

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

GÉNIE LOGICIEL, SPÉCIALISÉ DANS LES SYSTÈMES EMBARQUÉS

Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes  
Énergies

CONTRÔLE HAPTIQUE ET ASSERVISSEMENT DE LA MÉCANIQUE DES  
PIANOS DE CONCERT

5 Février 2018 – 13 Juillet 2018

Stage ST50

Professeur suiveur : GECHTER Franck

Tuteur de stage : LEBBOLO Hervé

Elève : ROMET Pierre



# Contents

<b>I</b>	<b>Préambule</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Remerciement</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Présentation du laboratoire</b>	<b>5</b>
3.1	Présentation des activités . . . . .	6
3.2	Projet et thématique . . . . .	7
<b>II</b>	<b>Projet "CHAMP"</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Présentation</b>	<b>10</b>
4.1	État de l'art . . . . .	10
4.2	Motivations . . . . .	11
4.3	Concepts . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Réalisation</b>	<b>14</b>
5.1	Mécanique et Electronique . . . . .	14
5.2	Boucle d'asservissement . . . . .	15
5.3	Modélisation . . . . .	16
<b>III</b>	<b>Travaux menés</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>La mesure de l'accélération</b>	<b>19</b>
6.1	Matériel utilisé . . . . .	19
6.1.1	Bus SPI . . . . .	19
6.1.2	Bus I2C . . . . .	22
6.2	Contrainte et choix de réalisation . . . . .	24
<b>IV</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>25</b>

# Part I

## Préambule

# Chapter 1

## Remerciement

Tout d'abord je tiens à remercier l'ensemble de mes collègues pour l'accueil des plus chaleureux, au sein du laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies, ainsi que pour leur présence tout au long de mon stage, en m'aidant et me conseillant.

Je voudrais remercier Monsieur Olivier LEDORTZ pour son aide concernant le langage VHDL.

Je tiens à remercier mon maitre de stage Monsieur Hervé LEBBOLO, pour son implication dans l'encadrement de mon stage, son soutien, ainsi que pour l'ensemble des connaissances transmises dans le domaine de l'électronique analogique.

Enfin, je tiens également à remercier mon enseignant suiveur, Monsieur Franck GECHTER, grâce à qui j'ai pu réaliser un stage de fin d'étude me permettant d'allier mon corps de métier, à une passion, la musique.

# Chapter 2

## Introduction

Dans le cadre des mes études d'ingénieurs au sein de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, j'ai effectué un stage de fin d'étude en laboratoire d'une durée de 24 semaines au sein du Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Énergies à Paris.

Le laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Énergies est une unité de recherche de l'institut national de physique nucléaire et de physique des particules, institut du CNRS et des universités Sorbonne Université et Paris Diderot.

Mon stage s'est déroulé au sein du service électronique, sous la tutelle de Monsieur Hervé LEBBOLO.

Lors de ce stage, je fut recruté pour participer au projet "CHAMP"; projet interdisciplinaire, initié par Hervé LEBBOLO, Antoine LETESSIER SELVON, Laurent BESSIER, Thomas Hélie.

Ce projet interdisciplinaire associe de nombreuses compétences, en lutherie artisanal, en technique de préparation de piano, en physique, en électronique rapide et en mécanique de précision.

L'objectif est 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, ainsi que de nouvelles voies d'expression musicales aux interprètes tout en gardant intact le toucher traditionnel des mécaniques à répétition.

Le laboratoire étant spécialisé dans le domaine de l'électronique de précision et de l'électronique numérique, travaillant sur des projets tel que LSST (Large Synoptic Survey Telescope - Grand télescope d'étude synoptique), ce stage fut pour moi l'occasion d'évoluer dans un domaine des systèmes embarqués que je ne maîtrisais peu, (de part ma formation) l'électronique analogique et numérique, ce qui m'a permis de découvrir et d'acquérir de nouvelles compétences ainsi que les méthodes de développement qui y sont lié.

Suite à cette introduction, nous allons poursuivre avec la présentation du laboratoire (LPNHE), puis nous concluons cette première partie par la présentation du projet "CHAMP".

# Chapter 3

## Présentation du laboratoire

Le LPNHE a été fondé par un groupe de chercheurs et enseignants-chercheurs issus de la division « hautes énergies » de l'institut de Physique Nucléaire (IPN) d'Orsay. En 1970, ces spécialistes des chambres à bulles rejoignent l'université Paris VI, puis l'ensemble devient un laboratoire associé au CNRS. A cette époque, la recherche s'y organise principalement autour d'expériences de chambres à bulles au CERN. Le LPNHE a donc derrière lui une longue histoire de collaboration avec le CERN.

Aujourd'hui encore, même si les expériences et projets dans lesquels est engagé le laboratoire se trouvent maintenant sur les cinq continents, le CERN reste l'endroit privilégié où les chercheurs de physique des particules du laboratoire effectuent leur recherche.

Le Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Énergies est une unité de recherche de l'institut National de Physique Nucléaire et de Physique des particules, institut du CRNS et des universités Sorbonne Université et Paris Diderot. Il est constitué de 12 groupes de recherche, dont un à l'interface physique/biologie, de 3 services techniques (informatique, électronique, mécanique), et de deux services support étant l'administration et la logistique.

Ces programmes couvrent les enjeux actuels de la physique des particules, des astroparticules, et de la cosmologie. On retrouve un groupe constitué de:

- 24 enseignant chercheurs
- 27 chercheurs
- 44 personnels d'appuis à la recherche
- 20 Doctorants

### 3.1 Présentation des activités

Le Laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies (LPNHE) est engagé dans plusieurs grands programmes expérimentaux, poursuivis dans le cadre de collaborations internationales auprès de très grandes infrastructures de recherche du monde entier, tel que des centres d'accélérateurs de particules, ainsi que des observatoires. Ces programmes couvrent les enjeux actuels de la physique des particules, des astroparticules, et de la cosmologie :

On retrouve ainsi des travaux portant sûr:

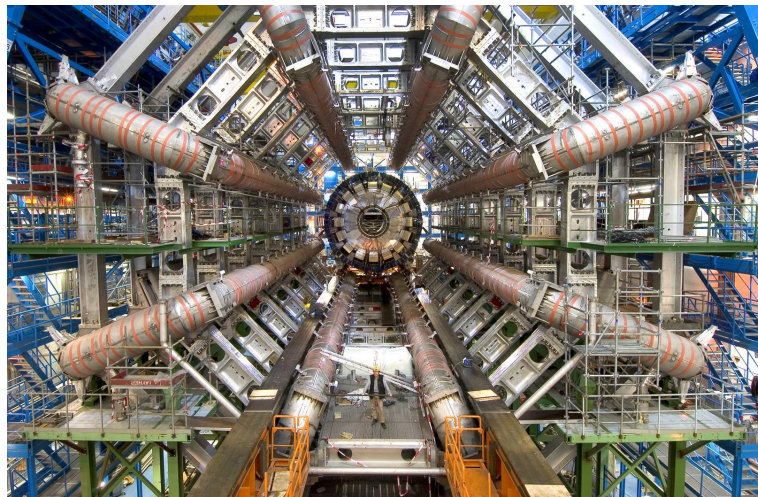
- L'origine des masses et des familles de particules, recherche du boson de Higgs, unification des interactions fondamentales, recherche de la supersymétrie, dimensions supplémentaires de l'espace-temps : thèmes abordés par les expériences CDF et D0 auprès du Tevatron à Fermilab, et par des expériences auprès du Large Hadron Collider au CERN (ATLAS au LPNHE), et enjeux d'un futur collisionneur e+e- pour lequel le LPNHE est engagé dans le développement de détecteurs en silicium.
- L'asymétrie matière-antimatière et la physique des saveurs lourdes : ce sont les sujets principaux des expériences BaBar au « SLAC National Laboratory », LHCb au CERN et la future SuperB factory en Italie.
- Les propriétés des neutrinos : participation à l'expérience Tokai To Kamiokande (T2K) au Japon.
- Le contenu énergétique de l'univers, matière noire et énergie noire : le groupe Cosmologie du LPNHE joue un rôle déterminant dans Supernovae Legacy Survey (SNLS) auprès du Canadian French Hawai Telescope dans Supernovae Factory (SNF) et est engagé dans la préparation des projets futurs Large Synoptic Survey Telescope (LSST) et EUCLID.
- L'origine des rayons cosmiques de très haute énergie : rayons gamma au TeV pour l'observatoire HESS en Namibie, et rayons cosmiques d'ultra haute énergie ( $10^{18}$  eV) pour l'observatoire AUGER en Argentine.

Depuis la conception des expériences, en passant par l'étude et la réalisation des instruments de détection, la mise au point des systèmes de détection, d'acquisition et de réduction des données, la calibration et le monitoring des détecteurs pendant les longues périodes de prise de données, l'analyse et l'interprétation physique des mesures, pour enfin aboutir aux publications. Ce travail s'étale sur plusieurs années, parfois plus de dix ans, réunissant des équipes et développent des compétences extrêmement diversifiées en physique, électronique, informatique ou mécanique. Les théoriciens du LPNHE représentent une petite composante qui enrichit la vie scientifique du laboratoire, ainsi que de la Fédération de Recherche sur les Interactions Fondamentales (FRIF), dont le laboratoire est membre, ce qui favorise un rapprochement plus fort théoriciens-expérimentateurs.

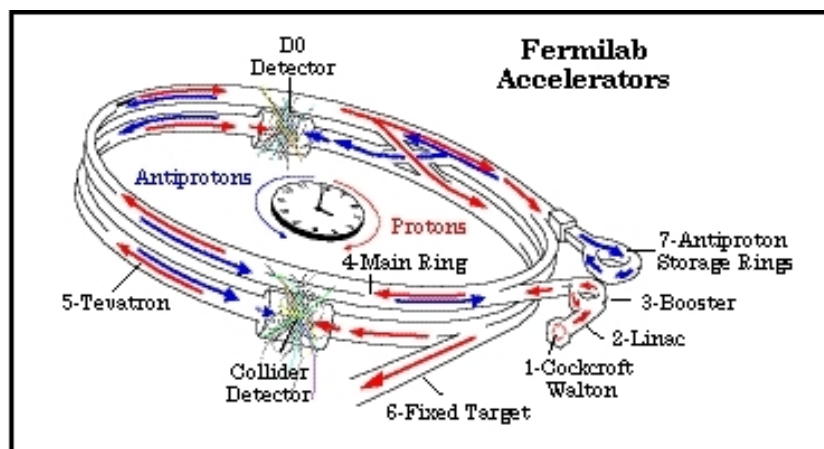
## 3.2 Projet et thématique

Voici quelques exemples de projets sur lesquels les équipes du laboratoire sont engagés:

- Physique des particules: Frontière en énergie
  - L'expérience Atlas, au LHC (Cern), est l'un des deux détecteurs polyvalents du grand collisionneur de hadrons (LHC). Il étudie des domaines de physique très variés, de la recherche du boson de higgs, aux dimensions supplémentaires de l'espace-temps, en passant par les particules qui pourraient former la matière noire.



- L'expérience CDF pour "Collider Detector at Fermilab" met en jeux un accélérateur de particule, nommé le "Tevatron", faisant accélérer et se collisionner, des protons ainsi que des antiprotons. Il a pour but d'observer et de découvrir l'identité ainsi que les propriétés des particules qui compose l'univers, et de comprendre les interactions entre ces dernières. CDF est en particulier connue pour la découverte du "Quark Top" en 1994, confirmé par l'expérience "D0" l'année suivante.

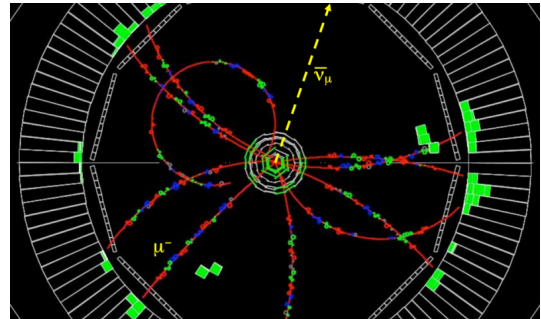
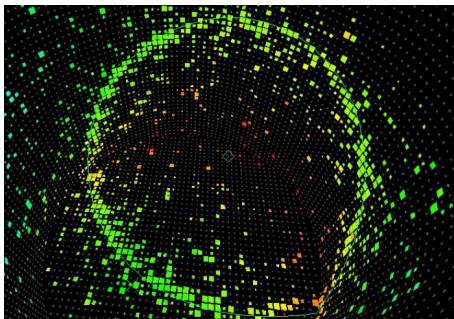




- Physique des saveurs:

- "T2K" pour Tokai to Kamioka est une expérience de physique des particules située au Japon, dans laquelle collaborent de nombreux pays. Il s'agit d'une expérience d'oscillation de neutrinos, mesurant un faisceau de neutrinos muoniques à courte (280 m) et longue distance (295 km). Le but principal de T2K est de mesurer l'oscillation des neutrinos muoniques en neutrinos électroniques afin de mesurer le dernier paramètre de la matrice "Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata" permettant d'expliquer l'oscillation de neutrinos prédite par Bruno Pontecorvo en 1957.

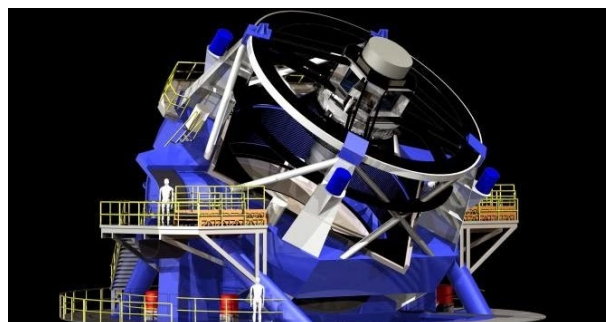
- "SLAC" ou "BABAR", est une expérience de physique des particules réalisée au Stanford Linear Accelerator Center. Elle est dédiée à l'étude de la physique des mésons B et de la violation de la symétrie CP dans leur désintégration faibles.



- Cosmologie:

La compréhension de la nature, de la matière et de l'énergie noires nécessite de mesurer les paramètres cosmologiques avec une précision de l'ordre du pourcent. Les moyens à mettre en œuvre pour atteindre cet objectif passent par l'échantillonnage de très grandes portions de l'univers visible. À cette fin, il faut non seulement pouvoir observer à grande distance, mais avec un dispositif à très grand champ.

Pour cela, le projet au sol "LSST", vise à l'observation répétée de l'ensemble du ciel visible, en s'affranchissant d'une partie des effets instrumentaux et atmosphériques. Il est basé sur un télescope au sol de 8.4 mètres de diamètre équipé d'une caméra de 3.2 milliard de pixels. L'ensemble, implanté au Chili, couvrira un champ de 9.6 degrés-carrés sur le ciel balayé à la cadence d'un champ toutes les 40 secondes. Chaque champ sera ainsi visité 1000 fois durant les 10 ans de prise de données du programme.



# Part II

## Projet "CHAMP"

# Chapter 4

## Présentation

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

De leur discussion est né un projet au travers du quel ils cherchent à élargir les possibilités de l'instrument en modifiant de manière originale sa mécanique. C'est en s'appuyant sur des techniques modernes qu'il souhaite proposer de nouveaux moyens d'expression aux artistes, tout en respectant le lien étroit qu'ils entretiennent avec leur instrument notamment au travers du toucher.

### 4.1 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 ajouta un système de répétition à la mécanique de Cristofori et inventa la mécanique moderne dite (improprement) à double échappement.

À 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, que peu avant 1890, l'essentiel de ce qui fait un piano moderne est accompli. À partir de cette date et à la suite d'une concentration industrielle de plus en plus forte, 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<sup>e</sup> siècle.

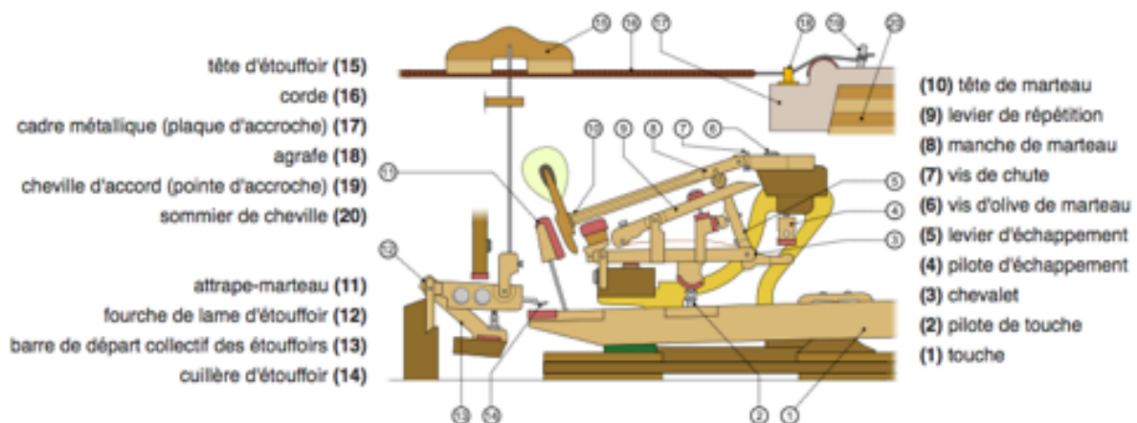
On peut légitimement se demander quelles sont les lacunes du Steinway d'aujourd'hui, joué par 95% des pianistes de la planète, qui justifieraient de bouleverser l'état actuel. De fait, nous ne souhaitons pas nous appuyer sur d'éventuelles lacunes du Steinway ou d'ailleurs de tout autre piano, nous voulons avant tout ouvrir de nouvelles pistes. Ceci en introduisant une

source extérieure d'énergie, totalement et délicatement pilotée par l'instrumentiste, nous allons libérer des contraintes auxquelles les pianos modernes, les Steinway en particulier, ont répondu de manière optimale, mais qu'ils ont malgré tout intégré.

## 4.2 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 indépendants 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 XIXe siècle (croisement des cordes, barrage,...). Ainsi en France, Stephen Paulello, le dernier facteur français de pianos de concert en activité, 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.

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.



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 le cas par exemple de la technologie "Disklavier™" mise au point par Yamaha. 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 McPherson<sup>6</sup> 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 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 artistes 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.

## 4.3 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, 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 :

- “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.
- “[...] 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, [...]”.
- “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 no 5, septembre 1993 Copyright © IRCAM.

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.

# Chapter 5

## Réalisation

### 5.1 Mécanique et Electronique

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 :



- 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  $200 \text{ m/s}^2$ ).
- Puissance : force en impulsion de l'ordre de 1kg ou 10N.
- encombrement faible: dimension de l'ordre de 1 cm(l) x 1 cm(p) x 5 cm(h).
- bruit, inexistant ou négligeable : 10-15 dB à moins de 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.

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.



## 5.2 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.

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.

## 5.3 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'éteuffoir 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.

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. Là encore l'expertise de Thomas Hélie nous permettra d'élaborer ces modèles de manière efficace et optimale.

# Part III

## Travaux menés

# Chapter 6

## La mesure de l'accélération

Comme nous l'avons vu lors de la précédente partie, la réalisation d'un système d'assistance et d'asservissement d'une mécanique de piano à queue induit l'appel à des technologies de "pointe"; technologie que nous retrouvons et côtoyons au quotidiens au travers de nos smart-phone, notamment celle nous permet de mesurer une accélération (technologie qui sera une composante principale de notre projet).

La mesure de l'accélération et la composante clef de notre projet étant données que ce seul élément rend possible la mesure de l'accélération (sur trois axes x,y,z) de la touche joué par le pianiste, ainsi que la mise en place de la boucle d'asservissement contrôlant les moteurs devant actionner les marteaux en cotons frappant les cordes.

### 6.1 Matériel utilisé

Pour ce projet, une première maquettes utilisant des composant électronique analogique fut réaliser, se basant sur le modèle de la figure (dernière figure). Ce prototype avait pour but montré la manière de procéder et de vérifier le postulat de départ quand à la faisabilité du projet.

Suite à mon arrivé au sein du projet "CHAMP", j'ai commencé le développement de la nouvelle maquette (tjs basé sur le même schéma de fonctionnement) qui est maintenant basé sur des composants électronique numérique.

Le capteur numérique utilisé et choisi par l'équipe qui initié le projet est l'accéléromètre ADXL355 du fabricant "ANALOG DEVICE". Ce composant nous permet de mesurer une accélération sur 3 axes (x,y,z) avec une précision de +/- 8 fois la force gravitationnelle.

Le module ADXL355 permet l'échange de données avec notre FPGA (unité de traitement et de calcule) via des transmissions série synchrones. Il peut ainsi communiquer soit en mode SPI, soit en mode I2C.

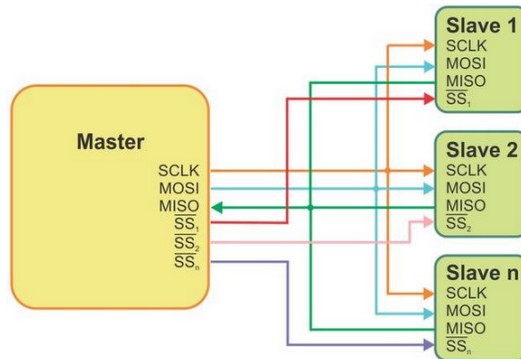
#### 6.1.1 Bus SPI

Une Liaison SPI (Serial Peripheral Interface) est un bus de données synchrone baptisé par Motorola, opérant en Full-Duplex et qui peut transférer des données sur de courtes distances à des vitesses élevées. Les circuits communiquent selon un schéma Maître/Esclave, où le maître s'occupe totalement de la communication. Plusieurs esclave peuvent coexister sur un même

bus, dans ce cas, la sélection du destinataire se fait par une ligne dédiée entre le maître et l'esclave appelée "Chip Select" (CS) ou Slave Select (SS).

## Principe de fonctionnement

Durant le transfert de données, le dispositif peut travailler soit en maître, soit en esclave. L'interface SPI permet de connecter un ou plusieurs esclaves à un seul maître via le même bus.



Le bus SPI utilise 4 signaux logiques :

Broche	Mode Maître	Mode esclave
MISO	Direction forcée : ENTREE	Direction définie par le bit 6 du registre DDRB
MOSI	Direction définie par le bit 5 du registre DDRB	Direction forcée : ENTREE
SCK	Direction définie par le bit 7 du registre DDRB	Direction forcée : ENTREE
/SS	Direction définie par le bit 4 du registre DDRB	Direction forcée : ENTREE

- SCLK (Serial Clock) : Le signal d'horloge, il est utilisé pour synchroniser les données échangées entre le maître et les esclaves. Cette ligne est nécessairement une sortie sur le maître et une entrée sur le ou les esclaves.
- MOSI (Master Output, Slave Input) : est utilisé pour transférer les données du maître vers l'esclave.
- MISO (Master Input, Slave Output) : est utilisé pour transférer les données l'esclave vers le maître.
- SS (Slave Select) : le maître utilise ce signal pour choisir avec qui il veut dialoguer. Ce signal est actif à l'état bas. Les esclaves ne peuvent pas communiquer entre eux. Seul le maître peut autoriser un esclave à dialoguer, cela dit l'esclave ne peut commencer le dialogue que s'il n'a pas l'autorisation.

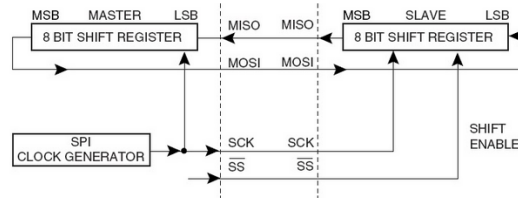
On parlera aussi de liaison à 3 fils : Permet de véhiculer l'information dans les 2 sens (bidirectionnelle), un fil différent étant dévolu à chaque sens de transfert d'information. Comme ceci permet la communication simultanée dans les 2 sens de transmission, on parlera de liaison full-duplex : pendant que le maître transmet des données sur la ligne MOSI, vers l'esclave sélectionné, il en reçoit de celui-ci par la ligne MISO.

## Principe de transmission

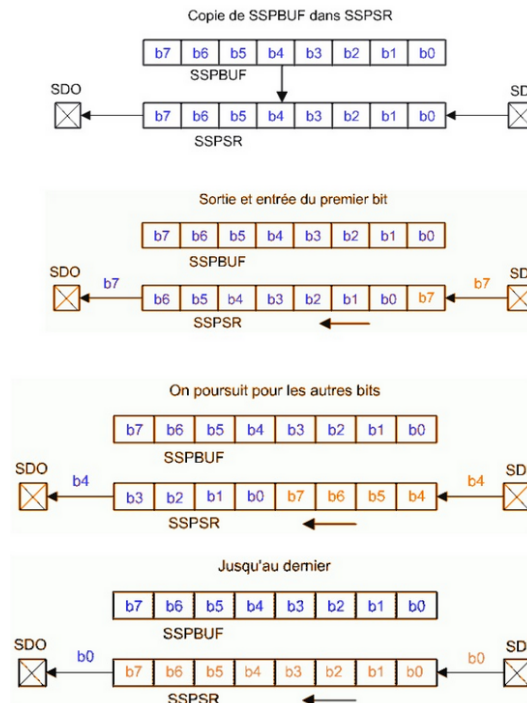
Une transmission SPI typique est une communication simultanée entre un maître et un esclave : Tout d'abord, Le maître initie la communication en sélectionnant l'esclave avec qui il veut communiquer par l'utilisation du signal SS qui est actif bas. Ensuite, Le maître et l'esclave

préparent les données à envoyer dans leur registres à décalage. Enfin, Le maître génère des impulsions d'horloge pour synchroniser les données échangées.

À chaque coup d'horloge le maître et l'esclave s'échangent un bit. Après huit coups d'horloges le maître a transmis un octet à l'esclave et vice versa. La vitesse de l'horloge est réglée selon des caractéristiques propres aux périphériques.



pendant que le maître transmet les données sur la ligne MOSI, vers l'esclave sélectionné, il en reçoit de celui-ci par la ligne MISO. Voici le tout sous forme de dessins. En rouge les bits reçus, en bleu les bits envoyés :



## Mode maitre

Lorsqu'il est configuré en tant que maître, l'interface SPI n'a aucun contrôle automatique de la ligne de SS. Pour la configuration en mode maître, nous devons déclarer : MOSI, SS et SCLK en sortie; MISO en entrée ; mettre le bit MSTR à 1 dans le registre SPCR. La mise de SS à l'état bas permet d'établir la communication avec l'esclave. le principe de transmission suit cette ordre :

Ecriture d'un octet dans le registre de données (SPDR). génération du signal d'horloge. envoie des données contenue dans le registre de données vers l'esclave via la ligne MOSI. arret du signal d'horloge. mise du bit SPIF = 1 (flag de fin de communication) Si SPIE = 1 (autorisation de l'interruption) : interruption demandée, 2 options : chargement de l'octet suivant dans le

registre mise de SS à l'état haut pour signaler la fin du paquet de données

Le dernier octet entrant sera conservés dans le registre tampon pour une utilisation ultérieure.

## Mode esclave

Pour la configuration en mode esclave, nous devons déclarer : MOSI, SS et SCLK en entrée; MISO en sortie ;Mettre le bit MSTR à 0 dans le registre SPCR. L'esclave reste en mode sommeil jusqu'à ce que le maître l'appelle(en mettant la ligne SS à l'état bas). La mise de SS à l'état bas permet d'établir la communication avec l'esclave. Le principe de transmission suit cette ordre :

sélection de l'esclave avec qui communiquer génération du signal d'horloge par le maître envoi des données contenue dans le registre des données vers l'esclave via la ligne MISO. mise du bit SPIF = 1 (flag de fin de communication) Si SPIE = 1 (autorisation de l'interruption) : interruption demandée chargement de l'octet suivant dans le registre

## Avantages

- Communication full-duplex.
- Vitesse assez importante par rapport à l'I2C (10-100Mbits/s).
- Partage d'un bus commun pour l'horloge, MISO et MOSI entre les périphériques.
- Simplicité de l'interface matérielle.
- Aucun arbitre nécessaire car aucune collision possible.
- Les esclaves utilisent l'horloge du maître et n'ont donc pas besoin d'oscillateur de précision.

## inconvénients

- Utilise plus de pattes d'un boîtier que l'I2C qui en utilise seulement 2 (et la masse).
- Aucun adressage possible : Il faut une ligne de sélection par esclave en mode non chaîné.
- Le protocole n'a pas d'acquittement. Le maître peut parler dans le vide sans le savoir.
- Il ne peut y avoir qu'un seul maître sur le bus.
- Ne s'utilise que sur de courtes distances contrairement aux liaisons RS-232, RS-485 ou bus CAN.

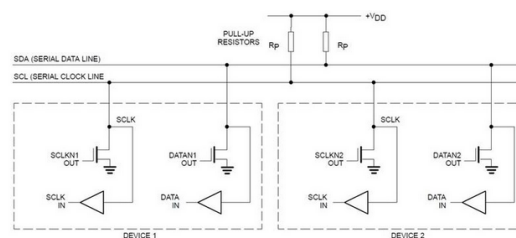
### 6.1.2 Bus I2C

Le bus I2C permet de faire communiquer entre eux des composants électroniques très divers grâce à seulement trois fils : un signal de données (SDA), un signal d'horloge (SCL), et un signal de référence électrique (masse). Il s'agit d'une liaison en mode série synchrone (un bit est transmis à chaque coup d'horloge). Le nombre de composants qu'il est ainsi possible de relier est essentiellement limité par la charge capacitive des lignes SDA et SCL : 400 pF. un circuit maître et un ou plusieurs circuits esclaves peuvent être connectés au bus. Les échanges

se font toujours à l'initiative du maître. La transmission est half duplex : mode écriture ou mode lecture, pas possible de manière simultanée.

## Connexion électrique

Comme indiqué précédemment, pour se connecter à un bus I2C il faut une masse, et deux fils de communication. Le premier fil, SDA (Signal DAta), est utilisé pour transmettre les données. L'autre fil, SCL (Signal CLock) est utilisé pour transmettre un signal d'horloge synchrone (signal qui indique le rythme d'évolution de la ligne SDA). Les tensions associées aux niveaux logiques vont dépendre de la technologie des circuits en présence (CMOS, TTL). Il faudra que tous les circuits connectés au bus I2C utilisent les mêmes potentiels pour définir les niveaux haut et bas. En définitive, cela implique que tous les composants connectés à un même bus soient alimentés de façon identique.



En ce qui concerne la lecture des signaux SDA et SCL, cela ne pose pas de problème. Les signaux peuvent être lus en permanence sans risque d'interférer sur le niveau de la ligne. Au repos, tous les circuits connectés doivent imposer un niveau haut sur leurs sorties respectives. Si les lignes SDA et SCL sont au niveau haut dans ces conditions, cela signifie qu'aucun circuit ne tente de prendre le contrôle du bus. Si une des lignes SDA ou SCL passe à un niveau bas dans les mêmes conditions, c'est qu'un des circuits désire prendre le contrôle du bus. Mais il peut aussi y avoir deux circuits qui tentent de prendre le contrôle du bus en même temps (ou à quelques nanosecondes d'écart près). Il faut donc mettre en place un protocole pour gérer les conflits possibles.

## Protocole I2C

Le protocole I2C présente différentes caractéristiques :

- maître-esclaves, car seul un nœud maître peut communiquer avec les esclaves du réseau (1 ou tous)
- multi-maitres, car plusieurs maitres peuvent être présents sur le réseau
- synchrone, car on utilise un mécanisme de requête/réponse
- half-duplex, car on peut communiquer dans les deux sens, mais pas simultanément

On utilise un adressage sur 7 bits pour identifier les nœuds, ce qui permet (en théorie) jusqu'à 128 nœuds sur le réseau. Certaines adresses sont réservées pour le broadcast (communiquer vers tous les nœuds en même temps). En pratique, les constructeurs ont tendance à fixer l'adresse de certains nœuds, ce qui peut causer des collisions.



### Avantages

- Utilise seulement 2 lignes (+ le fil de masse) et simplicité de connexion (uniquement deux résistances de pull-up à rajouter)
- Le protocole limite automatiquement la vitesse de transmission à la vitesse de l'élément le plus lent.
- Le bit de reconnaissance qui permet de savoir si l'esclave est bien connecté et également si les données ont été correctement transmises ou non.
- Interconnexions de multiples périphériques

### Inconvénients

- Impossibilité d'utiliser un mode full-duplex
- Vitesse relativement lente pour la plupart des périphériques esclaves (100 à 400kbits/s)
- Consommation relativement élevée due à la configuration en collecteur/drain ouvert
- Distance de communication limitée car les lignes du bus ne sont pas protégées des perturbations et envoient des fronts montants et descendants. Cette distance est donc limitée par la vitesse de communication, les résistances de pull-up, la capacité du bus (en général, autour des 400pF).

## 6.2 Contrainte et choix de réalisation

Concernant les contraintes techniques devant c

# Part IV

## Bibliographie

Descriptif global du projet: BHLS-CNRS-UPMC-LPNHE-IRCAM.pdf