



HAL
open science

Analyse comparative informée de toucher et de sonorité de pianos

Antonio Somma, Jeanne Roudet, Benoît Fabre

► **To cite this version:**

Antonio Somma, Jeanne Roudet, Benoît Fabre. Analyse comparative informée de toucher et de sonorité de pianos. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848009

HAL Id: hal-03848009

<https://hal.science/hal-03848009>

Submitted on 10 Nov 2022

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

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



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Analyse comparative informée de toucher et de sonorité de pianos

A. Somma ^{a, c}, J. Roudet ^b, B. Fabre ^c

^a Sorbonne Université, Institut Collegium Musicæ, Paris, France

^b Sorbonne Université, Faculté de Lettres, UFR Musique et Musicologie, Paris, France

^c Sorbonne Université, CNRS, Institut d'Alembert UMR 7190, LAM, Paris, France



Dans le cadre du Collegium Musicæ de Sorbonne Université, les liens entre recherches en musicologie et en acoustique sur les instruments de musique se développent depuis plusieurs années. Partant de méthodes de recherche très contrastées, ces différentes disciplines se retrouvent autour de la pratique musicale et de l'étude de la performance musicale. En impliquant l'instrumentiste dans les travaux, l'acoustique musicale devient une acoustique de l'interprétation musicale, dont l'objet d'études est non pas l'instrument de musique mais le complexe instrumentiste-instrument. La mise en contexte de jeu, dans ses démarches, de l'instrument de musique permet d'y intégrer les traits saillants que la communauté musicale utilise pour en comprendre la nature. Deuxièmement, elle permet de mettre en question, à partir de la technique de jeu, la manière dont l'instrument peut être sollicité lors des mesures acoustiques et mécaniques. Une telle démarche a été proposée pour l'analyse comparative de deux instruments appartenant à la famille du piano : un piano à queue moderne et le *facsimile* contemporain d'un pianoforte historique, s'inscrivant dans la facture viennoise du début du XIX^e siècle. Les enjeux de reconstitution de l'esthétique et de la technique de jeu pour ce genre d'instruments ont été une étape cruciale du développement des pratiques dites « historiquement informées » au piano. L'étude d'un outil d'excitation et de mesure pour enfoncer les touches des deux pianos a permis de mettre en cause son usage vis-à-vis des différentes techniques de jeu, ce qui peut offrir une direction pour la mise en lien entre spécificités de facture et de jeu.

1 Introduction

Les musiciens et les musiciennes ayant une pratique d'interprétation dite « historiquement informée » (de l'anglais, *historically informed performance*) façonnent leur activité musicale à partir de l'idée de reconstruire l'esthétique et la technique de jeu de l'époque d'origine des musiques qu'ils ou elles interprètent. À cette fin, l'activité musicale s'accompagne souvent d'un examen, voire d'une véritable étude musicologique ([1, 2]), de sources textuelles, iconographiques et sonores – si elles existent – historiques, pouvant suggérer les éléments de cette reconstruction.

L'étude organologique, la remise en état de jeu et la reproduction des instruments d'époque ont joué et jouent encore, dans le cadre de ces pratiques, un indispensable rôle partenaire. D'une part, elles offrent aux musiciens et aux musiciennes la « boîte à outils » de leur recherche artistique. De l'autre, de cette recherche se nourrit l'expertise de facture instrumentale, qui a pour ambition de fournir à la communauté musicale des instruments qui secondent l'imagination artistique de ses membres. Pour autant, les bornes de ce dialogue *de facto* entre les différentes communautés opérant autour des instruments historiques – artistes, organologues, facteurs d'instruments – restent floues, le rôle de l'une dans les transformations au sein des autres n'étant pas toujours éclairci.

Dès le *revival* des *pianoforte*, à partir des années 80, les pianistes engagés dans cette démarche ont produit, à l'issue de leur recherche artistique, une vaste littérature de témoignages de leur découverte ([3]). Ces artistes ont mis l'accent sur l'importance de réviser la manière d'interpréter le répertoire, à la lumière des spécificités de jeu au *pianoforte*. Cependant, cette spécificité de jeu est censée, au dire de certains d'eux, résulter spontanément des possibilités sonores « intrinsèques », pour ainsi dire, aux instruments. Cette idée et les conclusions biaisées qui pourraient en résulter, ne tiennent pas compte du fait que l'expertise de facture et de restauration des instruments, et les instruments eux-mêmes, ont beaucoup évolué depuis, et nous met d'ailleurs face à l'enjeu insurmontable de reconstitution fidèle des instruments anciens, dont la « sonorité d'origine »,

pour autant qu'elle existe, est inévitablement perdue.

Dans le cadre de l'acoustique musicale, l'étude des descripteurs sonores pouvant discriminer les sonorités de différents instruments historiques de facture viennoise, différences émergées lors de tests d'écoute d'échantillons sonores, a été abordée dans [4]. Par ailleurs, les pianistes historiquement informés sont à même, en jouant les instruments historiques, de les évaluer et d'en décrire les traits saillants. Cette description repose véritablement sur le jeu, ses termes émergeant des relations au sein du couple instrumentiste-instrument. Tout cela nous suggère une approche transdisciplinaire de l'étude de la sonorité de ces instruments, intégrant le ressenti des pianistes. Cette intégration s'exprime sur deux volets : tout d'abord, les termes de l'évaluation des instruments de musique sont définis à partir de la pratique musicale. Deuxièmement, la manière de les solliciter lors des mesures doit se confronter à celles existantes au sein du complexe de la technique de jeu.

Une telle approche, dans le cas du piano, nous oblige à étudier sa sonorité en lien avec le comportement mécanique de son clavier, la véritable interface entre l'instrumentiste et l'instrument. Sur ce sujet, une littérature très riche existe, surtout pour le piano moderne ([5]) mais aussi pour les *pianoforte* de facture viennoise ([6]), visant à en établir des modèles physiques très détaillés. Dans [7] une telle démarche de modélisation est proposée, développée à partir de la notion d'impédance mécanique de la touche observée sur son devant : celle qui, pour ainsi dire, est « ressentie » par le pianiste, qui à son tour y oppose l'impédance mécanique caractéristique des segments du membre supérieur impliqués dans le jeu. En tous cas, les études existantes ne mettent généralement pas en valeur la comparaison de la sollicitation lors des mesures avec des conditions de jeu pianistique réelles. Dans [7] la comparaison se fait par exemple avec le seul doigt, alors qu'un pianiste peut impliquer plusieurs segments du membre supérieur, allant des phalanges jusqu'aux épaules. Les effets des différents types d'excitations sur le son produit, quant à eux, ne sont pas du tout abordés.

Cette étude vise à préparer une démarche pour retracer les spécificités d'un *pianoforte* historique, en faisant le lien

entre le son rayonné par l'instrument et la manière dont il est sollicité par l'outil expérimental choisi. Le questionnement du comportement de ce dernier, par rapport au membre supérieur d'un pianiste, peut offrir une porte d'entrée vers l'établissement de relations mesurables entre les caractéristiques mécaniques et acoustiques des instruments et la manière de les jouer.

Dans la Section 2 nous présentons les instruments qui ont fait l'objet de l'étude, en mentionnant leur usage dans le cadre des pratiques musicales contemporaines. L'outil expérimental d'excitation et mesure introduit y est présenté : le « bras mécanique », dont l'action repose sur la pesanteur. Un modèle de la dynamique de l'enfoncement de touches de piano par ce dernier est fourni, pouvant en illustrer le comportement. Dans la Section 3 les mesures obtenues avec cet outil, autant de forces d'enfoncement que d'intensité sonore des échantillons acquis par excitations contrôlées, sont montrées. Finalement, dans la Section 4 nous évaluons la validité de l'usage du bras mécanique, vis-à-vis de la manière dont les touches sont enfoncées par le membre supérieur humain. Cette comparaison permet d'ailleurs d'illustrer les conséquences sur les deux pianos d'un enfoncement, appliqué par le membre supérieur humain, qualitativement comparable avec ce qui est fait par le bras mécanique. Il s'agit d'un mouvement prescrit dans le cadre des méthodes, dès la fin du XIX^e siècle, préconisant la « technique de la pesanteur ».

2 Objet de l'étude

2.1 Les instruments comparés vis-à-vis de la pratique de jeu

Le piano à queue de facture japonaise KAWAI (RX-2, 1995), dans la Figure 1a, constitue un exemple des instruments dont la pratique instrumentale pianistique contemporaine, de niveau semi-professionnel et professionnel, fait usage dans le monde entier. D'autre part, le *pianoforte* Walter-McNulty (Figure 1b) est le *facsimile* de 2015 d'un instrument tel qu'il aurait pu être fabriqué dans l'atelier du facteur Anton Walter, à Vienne, autour de 1805. Ce modèle d'instrument a été reproduit maintes fois et il est très souvent mis à disposition des classes d'interprétation historiquement informée par les écoles de musique à travers le monde. Un examen des paramètres de facture de ces instruments si distants semble nous dire que leur conception traduit des intentions de facture sonore divergentes, voire antagonistes.

C'est à leur énorme distance, en termes de facture, donc d'esthétique et de jeu, que les pionniers et les pionnières des interprétations historiquement informées au piano se sont premièrement confrontés. D'une part, ils ont témoigné des difficultés de premier ordre qui s'imposent à un pianiste moderne jouant un *pianoforte* qui s'inscrit dans le cadre de la facture viennoise, à cheval entre les XVIII^e et XIX^e siècles. De l'autre, la pratique sur ces instruments a offert l'occasion de décortiquer l'esthétique sonore, donc musicale, dont, à

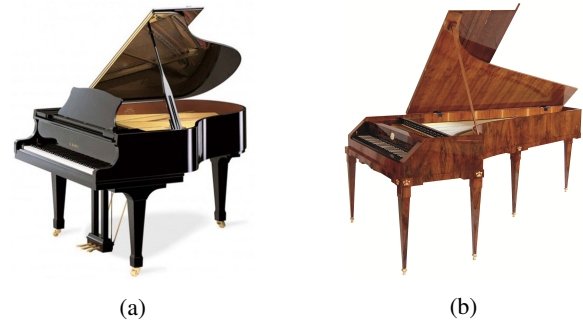


FIGURE 1 – (a) piano à queue KAWAI RX-2, 1995, (b) *pianoforte* Walter-McNulty (ca. 1805-2015).

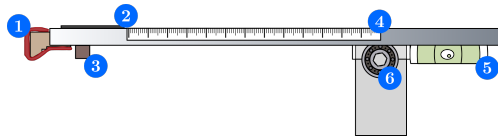
leur dire, ils sont porteurs.

L'examen critique de ces témoignages a montré qu'il existe un consensus unanime parmi les pianistes sur le fait que la première difficulté, lors du passage d'un piano moderne au *pianoforte* viennois, c'est que ce dernier demande beaucoup plus de « légèreté » de toucher. Cette sensation est couramment mise en lien, même de la part des pianistes, avec le constat que la mécanique du *pianoforte* de facture viennoise pèse normalement beaucoup moins que celle d'un piano moderne.

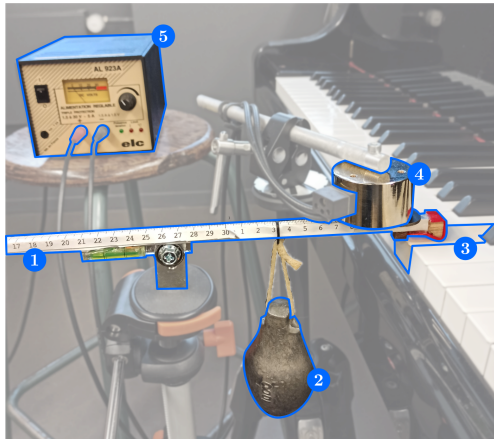
La notion de légèreté, qui renvoie à celle de poids, voire de force demandée pour enfoncer la touche, sollicite la définition d'un paramètre pouvant la refléter de manière quantitative. Un protocole d'excitation de la touche, contrôlable et répétable, et capable de mesurer la force d'enfoncement, doit être défini. Pour cela, nous avons réalisé un « bras mécanique », délibérément très simple, afin de garder un esprit de dialogue permanent avec les musiciens et questionner ainsi sa légitimité à exciter la touche d'un piano. Le bras mécanique est un levier à poids réglable, perfectionné à partir de celui mentionné initialement dans [8] dans l'esprit d'une balance romaine. Cet outil permet d'appliquer une force connue à la surface sur laquelle son 'doigt' est posé (Figure 2a). Il est pourvu d'un système de déclenchement électromagnétique, qui permet de contrôler les conditions initiales de sa rotation. Le bras mécanique est initialement positionné, par exemple, en contact avec la touche mais sans enfoncement (Figure 2b), maintenu dans cette position par un électroaimant. L'enfoncement de la touche est alors déclenché par l'arrêt d'un générateur de courant continu.

2.2 Un modèle dynamique du système bras mécanique-touche

La force motrice, fournissant le travail d'enfoncement de la touche, est donnée par la pesanteur due aux masses de la tige, de longueur L_b , ainsi que du poids de charge, de masse M , suspendu le long de la tige, de masse m_b , à une distance l de son centre de rotation O_b (Figure 3). À l'équilibre mécanique, avec le bras mis à l'horizontale, cette



(a) – (1) Doigt feutré (2) Surface d’attelage au système électro-magnétique de déclenchement (3) Butée au devant de la touche (4) Tige graduée (5) Niveau à bulle (6) Pivot par roulement à billes.



(b) – (1) Bras mécanique (2) Poids de charge à position variable (3) Touche de piano (4) Électroaimant (5) Générateur de courant continu.

FIGURE 2 – (a) Représentation du bras mécanique. (b) Le bras mécanique, prêt à exciter la touche C_4 du piano KAWAI.

force a l’expression :

$$f_b + F \equiv f_b + Mg \frac{l}{L_b}, \quad (1)$$

où f_b est la force en l’absence de poids de charge et g l’accélération de la pesanteur. Pour autant, l’expression de la force de contact entre le bras mécanique et la touche, lorsqu’ils sont en mouvement, dépend des propriétés inertielles et dynamiques des deux systèmes. Nous proposons un modèle rudimentaire de la dynamique de ce système, qui a pour but d’explicitier ses différents régimes de fonctionnement.

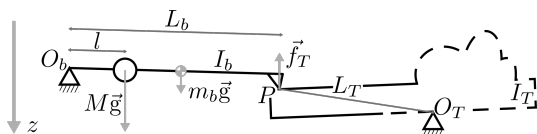


FIGURE 3 – Illustration du modèle proposé pour décrire la dynamique du système bras mécanique-touche lors de l’enfoncement.

Pour le bras mécanique, la distribution de masse du poids de charge est réduite à une particule ponctuelle de masse M , appuyée à une distance l le long de la tige, qui est supposée rigide et dont les longueurs transversales sont négligées devant celles longitudinales. Cela donne une expression

assez simple du moment d’inertie du bras mécanique par rapport à l’axe perpendiculaire au plan de la Figure 3 et passant par le pivot de rotation O_b :

$$I_b + Ml^2 = I_b + \frac{F^2}{Mg^2} L_b^2, \quad (2)$$

I_b étant le moment d’inertie du bras mécanique par rapport au même axe en l’absence de poids de charge.

Quant à la touche, nous supposons qu’il est possible de la décrire comme un corps rigide, en rotation avec un degré de liberté autour de son pivot O_T , à une distance L_T du point de contact P . Son moment d’inertie par rapport à l’axe perpendiculaire au plan de la Figure 3 et passant par le pivot de rotation est supposé constant et vaut I_T .¹ Finalement, le comportement dynamique du système est décrit pour des petits angles de rotation, et les deux sous-systèmes sont supposés toujours en contact au point P , tout en négligeant les frottements et le rebondissement.

L’accélération du point P sur la verticale prend ainsi la forme :

$$\ddot{z}_P(F) = \frac{F - (f_T - f_b)}{\frac{F^2}{Mg^2} + \left(\frac{I_T}{L_T^2} + \frac{I_b}{L_b^2} \right)}, \quad (3)$$

où f_T est la force en P venant de la somme des moments des forces qui résistent à l’enfoncement. Nous supposons que $F > f_T - f_b$. Cette expression nous montre, d’une part, que l’accélération est proportionnelle à la différence des forces sur la verticale agissant sur P et, de l’autre, que l’excès d’inertie de rotation F^2/Mg^2 , dû à la masse du poids de charge M , contribue à s’y opposer. Il est aussi visible que $\ddot{z}_P < \ddot{z}_{max} \equiv gL_b/l$.

Pour une estimation des ordres de grandeurs impliquées par les diverses contributions à l’inertie de rotation, nous négligeons celle de la tige du bras mécanique. L’inertie de rotation de cette composante est de l’ordre des dizaines de grammes, sa masse étant $m_b = 66$ g et sa longueur $L_b = 43.9$ cm, devant l’inertie de rotation de la touche I_T/L_T^2 , qui, pour un piano moderne, a été estimée, dans [7], comme de l’ordre d’une ou deux centaines de grammes.

Deux régimes de fonctionnement peuvent être observés. Si l’excès d’inertie de rotation due au poids de charge est négligeable par rapport à l’inertie de rotation de la touche, la force F agit comme une force motrice externe, et l’accélération $\ddot{z}_P(F)$ y est directement proportionnelle. Si, au contraire, cet excès est nettement prépondérant, le système entre dans un régime qu’on peut appeler « inertiel », où l’accélération est obtenue par l’approximation suivante :

$$\ddot{z}_P(F) \approx \ddot{z}_{max} \left(1 - \frac{f_T - f_b}{F} \right) \quad (4)$$

qui atteint effectivement \ddot{z}_{max} lorsque $f_T - f_b$ est négligeable devant F . Comme \ddot{z}_{max} ne dépend pas de la masse du poids de charge M , le système, est, dans ce cas, contrôlé en déplacement, son accélération étant directement déterminée par le choix de la longueur l .

1. Une estimation de l’impédance de la touche ainsi « linéarisée » a été d’ailleurs obtenue dans [7], pour des conditions expérimentales comparables avec notre modèle, mentionnées dans l’introduction.

3 Mesures et résultats

3.1 Force minimum d'enfoncement

Nous avons initialement élaboré un protocole expérimental pour la mesure de la force minimum d'enfoncement $F^{(0)}$, définie comme la force, appliquée par le bras mécanique sur l'extrémité d'une touche, qui permet de produire *a minima* un son ([9]). La force minimum d'enfoncement est donnée en grammes, conformément à la tradition d'exprimer ainsi le « poids des touches », une autre grandeur qui, elle, correspond à la masse nécessaire pour abaisser la touche d'un piano de quelques millimètres par rapport à la position de repos, et qui est mesurée dans le cadre des opérations de réglage.

Cette mesure nous permet de saisir l'ordre de grandeur des forces d'enfoncement le long des claviers des deux pianos. La force $F^{(0)}$ de chaque note concernée a été mesurée avec les étouffoirs alternativement mis et relevés. Les résultats, affichés dans la Figure 4, montrent que les deux instruments demandent des forces assez différentes pour être joués. Nous remarquons que les résultats obtenus sont comparables avec ceux dans [9].

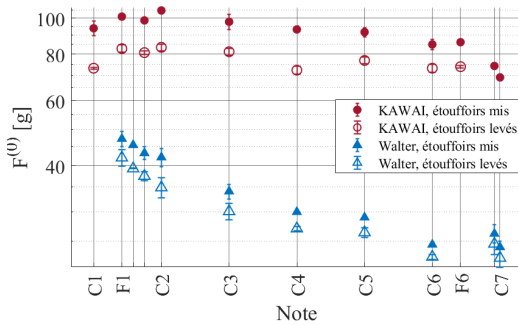


FIGURE 4 – Force minimum d'enfoncement pour des notes prises le long du clavier du piano KAWAI et du *pianoforte* Walter-McNulty. Les mesures ont été réalisées avec les étouffoirs alternativement mis et relevés. Chaque mesure a été répétée de trois à cinq fois et les barres d'erreur indiquent l'écart quadratique moyen des mesures répétées.

3.2 Niveau sonore et sonie

Des échantillons sonores ont été acquis par un enregistrement *stereo*, à une fréquence d'échantillonnage $f_s = 48\,000$ Hz, avec les microphones positionnés à une hauteur et à une distance du clavier compatibles avec la position de la tête d'un pianiste. Trois notes représentatives des registres bas (C_2), moyen (A_4) et aigu (F_6) étaient concernées, ainsi que des valeurs de force d'enfoncement $F_{nk}^{(i)} = iF_{nk}^{(0)}$, avec $i = 2, 4, 8, 16, 20, 24$, n indiquant les trois différentes notes et k les deux pianos. Les configurations du bras mécanique permettant d'obtenir une certaine valeur de force d'enfoncement ont été choisies selon un critère de minimisation du poids de charge à appliquer. Lors des enregistrements sonores les étouffoirs étaient toujours

relevés.

Les signaux sonores enregistrés ont été analysés dans le but d'obtenir une estimation des pics de niveau sonore, L_{max} , et de sonie, S_{max} . Le premier est estimé à partir de l'enveloppe du signal, $e[n]$, obtenue par fenêtrage rectangulaire, de durée $T = 50$ ms, et moyennage du carré de la pression acoustique du signal échantillonné, $p[n]$:

$$e^2[n] \equiv \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} p^2[m]w[n-m],$$

avec $w[m]$, la fenêtre rectangulaire, qui vaut 1 pour $|m/f_s| < T$ et zéro ailleurs. L_{max} est le maximum de $e[n]$, exprimé en decibel par rapport à la référence de $20 \mu\text{Pa}$:

$$L_{max} \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{\max \{e[n]\}}{20 \mu\text{Pa}} \right).$$

S_{max} , exprimé en sone, est le maximum de la sonie à long terme du signal, estimée par la méthode de Zwicker pour des signaux variables dans le temps, selon la norme ISO 532-1:2017(E) ([10]).

Les courbes obtenues pour chaque note, en variant le facteur de force, sont affichées en Figure 5. Le piano moderne produit des sons plus intenses, à égalité de facteur de force d'enfoncement. Pour certaines configurations du bras mécanique et pour certaines notes, L_{max} et S_{max} présentent une allure non monotone. Cet effet est particulièrement évident pour la note A_4 du piano moderne KAWAI, pour laquelle nous observons le passage par un maximum global, puis une décroissance. Nous assumons, d'une part, que toute l'énergie mécanique transmise par le bras mécanique à la touche se traduit en énergie cinétique du marteau avant le contact avec la corde, et que, deuxièmement, l'intensité sonore croît de manière monotone avec la vitesse du marteau. Sous ces hypothèses, l'allure de la courbe s'explique par la transition de la dynamique du système bras mécanique-touche, pour des forces de sollicitation qui sont très hautes par rapport à la force minimum d'enfoncement, vers le régime inertiel (Éq. 3). Pour la même note, le *pianoforte* Walter-McNulty ne présente pas la même allure. Les forces nécessaires pour maintenir un même facteur de force mènent donc à l'utilisation du bras mécanique en régime inertiel uniquement pour jouer le KAWAI, pas le Walter-McNulty.

4 Discussion

L'action, dont le membre supérieur humain est capable, ne peut pas généralement être reproduite par le bras mécanique. Tout d'abord, ce dernier ne peut que délivrer de l'énergie à partir de la gravité, en appliquant la force définie par l'Éq. 1. À l'opposé, les rotations, autour des articulations proximales respectives, des segments du membre supérieur humain impliqués dans le jeu pianistique (le bras, l'avant-bras, la main et les phalanges de chaque doigt), sont gérées par les contractions de multiples faisceaux musculaires. Ces derniers peuvent jouer en effet le double rôle de support

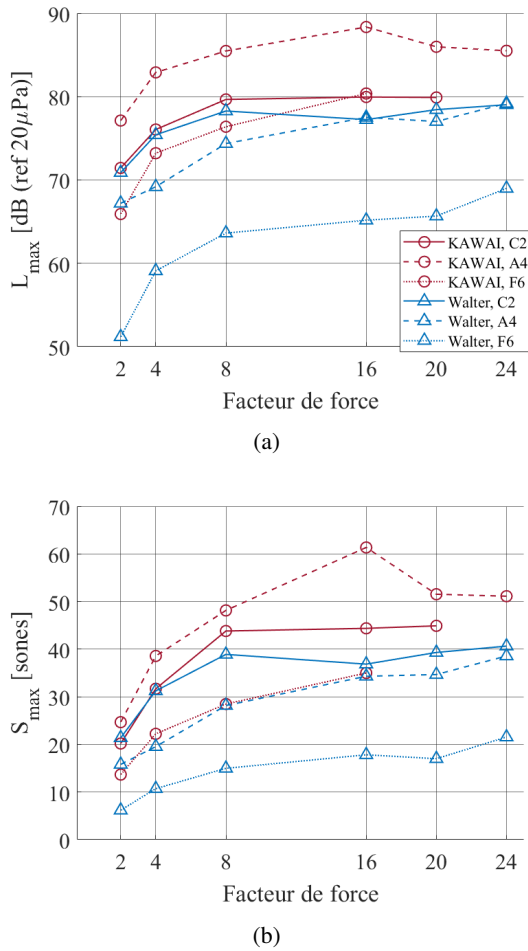


FIGURE 5 – (a) Pic de niveau sonore, L_{max} et (b) pic de sonie à long terme, S_{max} , pour des échantillons sonores des trois notes C_2 , A_4 et F_6 , pour le piano KAWAI et pour le *pianoforte* Walter-McNulty, en fonction des facteurs de force par rapport aux différentes force d'enfoncement minimum $F^{(0)}$.

des segments du membre supérieur, en résistant à leurs inerties, ainsi que de moteurs, pouvant produire du travail mécanique. Deuxièmement, l'inertie de rotation du bras mécanique diminue, selon l'Éq. 2, avec la force motrice, qui est purement due à la pesanteur du poids de charge. Le membre supérieur humain n'a pas cette propriété, son inertie de rotation se modifiant à partir du nombre et de la configuration géométrique des segments qui sont impliqués cas par cas dans la rotation.

Pour autant, la notion de jeu à travers l'inertie du bras, ou « technique de la pesanteur », a fait l'objet, entre les XIX^e et XX^e siècles, de méthodes qui ont reçu depuis un accueil favorable – voire une vive critique – de la part d'un grand nombre d'écoles pianistiques modernes. Un travail qui fait autorité peut être trouvé dans les publications de Breithaupt (1873-1945) ([11]). Dans sa théorie, Breithaupt attribue au travail du seul poids des segments du membre supérieur, ses muscles étant complètement détendus, le rôle d'enfoncer

les touches du piano. Le maximum de dynamique sonore de l'instrument serait obtenu lorsque la touche est enfoncée avec tout le poids du membre supérieur transmis sur le doigt. La contraction musculaire jouerait ainsi un rôle marginal, en appliquant, au fur et à mesure d'une réduction progressive de volume sonore, des forces qui résistent progressivement à la gravité. La détente des muscles du bras est obtenue par l'exercice de la sensation du « transfert de poids » du bras et de l'avant-bras sur les doigts appuyées sur les touches, telles que des piliers qui, avec l'épaule, en supportent la masse.

La Figure 6 montre une représentation du bras dans une configuration qui favoriserait la sensation de « transfert de poids » du bras et de l'avant-bras sur la main. La rotation se fait ici à un degré de liberté autour de l'épaule. À partir de [12] nous avons estimé, dans la configuration montrée dans la Figure 6, les propriétés géométriques et inertielles du membre supérieur (de masse estimée $M_B \approx 4.3$ kg) d'un des auteurs (de taille 187 cm et de poids 75 kg).

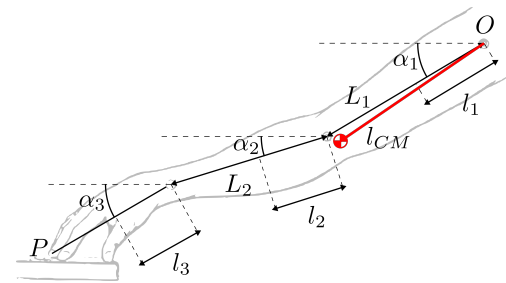


FIGURE 6 – Schéma géométrique de la configuration du membre supérieur humain affichée dans [11, p. 21] de la traduction anglaise.

Ensuite, nous supposons, en ligne avec une application radicale de la technique de la pesanteur, que la force motrice maximum d'enfoncement d'une touche est due aux forces de gravité du bras, de l'avant-bras et de la main. Dans ce cas, la force appliquée à l'extrémité de la touche (Éq. 1) vaut $F_B \approx 17$ N et l'accélération est limitée par la valeur suivante :

$$\ddot{z} < \frac{\overline{OP}}{l_{CM}} g \approx 2.4 g.$$

De plus, il est possible d'estimer le moment d'inertie de ce système, $I_B^{(O)}$, autour de l'axe perpendiculaire au plan de la Figure 6, passant par le centre de rotation O . Cela donne la valeur de l'inertie de rotation :

$$\frac{I_B^{(O)}}{\overline{OP}^2} \approx 1.12 \text{ kg.}$$

Cette valeur est plus que six fois l'inertie de rotation du prototype de touche de piano moderne, estimée à 0.1865 kg dans [7]. Un excès d'inertie de rotation si grand, d'après les préceptes de Breithaupt, serait censé produire le maximum de volume sonore possible. Pour autant, il aurait l'effet de réduire l'accélération de la touche qu'on pourrait obtenir si une force du même ordre venait plutôt de la contraction musculaire, et si les segments du membre supérieur fussent

au contraire configurés de sorte à minimiser l'inertie de rotation.

Les mesures du poids minimum d'enfoncement des touches des claviers du *pianoforte* Walter-McNulty et du piano KAWAI (Figure 4) reflètent la notion de légèreté qui, selon les pianistes, caractériserait le premier par rapport au deuxième. Elles nous laissent aussi conjecturer que les inerties de rotation des touches du *pianoforte* sont inférieures, dans une proportion comparable, à celles du piano moderne. Par ailleurs, les courbes mesurées de maximum de niveau sonore et de sonie à long terme pour le Walter-McNulty (Figure 5), obtenues par des forces généralement réduites, présentent une allure qui est encore compatible avec un régime de proportionnalité entre force d'enfoncement et accélération de la touche. Cependant, le maintien de ce régime est possible parce que le moment d'inertie du bras se réduit en accord (Éq. 2), ce qui n'est pas le cas pour le membre supérieur humain. Tout cela nous suggère qu'une application sur ces instruments de la technique de la pesanteur, telle que proposée par Breithaupt, où la réduction de la force d'enfoncement se ferait uniquement par contraction musculaire en résistance à la gravité, est encore plus remise en cause que dans le cas du piano moderne.

5 Conclusion et perspectives

Un système appelé « bras mécanique » a été réalisé pour l'enfoncement de touches à partir de forces dues à la masse d'un poids de charge suspendu. Cet outil a été utilisé pour exciter les touches d'un piano moderne et d'un *pianoforte*. Un simple modèle dynamique du système bras mécanique-touche montre que l'équilibre entre les inerties de rotation des deux sous-systèmes engendre différents régimes de fonctionnement. L'usage de ce système est donc analysé en rapport à la technique pianistique. La comparaison peut se faire sur le terrain des méthodes faisant appel à la « technique de la pesanteur », visant à maximiser la détente musculaire et à profiter de la pesanteur des segments du membre supérieur humain pour jouer l'instrument. Les ordres de grandeur de la force et de l'inertie de rotation d'un membre supérieur humain ont été comparées avec ceux des touches des deux pianos. Ils nous offrent un éclairage sur les différences entre la technique de jeu d'un pianiste moderne et celle d'un pianiste historiquement informé qui joue un *pianoforte* du type analysé dans cette étude. En effet, les pionniers de ces pratiques ont bientôt découvert l'importance, à l'opposé de la « technique de la pesanteur », de réintégrer les efforts musculaires, notamment au niveau de la main et des doigts ([13, p. 479]).

Par la suite, des mesures directes des inerties de rotation et des résistances à l'enfoncement, pour les claviers des deux instruments, permettront d'observer ce qui dans cet article a resté au niveau de conjecture. En particulier, il sera possible d'évaluer les différents régimes de fonctionnement dont ils sont susceptibles, en fonction de la force d'enfoncement et de l'inertie de l'excitateur. Une étude critique des sources

historiques et des méthodes de technique pianistique, faisant appel à la technique de la pesanteur, pourra aussi mettre en perspective son usage dans le cadre de la pratique pianistique et ses conséquences sur le lien entre forces, inerties et niveau sonore. Un nouvel outil d'excitation des touches devrait alors être envisagé, qui permette de découpler force motrice et inertie de l'excitateur.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Laurent Quartier, pour son aide précieuse à la mise en place des expériences.

Références

- [1] T. Beghin, Three Builders, Two Pianos, One Pianist: The Told and Untold Story of Ignaz Moscheles's Concert on 15 December 1823, *19th-Century Music* **24**:2, 115-148 (2000).
- [2] E. Torbianelli, Le jeu et la pédagogie de Liszt dans le Paris des années 1830 et leur rapport avec les traditions pianistiques contemporaines, *Musikforschung der Hochschule der Künste Bern* **11**, 86-110 (2018).
- [3] *Early Music*, The Early Piano I, **12**:4 (nov. 1984); The Early Piano II, **13**:1 (fév. 1985); Performing Mozart's Music III, **20**:2 (mai 1992).
- [4] A. Chaigne, A. Osses et A. Kohlrausch, Similarity of piano tones: A psychoacoustical and sound analysis study, *Applied Acoustics* **149**, 46-58 (2019).
- [5] A. Thorin, X. Boutillon, J. Lozada et X. Merlihot, Non-smooth dynamics for an efficient simulation of the grand piano action, *Meccanica*, 1-18 (2017).
- [6] B. Bokiau, A. Ceulemans et P. Fisette, Historical and dynamical study of piano actions: A multibody modelling approach, *Journal of Cultural Heritage* **27**, S120-S130 (2017).
- [7] R. Brent Gillespie, B. Yu, R. Grijalva, S. Awtar et al., Characterizing the Feel of the Piano Action, *Computer Music Journal* **35**:1, 43-57 (2011).
- [8] E. Leipp, Les mesures physiques et leur signification, *Bulletin du groupe d'acoustique musicale – Colloque sur le piano* **30**, 1-15 (1967).
- [9] K. Mobbs, A Performer's Comparative Study of Touchweight, Key-Dip, Keyboard Design and Repetition in Early Grand Pianos, c. 1770 to 1850, *The Galpin Society Journal*, **54**, 16-44 (2001).
- [10] ISO 532-1:2017(E). Acoustics – Methods for calculating loudness – Part 1: Zwicker method. *International Organization for Standardization*.
- [11] R. M. Breithaupt, *Die natürliche Klaviertechnik. Vol. 2: Die Grundlagen des Gewichtsspieles*, CF Kahnt Nachfolger, Leipzig (1909). Tr. anglaise : *Natural Piano-Technic vol. II: School of Weight-Touch*, CF Kahnt Nachfolger, Leipzig (1909).
- [12] S. Plagenhoef, F. G. Evans et T. Abdelnour, Anatomical Data for Analyzing Human Motion, *Research Quarterly for Exercise and Sport* **54**:2, 169-178 (1983).
- [13] P. Badura-Skoda, Playing the Early Piano, *Early Music* **20**:2, 477-480, (nov. 1984).