

Projet interdisciplinaire musique/acoustique/physique



Asservissement de la mécanique des pianos de concert

Laurent Bessi res¹, Thomas H lie², Hervé Lebbo³, Antoine Letessier Selvon³

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). Elle conduira à la réalisation d'un prototype avancé d'une ou deux octaves pour le calibrage et l'étude des réglages de l'asservissement qui devront être offerts aux préparateurs et aux artistes. La troisième phase comporte la réalisation d'un clavier complet de 88 ou 102 notes avec présentation lors d'un concert public.

¹ Technicien piano à la Philharmonie de Paris, Mairie de Paris, Ministère de la culture

² Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique IRCAM, CNRS-UPMC

³ Laboratoire du Physique Nucléaire et des Hautes  nergies LPNHE, CNRS-IN2P3, UPMC

Avant propos

Ce projet est né de la rencontre de Laurent Bessières, préparateur de piano et intervenant pour les concerts et récitals de la Philharmonie de Paris, avec Antoine Letessier Selvon, physicien des hautes énergies, directeur de recherche au CNRS et pianiste amateur.

Mis en relation par Jean-Marc Tournon, restaurateur de pianos anciens, c'est en discutant autour de la préparation d'un piano que ces deux passionnés de musique ont eu l'idée d'élargir les possibilités de l'instrument en modifiant de manière originale sa mécanique. Grâce aux techniques modernes, il leur est apparu que les préparateurs de pianos pourraient offrir de nouveaux moyens d'expression aux artistes tout en respectant le lien étroit qu'ils entretiennent avec leur instrument en particulier par l'intermédiaire de son toucher.

Ce projet repose sur la complémentarité des compétences de Laurent Bessières préparateur de piano de grand talent qui travaille depuis plus de 15 ans au service de pianistes de renommée internationale⁴, de celles de Thomas Hélie spécialiste à l'IRCAM (Institut de Recherche et de Coordination Acoustique Musique) de la modélisation physique d'instruments de musique et de la voix, de celles d'Hervé Lebbolo, ingénieur de recherche au LPNHE (Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Énergies) spécialiste de micro-électronique et d'Antoine Letessier Selvon directeur de recherche au LPNHE qui, en dehors de leur passion pour la musique, ont conduit dans le cadre de leurs activités au LPNHE de nombreux projets où le développement d'électroniques de pointes et de mécaniques de haute précision sont habituels.

Bref état de l'art

C'est en 1700 que Bartolomeo Cristofori invente la mécanique à échappement et construit le premier instrument à cordes frappées : le piano-forte. Ce sont les balbutiements de l'histoire du piano à queue. Le piano-forte révolutionne la technique pianistique car il permet à l'interprète de passer par le jeu des doigts d'une nuance *piano* à une nuance *forte* ouvrant de nouvelles voies à l'expression musicale et à la créativité des compositeurs. Cent vingt-trois ans plus tard, en 1821, Sébastien Érard ajoute un système de répétition à la mécanique de Cristofori et invente la mécanique moderne dite (improprement) à double échappement.

A la même époque, deux progrès techniques et industriels vont donner naissance au piano moderne. D'une part l'utilisation d'acier fondu pour les cordes et d'autre part l'introduction de cadres métalliques en fonte. Par ailleurs, de nombreux brevets seront déposés concernant la table d'harmonie, le croisement des cordes, le chevalet, l'assemblage de la mécanique, etc. De telle sorte, qu'un peu avant 1890, l'essentiel de ce qui fait un piano moderne est accompli. A partir de cette date et à la suite d'une concentration industrielle de plus en plus forte, liée à

⁴Martha Argerich, Hélène Grimaud, Nelson Freire, Pierre-Laurent Aimard et bien d'autres

la nécessité de produire le plus d'instruments possible au moindre coût pour garantir plus de parts de marchés, les innovations vont essentiellement cesser et conduire en moins d'un siècle à la disparition de presque tous les facteurs artisanaux et à l'uniformisation quasi totale des instruments avec pour référence le piano de concert Steinway dont le modèle produit en 1877 réunissait déjà les inventions les plus importantes du XIX^e siècle.

On peut légitimement se demander quelles sont les lacunes du Steinway d'aujourd'hui, joué par 95% des pianistes de la planète, qui justifieraient de bouleverser l'état actuel ? Pourquoi changerait-on une équipe qui gagne ? De fait, nous ne souhaitons pas nous appuyer sur d'éventuelles lacunes du Steinway ou d'ailleurs de tout autre piano. Nous voulons avant tout ouvrir de nouvelles pistes. En introduisant une source extérieure d'énergie, totalement et délicatement pilotée par l'instrumentiste, nous allons libérer des contraintes à laquelle les pianos modernes, et les Steinway en particulier, ont répondu de manière optimale, mais qu'ils ont malgré tout bien été obligés d'intégrer.

Motivations

La mécanique à répétition de Sébastien Érard, brevetée à Londres par son neveu Pierre en 1921, est toujours utilisée aujourd'hui. Pourtant, la demande contemporaine de piano de concerts d'une puissance toujours plus grande (sans perte de sensibilité) n'a jamais été aussi forte. Par ailleurs, au cours des 30 dernières années, des facteurs indépendants⁵ ont introduit des innovations (nouveaux alliages pour les cordes, nouvelle structure pour le cadre et la table d'harmonie, etc) et repensé certains des choix techniques de la fin du XIX^e siècle (croisement des cordes, barrage,...). Ainsi en France, Stephen Paulello, le dernier facteur français de pianos de concert en activité [1], vient de produire le premier exemplaire de sa dernière création : l'Opus 102. Ce piano de concert fait 3m de long et possède une tessiture de 102 notes (contre environ 2m80 et 88 notes pour les pianos de concert standard). Il comporte de nombreuses innovations et a été accueilli par la critique comme la "Bugatti Royale" des pianos [2].

La mécanique, de son côté, a peu évolué. L'utilisation de matériaux composites ou la modification de certaines pièces a parfois permis d'explorer quelques pistes (légèreté, coût, endurance, reproductivité) mais de manière limitée car le compromis actuel semble optimal compte tenu des contraintes imposées par la morphologie de l'instrument et de l'énergie qu'un artiste peut raisonnablement fournir pour l'actionner. Compte tenu de ces contraintes, l'ouverture vers de nouvelles expressions sonores par le biais de la mécanique ne semble pas avoir été explorée. Certains développements ont consisté à introduire des éléments passifs, aimants, ressorts, élastiques, à l'intérieur de la mécanique ou sous les touches, mais aucun n'a semblé apporter suffisamment pour emporter l'adhésion des techniciens et surtout des artistes.

⁵ Voir par exemple David Klavins, Stuart & Sons ou en France Stephen Paulello

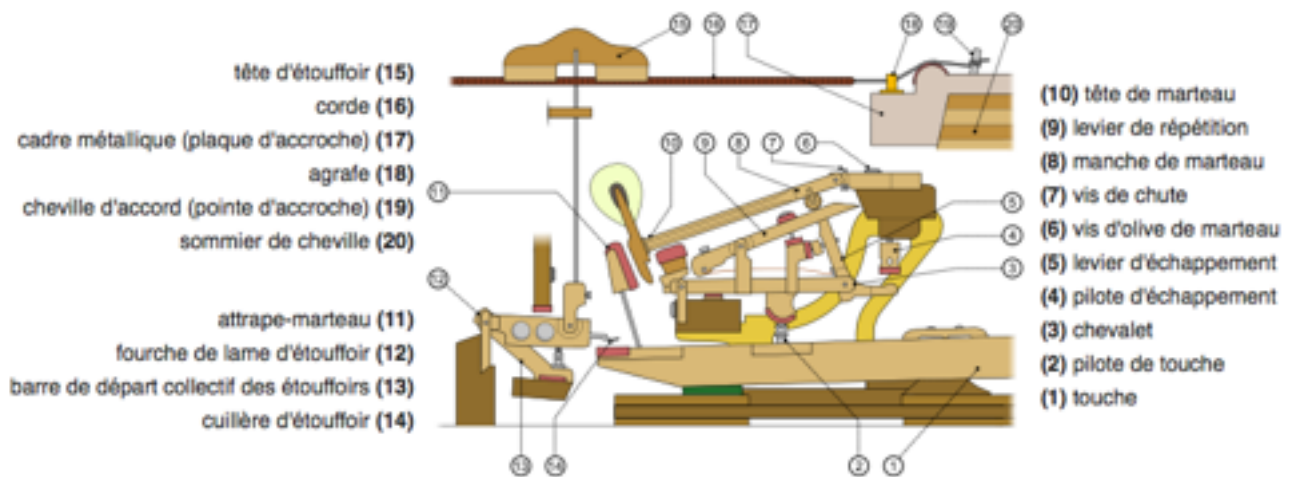


Figure 1: Mécanique de piano à queue

Côté éléments actifs, l'essentiel des innovations concerne la reproduction autonome par l'instrument d'une musique jouée précédemment (sur lui même ou sur un instrument similaire), c'est la cas par exemple de la technologie Disklavier™ mise au point par Yamaha [4]. Il n'y a pas d'interaction directe entre l'artiste et la mécanique augmentée. La mécanique de ces pianos enregistre le jeu de l'artiste puis le restitue sans son aide, avec une perte de sensibilité notable. Il n'y a donc pas d'exploration de nouvelles capacités sonores ou d'augmentation de la palette de couleur de l'instrument, bien au contraire. Notons cependant les explorations de certains chercheurs comme par exemple Andrew McPherson⁶ et son "Magnetic Resonator Piano" où des électroaimants placés au dessus des cordes les maintiennent en résonance sous le contrôle de l'interprète offrant ici très clairement de nouvelles options d'expression.

D'un autre côté, 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. Ainsi on trouve aujourd'hui des pianos de plus de 3m (Fazioli 3,08m) permettant en principe d'obtenir une puissance extrême mais c'est toujours la mécanique de Sébastien Érard qui est employée pour produire le son, une mécanique à la puissance limitée par celle que l'artiste peut lui fournir.

La puissance n'est cependant que l'un des paramètres sur lequel l'addition d'une source extérieure d'énergie permet d'intervenir. 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

⁶ A. McPherson. The magnetic resonator piano: electronic augmentation of an acoustic grand piano. *Journal of New Music Research* **2010**, 39 (3), 189-202. (voir <http://www.eecs.qmul.ac.uk/~andrewm/mrp.html>)

dynamique, sont aujourd'hui fixés à des valeurs de référence choisies et considérées comme optimales par le fabricant dominant le marché actuel et pour l'essentiel copiées par tous les autres. Insistons néanmoins sur le fait que compte tenu des contraintes décrites ci-dessus (inertie, poids, morphologie), les variations sur ces paramètres sont très limitées, et c'est pourquoi nous nous proposons de lever une partie au moins de ces contraintes.

Ce constat est aussi celui que fait Laurent Bessières qui, après avoir exercé son métier d'accordeur préparateur concert pendant plus de 15 ans auprès des plus grands artistes⁷ et dans les plus grandes salles de concert de Paris, aimerait pouvoir offrir d'avantage à ceux qui le souhaitent. Les artistes ont en effet des exigences quant au toucher et à la sonorité souvent contradictoires compte tenu de ce qui peut être fait sur une mécanique ordinaire. 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.

Concepts

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. Les réglages de la mécanique permettent de modifier la sensation de toucher et la production sonore. Ainsi, on peut obtenir un clavier plus léger ou plus lourd et un son plus puissant, plus doux, plus clair ou plus feutré.

Le transfert d'énergie des marteaux aux cordes passe par une impulsion mécanique dont l'amplitude dépend de l'énergie cinétique du marteau (l'énergie cinétique est proportionnelle au produit de la masse du marteau par le carré de sa vitesse) 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 articles [5,6,7], rédigés par des spécialistes, concluent (sur la base de leurs expériences) que le poids des marteaux est un élément essentiel de l'harmonie du piano :

⁷ notamment Daniel Barenboim, Lang Lang, Martha Argerich, Maria-João Pires, Pierre-Laurent Aimard, Hélène Grimaud ou encore Keith Jarrett pour ne citer que les plus célèbres

- “Le poids du marteau n'a pas seulement une grande incidence sur le toucher, il en a aussi une sur le son. En ce sens, nous devons bien inclure l'effet sonore du poids du marteau dans toute discussion au sujet du réglage du toucher”; c.f. Boddin Piano Service [5].
- “[...] appréciation critique d'un piano à queue steinway modèle S: les marteaux étaient légers, le son semblait irréprochable. Franz accrocha des poids de quelques grammes sur quelques manches de marteau et déplaça ainsi le dit poids dans la "high zone" [région désignant les pianos dits lourds, NDLR]. A l'écoute du son ainsi modifié, leur surprise fut très grande: ça n'était plus seulement du son, on pouvait carrément sentir le son occuper l'espace. La différence fut si importante que Wim s'exclama : " Mais alors, c'est quoi l'intonation !?" Ses mots nous interpellèrent tous. Voilà qui prouve que nous avons bien à réexaminer en profondeur l'idée et la pratique de l'intonation en y intégrant le rôle que joue le poids du marteau, [...]”; ibid [5].
- “D'une façon générale, la majorité des améliorations successives ont toutes cherché à obtenir un son à la fois fort et tenu. La sonorité des pianos actuels donne l'illusion d'une continuité sonore que les facteurs ont toujours cherché à obtenir. A l'inverse, un système élaboré d'étouffoirs permet d'obtenir des sons extrêmement brefs, ce qui fut longtemps impossible. Pour obtenir cette double qualité, la dimension et le poids des marteaux qui viennent frapper les cordes se révèle décisif. [...] Le rapport de la masse de la corde à la masse du marteau se révèle ici le facteur déterminant.” par René Caussé dans Résonance n° 5, septembre 1993 Copyright © IRCAM [6]

Le poids d'enfoncement d'une touche de clavier est compris entre 45g et 60g, celui 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 du poids mis en mouvement ne soit pas trop élevé et donc que le contre-poids (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.

Réalisation

Mécanique et Électronique

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. 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 :

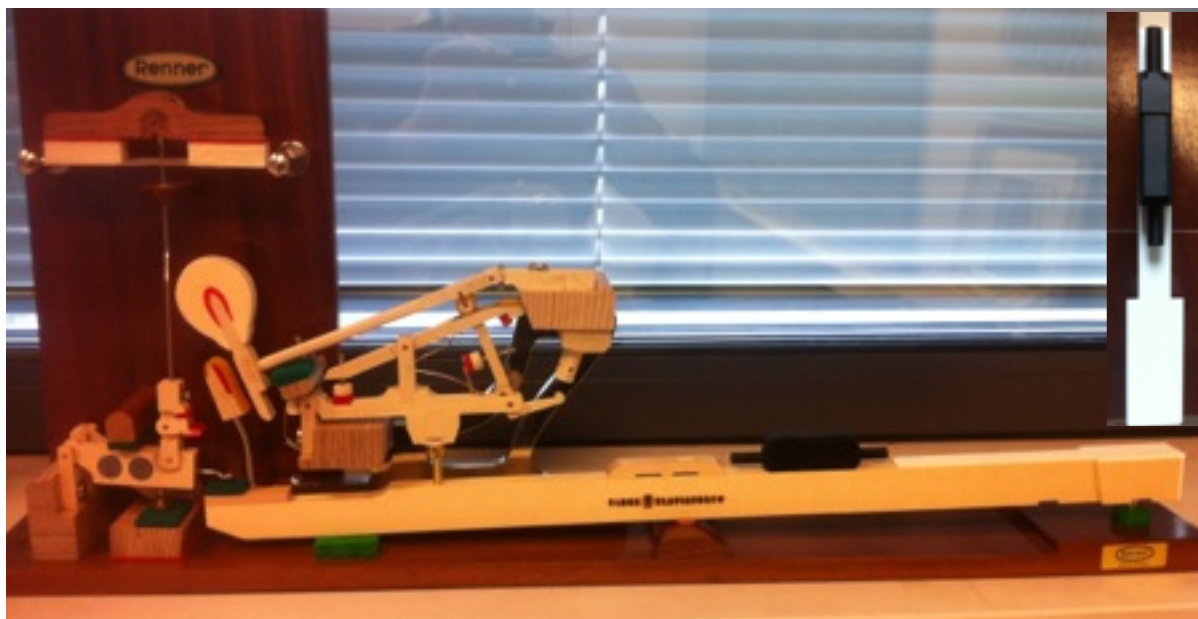


figure 2 : Une mécanique de type Renner avec un modèle 3D de l'actuateur linéaire envisagé (en noir posé sur la touche) pour donner l'échelle. L'actuateur peut être soit intégré dans le sommier en tête de la mécanique sous la cuillère d'étouffoir ou bien positionné à l'arrière de celle-ci sur le sommier de cheville. Plusieurs positions seront étudiées. En insert une vue de l'actuateur sur la touche qui montre que sa largeur est parfaitement adaptée.

- 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 : 10-15 dB ou moins à 1m,
- précision : positionnement du manche de marteau au dixième (0,1 mm),
- 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. La figure 2 montre un profil de mécanique (c'est à dire la mécanique complète d'une touche individuelle) de la marque Renner, d'autres modèles existent, notamment sur les Steinway, mais leurs caractéristiques essentielles sont semblables. Sur cette même figure, un modèle en impression 3D d'un moteur linéaire de la marque Faulhaber, aux performances mécaniques adaptées à notre problème, est posé sur la touche. On peut voir que ses dimensions sont idéalement adaptées à celles d'un clavier de piano.

L'électronique qui permet la mesure des déplacements des touches (connectée à un capteur de position et/ou un accéléromètre) et qui contrôle l'asservissement doit elle aussi être rapide et

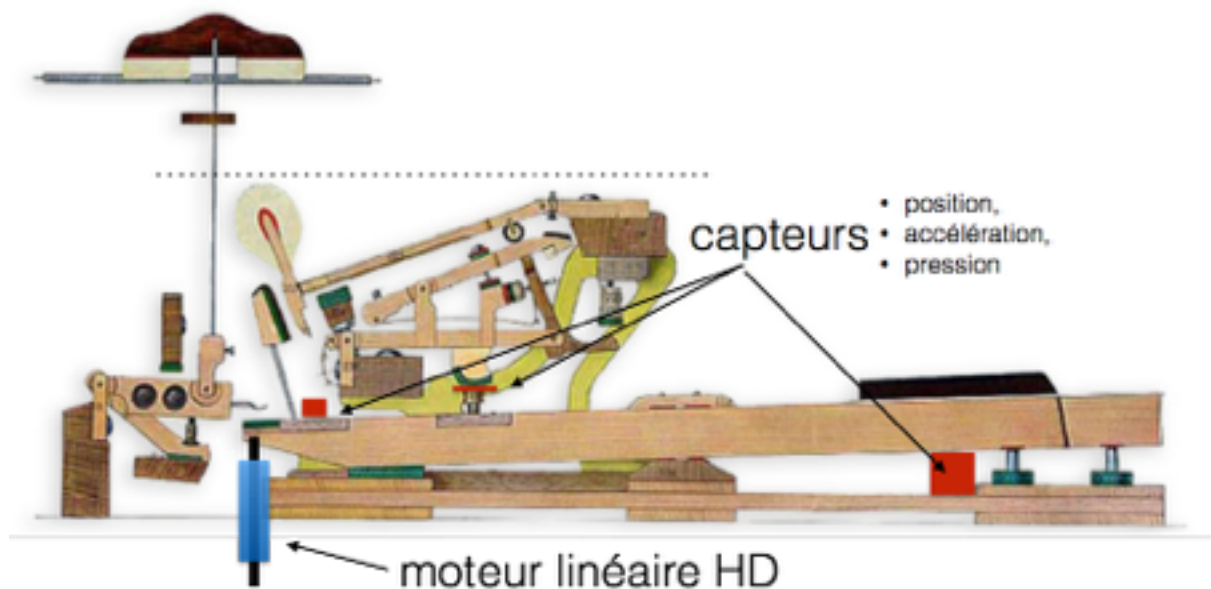


Figure 3: une implémentation possible du moteur et des capteurs. Plusieurs types de capteurs sont envisageables, accéléromètre sur la touche, capteur de pression entre la touche et le pilote, capteur de position sous la touche. Nous étudierons les propriétés de chacun et adopterons celui ou la combinaison de ceux qui donnent le meilleur rendu par rapport au touché original.

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.

Pour guider les idées, un schéma envisageable d'implémentation est proposé sur la figure 3. L'implémentation optimale nécessite bien-sûr une étude plus approfondie, il s'agit simplement ici de se de fixer les idées. Le moteur et les capteurs de positions sont représentés par les rectangles bleus ou rouges. Sur cette proposition, le rapport (R) entre l'action du moteur et celui du marteau est le même que pour le doigt de l'artiste soit environ 5,5. Les modifications apportées à la mécanique originale sont minimales. Avec un réglage approprié, la sensation de toucher sera adaptable aux désirs de l'artiste et restera très proche des sensations offertes par la mécanique à répétition et ce même si les marteaux sont lourds car le moteur accompagne en le soutenant le mouvement de la touche mais ne s'y substitue pas totalement.

Boucle d'asservissement

La qualité de la boucle de feedback est un point essentiel de notre entreprise. C'est ici que l'expertise de Laurent Bessières 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.

L'échappement et la façon dont il se déroule constituent l'épicentre de l'expressivité. Nous en avons bien conscience et notre intention est bien de le conserver tel quel afin que l'artiste ne soit pas perturbé et puisse donner le meilleur de lui même. Le résultat final dépend également d'un mariage harmonieux entre la mécanique/clavier et l'ensemble harmonique et nous devons procéder par étape. D'abord assurer que l'apport d'énergie peut se faire de manière quasi transparente pour l'artiste, ensuite exploiter les possibilités offertes par cet apport. Deux axes seront explorés en priorité :

- le paramétrage de 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.
- la modification physique des éléments de la mécanique, comme le poids et les têtes de marteaux et, en allant plus loin, le point de frappe.

Sur tous ces domaines, l'expertise de Laurent Bessières est fondamentale aussi bien pour identifier les paramètres de contrôle que pour qualifier leur gamme et pour la bonne intégration de l'ensemble dans l'instrument. La programmation des fonctionnalités dans le FPGA qui calculera les commandes du moteur à partir des données des capteurs sera elle réalisée par les ingénieurs du LPNHE.

Modélisation

Thomas Hélie, chercheur à l'IRCAM au Laboratoire des Sciences et Technologies de la Musique et du Son, est spécialiste de la modélisation physique d'instruments de musique. L'un de ses projets de recherche concerne notamment la modélisation, l'asservissement et la commande d'une bouche artificielle robotisée pour le jeu de cuivre. Dans le cadre de notre projet son expertise nous permettra de modéliser les performances de la boucle de feedback en fonction des paramètres mécaniques que nous pouvons ajuster (position de l'actuateur, nombre, nature et position des capteurs). Disposer d'un modèle nous permettra de choisir les configurations les plus prometteuses avant de les réaliser plutôt que d'avoir à toutes les construire et toutes les essayer.

La méthode des systèmes Hamiltonien à ports (Port Hamiltonian System ou PHS) nous permettra de réaliser ces modèles. Cette approche où 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) permet une modélisation numérique relativement simple des systèmes complexes. Cette représentation garantie par ailleurs que les lois de conservations sont satisfaites à toutes les interfaces. La modularité du PHS permet d'envisager une complexité graduelle de la modélisation jusqu'à représenter de manière très réaliste l'ensemble touche, chevalet, marteaux ainsi que les commandes d'étouffoir et les ressort de rappel. Dans ce cadre nous nous appuyerons également sur les travaux de Xavier Boutillon concernant la modélisation extrêmement réaliste du toucher des mécaniques de piano à queue. [ref]

Notons également que l'approche PHS permet d'étudier les réponses non linéaires aux actions extérieures et de calculer les (pré-)contraintes à appliquer sur le signal d'entrée pour obtenir la réponse souhaitée (platitude). Cette approche nous permettra alors de calculer avec précision les paramètres de la boucle d'asservissement. La encore l'expertise de Thomas Hélie nous permettra d'élaborer ces modèles de manière efficace et optimale.

Ressources & calendrier

Le budget total sur 18 mois est de 82 000 €.

Phase 1 : 4 à 6 mois, 10 000€

L'objectif est d'une part de développer les modèles numériques et d'autre part de produire quelques notes pour valider chacun des choix techniques et chacun des éléments (type et assemblage pour le capteur de position, type et assemblage pour le bloc moteur, conception de la carte d'alimentation des moteurs, conception de la carte de feed-back). Ce travail de prospective et de conception sera pris en charge par les ingénieurs du LPNHE (environ six mois en mi-temps pour deux ingénieurs l'un en micro-électronique l'autre en contrôle numérique). Pour les achats de matériels il faut 3 k€ pour 3 blocs moteurs avec leur carte de contrôle, 1 k€ pour les capteurs de position et 3k€ pour la carte d'évaluation avec FPGA, 1 k€ pour 3 ensembles de mécanique à une touche (profil de mécanique) et enfin 2 k€ pour le design du circuit de contrôle. Total 10 k€

Phase 2 : 6 mois, 15 000€ + 10 000€ + 7 500 € = 32 500 €

Modification d'une mécanique complète pour accueillir 2 octaves avec assistance. Tests d'harmonisation et calibrage de l'asservissement, définition des paramètres de configuration du code du FPGA pour l'harmonisation. Version de pré-production de l'ensemble moteur/capteur/asservissement. Deux ingénieurs électroniciens à mi-temps (LPNHE), coût pour 2 octaves : 25 notes x 300 € = 7 500 € + FPGA + câbles + batteries d'alimentation + carte

contrôleur. Total 15 k€ auxquels il faut ajouter l'acquisition d'un piano à queue d'occasion (10 000 €) et le salaire du technicien piano (LB) pour la préparation du piano, la définition des paramètres d'harmonisation, les tests et réglages de la mécanique, et l'harmonisation (équivalent à 6 semaines de travail à temps plein) 7 500 € CC. Total 32 500 €.

Phase 3 : 6 mois, 39 500 €

Modification complète de la mécanique (motorisation et électronique pour 90 notes : 27 000 €), intégration des alimentations et du contrôleur d'harmonisation (3 000 €) salaire du technicien piano (équivalents à 6 semaines à temps plein) 7 500 € CC, préparation du concert de présentation (2 000 €), Total 39 500 €

Références

- [1] <http://www.stephenpauello.com>
- [2] <http://www.pianiste.fr/011-6423-L-OPUS-102-de-Stephen-Pauello-la-Bugatti-Royale-des-pianos.html>
- [3] <http://consumer.wesselnickelandgross.com/our-action-parts/>
- [4] <http://fr.yamaha.com/fr/products/musical-instruments/keyboards/disklaviers/>
- [5] <http://www.boddinpianoservice.be/Ptdfrancais.htm>
- [6] “Morphologie et acoustique du piano”, René Caussé, Résonance n° 5, septembre 1993, <http://articles.ircam.fr/textes/Causse93a/>
- [7] Le poids au toucher de la mécanique du piano à queue, © 2006 Bill Spurlock, www.spurlocktools.com, © juin 2013 Montpellier traduction de Marc Valdeyron

Laurent Bessières

Né en 1972, dans une famille de musiciens, il apprend jeune le piano. Diplômé de L'Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique, il rejoint en 1998 les ateliers de Pianos Hanlet où il est formé aux pianos Steinway. Après plusieurs stages aux ateliers Steinway de Hambourg, il a récemment reçu le prestigieux titre d'académicien Steinway.

Aujourd'hui accordeur référent de la Philharmonie de Paris, il a préparé les pianos de nombreux musiciens dont Daniel Barenboim, Lang Lang, Martha Argerich, Maria-João Pires, Pierre-Laurent Aimard, Hélène Grimaud ou encore Keith Jarrett.

Thomas Hélie

Hervé Lebbolo

Né en 1957, il est titulaire d'une Maîtrise de Physique et d'un Diplôme d'Étude Approfondie en Électronique et Instrumentation de l'Université Pierre et Marie Curie Paris VI. Amateur de free jazz et de musique improvisée, il est un piètre saxophoniste et passionné d'audio.

Entré au CNRS en tant qu'ingénieur électronicien en 1984, il a participé à plusieurs expériences de physique sur accélérateurs (Delphi, H1, Babar, D0) d'astroparticules et de cosmologie (HESS, Auger, LSST, DAMIC) et s'est spécialisé dans l'électronique analogique bas bruit.

Antoine Letessier Selvon

Né en 1962, il est licencié en Mathématique, docteur en physique théorique et habilité à diriger les recherches (HDR) de l'Université Paris VII-Denis Diderot. Pianiste amateur, c'est un passionné de musique.

Physicien des hautes énergies, il est entré au CNRS en 1989 où il est directeur de recherche depuis 2003. Ses travaux concernent principalement les neutrinos et leurs oscillations, les propriétés du Bozon Z0 et l'étude du rayonnement cosmique d'ultra haute énergie. Fondateur de l'observatoire Pierre Auger (rayonnement cosmique d'ultra haute énergie) sur lequel il travaille depuis 1995, il en est le coordinateur Français depuis 2007. Il est également directeur associé du laboratoire d'excellence de l'Institut Lagrange de Paris (ILP).

Chevalier de la Légion d'honneur pour ses travaux scientifiques en coopération avec l'Amérique du Sud.