



MI
Mission pour
l'Interdisciplinarité

APPEL A PROJETS actions Interdisciplinaires 2017

COFIL MI

Identification

Civilité et Nom du porteur du projet	LETESSIER SELVON Antoine
Titre long (max 150 caractères)	Contrôle Haptique et Asservissement de la Mécanique des Pianos de concert
Acronyme	CHAMP

Résumé du projet :

Nous proposons la réalisation d'un système de motorisation asservie de la mécanique d'un piano à queue afin d'offrir de nouvelles couleurs aux préparateurs de pianos et de nouvelles voies d'expressions musicales aux interprètes tout en gardant intact le toucher traditionnel des mécaniques à répétition.

Ce projet interdisciplinaire associe de nombreuses compétences, en lutherie artisanale, en technique de préparation de piano, en physique, en électronique rapide et en mécanique de précision. Il comporte trois phases: la première concerne la réalisation d'un modèle numérique et d'un modèle physique de quelques notes comprenant chacune un capteur de mouvement afin de tester le système d'asservissement et le positionnement des moteurs. Une deuxième phase concerne l'exploration des possibilités sonores offertes par cet asservissement (entre autres l'introduction de marteaux lourds, le déplacement du point de frappe ou la modification du système de répétition).

Introduction, état de l'art

La technologie du piano a fortement évolué entre 1700 et la fin du 19ème siècle, date de la construction du premier piano Steinway, qui fait encore référence aujourd'hui. La mécanique à répétition de Sébastien Érard, brevetée à Londres par son neveu Pierre en 1921, est toujours utilisée aujourd'hui.

Pourtant, les salles de concerts sont de plus en plus grandes et demandent, malgré une acoustique souvent exceptionnelle, des instruments de plus en plus puissants. Notons également que les orchestres sont aussi plus larges et que les instruments eux-mêmes, des cordes aux cuivres, ont également gagné en puissance. La demande contemporaine de piano de concerts d'une puissance toujours plus grande (sans perte de sensibilité) n'a donc jamais été aussi forte.

La puissance n'est cependant que l'un des paramètres sur lequel l'addition d'une source extérieure d'énergie permet d'intervenir. Si certaines évolutions ont vu le jour, notamment au niveau des alliages ou structures, la mécanique a très peu évolué, et compte tenu des contraintes, l'ouverture vers de nouvelles expressions sonores par ce biais n'a pas été explorée. À puissance fixe, on peut explorer une répartition différente de l'énergie cinétique entre la masse du marteau et sa vitesse. Cette exploration est très limitée dans le cas d'une mécanique traditionnelle car l'inertie de l'ensemble doit être contenue afin que l'effort d'enfoncement des touches reste tolérable pour l'artiste, surtout à haute vitesse. Il en ressort que les masses des marteaux et le point de frappe, deux éléments qui ont une importance considérable dans la couleur du son, indépendamment de la dynamique, sont aujourd'hui fixés à des valeurs de référence choisies et considérées comme optimales par l'ensemble des fabricants actuels. Une plus grande latitude dans le mode de transfert d'énergie de la touche au marteau et du marteau à la corde permettrait une exploration d'une palette de couleurs beaucoup plus large et également une meilleure exploitation des nouvelles technologies de cadres et de cordes.

La mécanique des pianos à queue (figure 1) est constituée de trois pièces principales : la touche, le chevalet et le marteau. Lorsque la touche est enfoncée, elle transmet l'énergie du doigt qui l'enfonce au chevalet qui

démultiplie la vitesse d'enfoncement afin de propulser à grande vitesse (jusqu'à plusieurs m/s) le marteau sur les cordes.

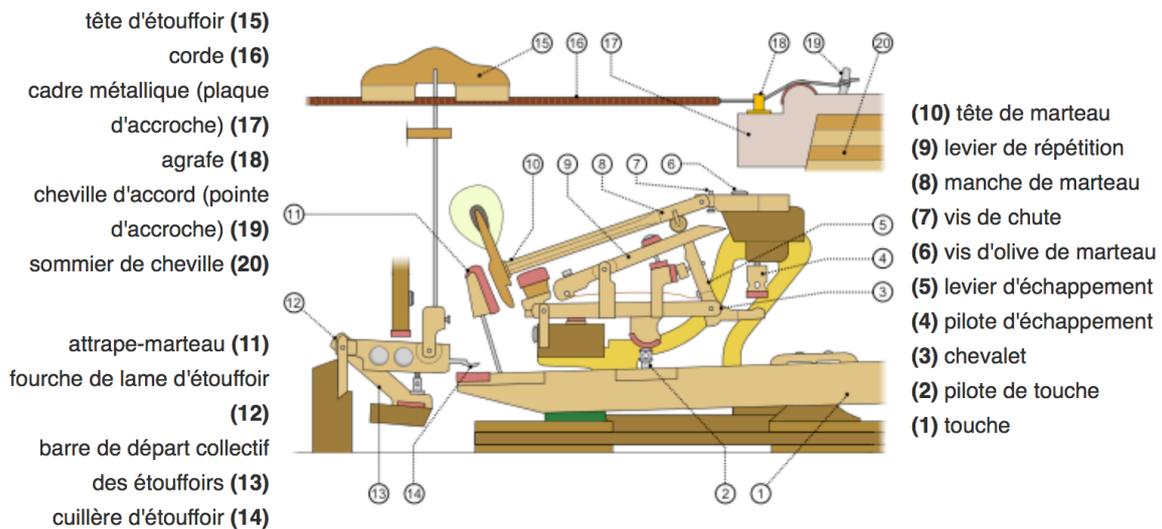


Figure 1: Mécanique de Piano à queue

Le transfert d'énergie des marteaux aux cordes passe par une impulsion mécanique dont l'amplitude dépend de l'énergie cinétique du marteau et dont la durée (à vitesse de marteau fixée) dépend de la dureté des feutres, du point de frappe et de l'élasticité des cordes. Les mécaniques standards imposant la masse des marteaux et le point de frappe, le préparateur ne peut jouer pour l'harmonisation que sur les feutres tandis que l'énergie maximale transmise est, toutes choses égales par ailleurs, fixée par la masse du marteau lui-même.

De nombreux articles¹ concluent (sur la base de leurs expériences) que la masse des marteaux est un élément essentiel de l'harmonie. Le poids d'enfoncement d'une touche de clavier est compris entre 45g et 60g, tandis que la masse des marteaux est d'un peu moins de 12g dans les basses à moins de 5g dans les aigus, et ce depuis 200 ans. C'est le confort de jeu des pianistes qui l'impose. Pour maintenir l'inertie des touches à un niveau acceptable, il faut également que l'ensemble de la masse mise en mouvement ne soit pas trop élevée et donc que le contrepoids (en plomb) mis dans les touches reste faible. Ces deux principes limitent la masse du marteau qui est le seul élément qui pourrait, si on augmentait sa masse, transmettre toute l'énergie qu'un piano de 3m (et plus!) peut développer.

Projet

Nous proposons d'explorer de nouvelles possibilités basées sur une motorisation asservie qui conserverait intact le toucher. Nos premières réflexions sur la réalisation d'un système d'assistance et d'asservissement d'une mécanique de piano à queue démontrent qu'il faut faire appel à des technologies de pointe et une interaction très forte avec le pianiste, ce qui explique l'aspect novateur de notre projet. Par exemple, les contraintes mécaniques sur les moteurs susceptibles de seconder les doigts dans leur action sont nombreuses. Pour ne citer que les plus essentielles :

- rapidité : temps de réponse à la milliseconde, vitesse maximum de l'ordre du mètre par seconde, accélération de l'ordre de 10 ou 20 g (100 à 200 m/s^2),
- puissance : force en impulsion de l'ordre de 1 kg ou 10 N,
- encombrement faible : dimensions de l'ordre de 1 cm (l) x 1 cm (p) x 5 cm (h),
- bruit, inexistant ou négligeable : 20-25 dB ou moins à 1m,
- précision : positionnement du manche de marteau au dixième (0,1 mm),

¹ Par exemple <http://www.boddinpianoservice.be/Ptdfrancais.htm>, "Morphologie et acoustique du piano", René Caussé, Résonance n° 5, septembre 1993, <http://articles.ircam.fr/textes/Causse93a/>, Le poids au toucher de la mécanique du piano à queue, © 2006 Bill Spurlock,

- fiabilité : durée de vie de milliers d'heures et plus de 10 millions de mouvements.

Des moteurs avec ces caractéristiques sont disponibles aujourd'hui et font appel (entre autres) à de puissants aimants miniatures pour les mouvements et à des sondes à effet Hall intégrées pour le positionnement.

L'électronique qui permet la mesure du déplacement des touches (connectée à un capteur de position et/ou un accéléromètre) et qui contrôle l'asservissement doit elle aussi être rapide et précise, si possible intégrée, fiable, puissante et programmable et fera donc appel à de la micro-électronique compatible HT (100V) ainsi qu'à des FPGA pour la programmation de l'asservissement et le contrôle du toucher. L'expertise du LPNHE en électronique de pointe et mécanique de précision est un atout déterminant de cette réalisation.

La qualité de la boucle de feedback est également un point essentiel de notre entreprise. C'est ici que l'expertise de Laurent Bessières (accordeur) donne tout son sens musical au projet. L'asservissement devra d'une part donner aux artistes un confort de jeu digne des meilleures mécaniques avec en plus un équilibrage parfait sur toute l'étendue du clavier. D'autre part, et c'est peut-être le plus important, un certain nombre de paramètres de la boucle d'asservissement seront modifiables par le technicien pour offrir à l'artiste une sonorité et une couleur propre non seulement à son jeu mais aussi à la nature des pièces jouées et à l'acoustique de la salle d'exécution.

Afin que le système final soit transparent, c'est-à-dire, que le système actif asservi soit perçu comme passif (assistance non décelable par le musicien en aveugle), l'approche privilégiée reposera sur des techniques récentes de remodelage d'énergie fondée sur des formulations hamiltoniennes à ports (expertise du STMS): le comportement énergétique passif de la touche (système de Sébastien Érard avec ses paramètres géométriques et physiques originaux) sera celui reproduit par l'asservissement appliqué à la touche modifiée (avec un marteau plus massif et un actionneur), et de sorte que les erreurs de paramètres préservent la passivité du système.

Le résultat final dépend également d'un mariage harmonieux entre la mécanique/clavier et l'ensemble harmonique et nous devrons procéder par étape. Deux axes seront explorés en priorité :

- Paramétrer la courbe de réponse de la mécanique en fonction de l'énergie fournie par l'artiste. On peut élargir ou rétrécir la gamme dynamique et rendre la courbe de réponse non linéaire et des degrés aussi divers qu'imaginables.
- Modifier les caractéristiques physique des éléments de la mécanique, comme la masse et les têtes de marteaux et, en allant plus loin, le point de frappe.

L'originalité de notre projet tient également dans le fait que nous souhaitons mettre en place une modélisation complète du système, permettant d'une part de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu, et d'autre part de tester une gamme très grande de possibilités (position de l'actuateur, nombre, nature et position des capteurs). Le système physique étudié est représenté par un ensemble de composants (éléments stockant de l'énergie, éléments dissipatifs, sources externes) reliés par des connexions conservatives (bilan d'énergie ou de puissance). Cette représentation garantit que les lois de conservations sont satisfaites à toutes les interfaces, et permet d'élaborer des simulations préservant ces propriétés. Cette approche permet de simuler des systèmes complexes et ses réponses non linéaires aux actions extérieures.

En conclusion, nous souhaitons explorer les possibilités nouvelles qu'offrent un couplage entre électronique ultra-rapide et algorithmes rétro-actifs d'asservissement, en relation étroite avec le rendu et la sensation de l'artiste. Cette approche interdisciplinaire peut déboucher sur de nouvelles potentialités non encore identifiées. De plus, ce projet pourra être l'occasion de fédérer d'autres personnes.