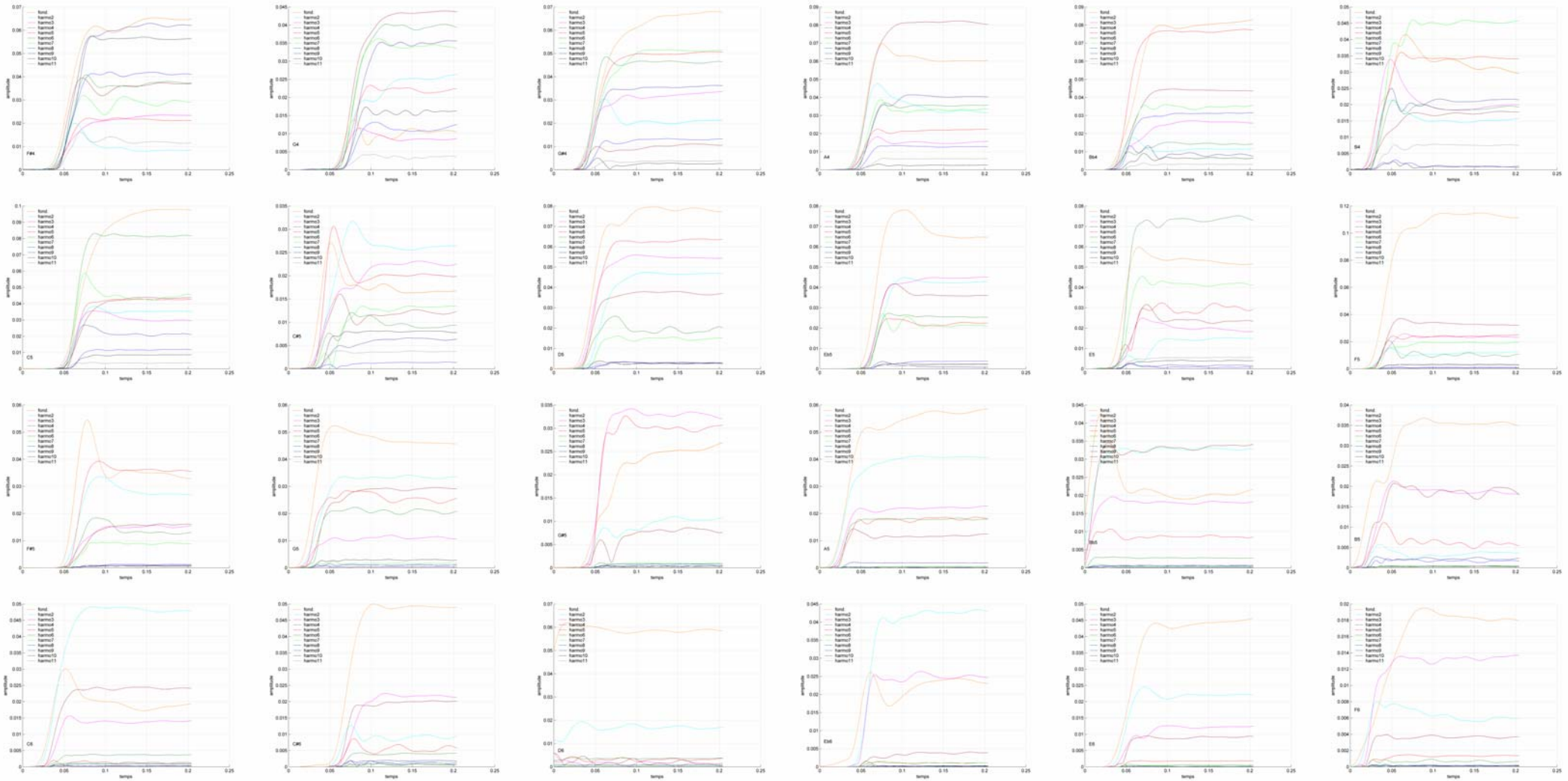
Transitoires d’attaque Nasard





Transitoires d’attaque Trompette




fond.
harmo2
harmo3
harmo4
harmo5
harmo6
harmo7
harmo8
harmo9
harmo10
harmo11
amplitude
temps
F#4
G4
G#4
A4
Bb4
B4
C5
C#5
D5
Eb5
E5
F5
F#5
G5
G#5
A5
Bb5
B5
C6
C#6
D6
Eb6
E6
F6