



La "Touche d'Intensité" des Ondes Martenot : un contrôleur physiologiquement adapté à la main.

L. Quartier et T. Meurisse

IJLRDA, équipe LAM - UPMC - CNRS (UMR 7190), 11, rue de Lourmel, 75015 Paris, France
quartier@lam.jussieu.fr

Les Ondes Martenot sont l'un des plus anciens instruments de musique électroniques (1928). Pourtant une grande partie des recherches de Maurice Martenot concernant le geste musical (contrôle fin du phrasé musical, rapport d'immédiateté entre le musicien et son instrument, etc) reste encore aujourd'hui d'actualité. Très schématiquement, le son est généré par un oscillateur hétérodyne, dont la fréquence est déterminée par la main droite de l'instrumentiste ; les différents timbres sont obtenus en modifiant la forme du signal oscillant (sinus, signal carré, etc) ; enfin, la main gauche de l'Ondiste réalise une modulation d'amplitude du signal audio en appuyant sur la "Touche d'Intensité". Point-clé des Ondes Martenot, cette touche d'intensité permet de contrôler, non seulement l'intensité et la durée des sons, mais aussi leurs attaques, d'une façon particulièrement sensible. En pratique, cette touche est constituée d'un levier qui vient écraser un sac rempli d'un mélange de poudres (conductrice et isolante), comme pour un microphone à charbon. Dans cette communication, un travail expérimental consistant à mesurer simultanément et en condition de jeu, le son produit par l'instrument ainsi que l'enfoncement et la force du doigt sur la touche d'intensité, et les signaux électriques en amont et en aval du sac, est présenté. Ainsi, le fonctionnement de la touche d'intensité pourra être caractérisé, du point de vue électrique et mécanique. Il sera alors établi en quoi il s'agit d'un dispositif haptique particulièrement bien adapté.

1 Introduction

Les Ondes Martenot ont traversé l'ensemble du XXème siècle et continuent à être jouées et enseignées de nos jours. Un des principaux atouts des Ondes Martenot consiste en la façon extrêmement sensible de contrôler l'intensité sonore, via la "Touche d'Intensité". C'est ce qui permet d'obtenir des sons électroniques particulièrement expressifs. Dans un premier temps, le fonctionnement général de l'instrument va être brièvement décrit, avant de se focaliser sur la touche d'intensité. Deuxièmement, il s'agira de relier expérimentalement le geste du musicien (enfoncement de la touche, force avec laquelle le musicien appuie, vitesse d'exécution) avec les effets induits sur le son. Enfin, le caractère haptique de cette touche d'intensité sera discuté.



FIGURE 1 – La main droite contrôle la hauteur de la note, tandis que la main gauche contrôle le volume sonore, via la touche d'intensité.

2 Les Ondes Martenot

2.1 Présentation

Les Ondes Martenot ont été inventées dans les années vingt par Maurice Martenot. Malgré le petit nombre d'instruments fabriqués (moins de 300, [1, 2]), plus de 1500 oeuvres ([3]) ont été écrites par de nombreux compositeurs (Olivier Messiaen, Darius Milhaud, Maurice Ravel, etc) . Cette attractivité est généralement expliquée ([4]) par les possibilités expressives qu'offre l'instrument. En particulier, la touche d'intensité est décrite par Jeanne Loriod (l'interprète de prédilection des Ondes Martenot) en ces termes : "cette touche infiniment sensible permet de modeler le son comme le sculpteur modèle la matière" ([5]).

2.2 Fonctionnement général de l'instrument

Tout au long de sa vie, Maurice Martenot n'a cessé de faire évoluer son instrument, mais la façon d'en jouer reste fondamentalement la même. La main droite de l'Ondiste contrôle la hauteur de la note tandis que la main gauche ajuste l'intensité sonore (voir Figure 1).

Schématiquement (voir Figure 2), un oscillateur hétérodyne génère un signal électrique oscillant, dont la fréquence est pilotée par la main droite du musicien (soit par le clavier, soit par une "bague" reliée par un fil à un potentiomètre). Les différents timbres sont obtenus en modifiant la forme du signal électrique (sinus, signal carré, triangulaire, etc). Puis la main gauche de l'Ondiste contrôle finement le volume sonore en appuyant sur la

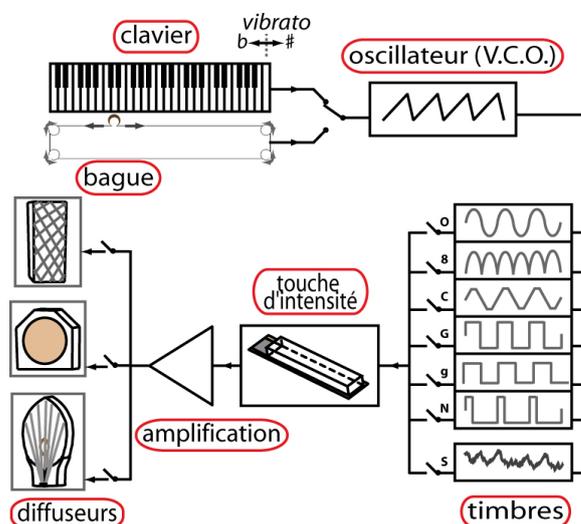


FIGURE 2 – Principe de fonctionnement des Ondes Martenot (schéma inspiré de [5]).

d'intensité. Enfin, le signal audio ainsi modulé, est amplifié puis converti en son au niveau des différents "diffuseurs".

2.3 La touche d'intensité

Electriquement, cette touche se comporte comme un rhéostat variable. En appuyant dessus, un petit sac (voir Figure 3) contenant une poudre partiellement conductive ([6]) est écrasé. La résistance électrique du sac chute

brutalement, provoquant une augmentation de l'intensité en sortie, selon le même principe que le microphone à charbon (variation du nombre de micro-contacts entre les grains conducteurs, [7, 8]).

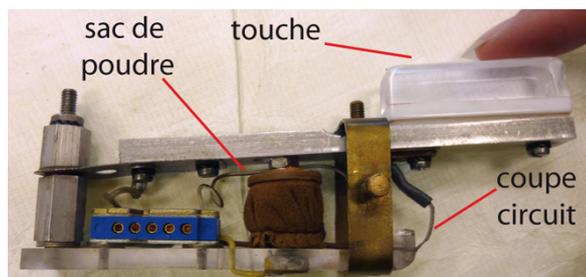


FIGURE 3 – La touche d'intensité, extraite de son boîtier.

D'après Olivier Messiaen (dans la préface de [5]), cette touche "donne à la fois le son, l'intensité, et l'attaque proprement dite. [...] les attaques vont du *legato* absolu au *staccato* le plus sec, en passant par le *louré*, le *piqué*, le *pizzicato*, pour finir par des *percutés*."

3 Mesures expérimentales

Un travail expérimental a été effectué pour caractériser la touche d'intensité ([9, 10]). Il s'agit de mesurer la force avec laquelle le musicien appuie sur la touche, ainsi que son enfoncement, et le son produit. Toutes ces mesures ont été réalisées simultanément, et en condition de jeu.

3.1 Protocole expérimental

L'enfoncement de la touche est mesuré avec un capteur inductif à courants de Foucault (précision ± 0.1 mm). Comme il s'agit d'un capteur sans contact, le musicien n'est pas gêné. La force avec laquelle le musicien appuie sur la touche est mesurée par un capteur de pression F.S.R. (Force Sensing Resistance). Il s'agit d'un capteur extrêmement fin (épaisseur inférieure à 0,5mm) qui ne perturbe pas le jeu du musicien. La résistance électrique du F.S.R. varie selon la pression exercée par le doigt sur la partie sensible du capteur. Un anneau de mousse (voir Figure 4) entoure cette partie sensible pour assurer qu'elle soit entièrement recouverte par le doigt. La précision du capteur est déterminée manuellement (10 procédures de calibrations avec différents poids normalisés). Une précision de ± 15 % est obtenue, ce qui est courant pour des capteurs F.S.R. sans corrections supplémentaires, via traitement du signal ad-hoc ([11, 12]). Le son est enregistré par un microphone (Brüel & Kjaer, type 4191) situé en face du haut-parleur (à 1m, dans l'axe de symétrie). Le microphone a été préalablement calibré avec une source de référence à 104 dB_{SPL} (Sound Pressure Level). Les différents signaux de mesures ont été numérisés simultanément, à une fréquence d'acquisition de 51,2 kHz.

Pour cerner les zones de force et d'enfoncement utilisées lors du jeu, toute la dynamique de l'instrument a été explorée en réalisant un *crescendo* pour différentes notes fixées (Do_1 à Do_6). La durée du *crescendo* est l'un des paramètres variables (de quelques dixièmes de seconde à quelques secondes, autrement dit des variations d'attaques passant d'un son *percussif* à un quasi *legato*). Le son choisi est le

timbre 'O' (voir Figure 2), qui correspond à une sinusoïde pure pour le signal électrique.

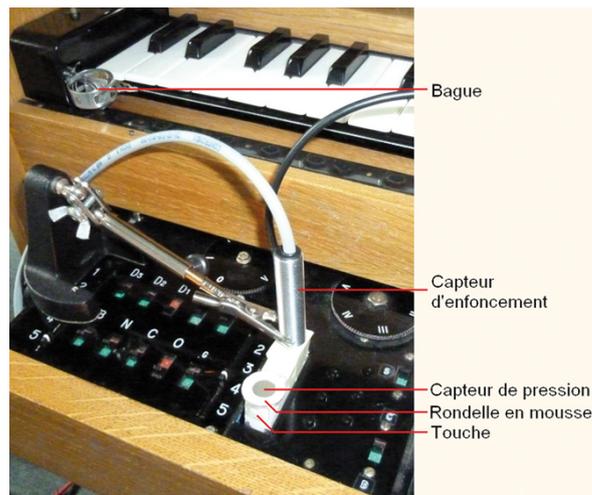


FIGURE 4 – La touche d'intensité, instrumentée des différents capteurs.

3.2 Modulation d'amplitude du signal audio

La figure 5 montre les signaux temporels des tensions électriques en amont et en aval du sac de poudre, ainsi que la force appliquée sur la touche, alors qu'une note (Do_0 , 32Hz) est jouée deux fois pendant une seconde. Lorsque la touche n'est pas appuyée, l'amplitude du signal électrique en aval du sac est nulle, à cause du coupe-circuit (voir Figure 3). Lorsqu'elle est enfoncée, l'amplitude du signal électrique en aval du sac augmente de 453 % (de 0,22 V à 1 V). Ainsi, la touche d'intensité réalise une modulation d'amplitude du signal électrique lorsque le sac de poudre est comprimé.

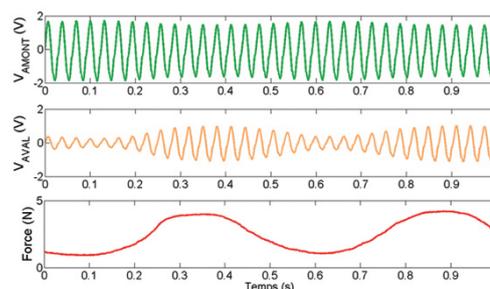


FIGURE 5 – Tensions électriques mesurées en amont (Haut) et en aval (Milieu) du sac, et force appliquée sur la touche (Bas).

3.3 Dépendance en fréquence

Comme le sac contient une poudre partiellement conductrice, celle-ci peut avoir des effets capacitifs. Une mesure sur le sac seul (injection d'un signal carré et mesure des temps de montée et descente) fournit les valeurs des fréquences de coupure des capacités équivalentes. On obtient $f_{c1} = 40$ kHz, pour la capacité équivalente en série, et $f_{c2} = 800$ kHz pour la capacité équivalente en parallèle. Ainsi les effets capacitifs du sac sont négligeables aux fréquences audibles.

Par conséquent, ce sac va pouvoir être remplacé par des résistances pures pour étudier l'effet de la variation de la fréquence du signal audio (i.e. la hauteur de la note jouée) sur l'amplitude électrique du signal (en aval du sac). Imposer au sac une valeur constante de résistance électrique, revient à imposer à la touche d'intensité une position fixe. La Figure 6 montre les enveloppes des amplitudes du signal V_{sac} mesurées à la sortie des résistances remplaçant le sac. Pour couvrir toute la tessiture de l'instrument, un *glissando* a été réalisé avec la bague.

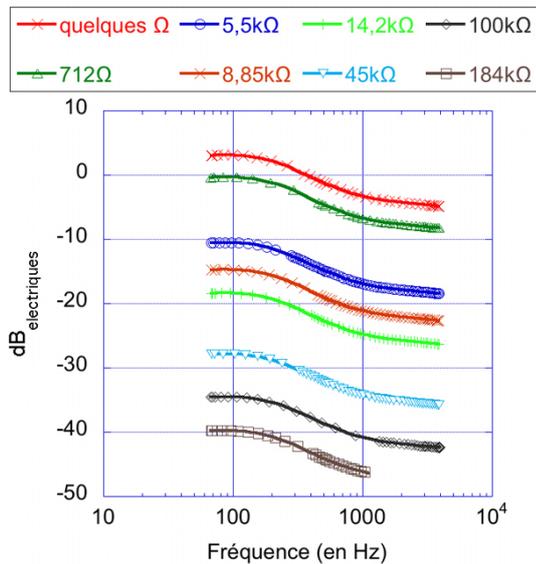


FIGURE 6 – Variations de V_{sac} selon la fréquence, pour différentes résistances : les résistances augmentent de quelques Ω à 184 k Ω , du haut vers le bas de la figure.

En passant de 184 k Ω à quelques Ω (fil électrique nu), l'amplitude augmente de plus de 43 dB. Pour une valeur de résistance fixée, l'amplitude décroît de 8 dB lorsque la fréquence augmente. Enfin, toutes ces courbes ont exactement la même forme : l'effet de la fréquence ne dépend donc pas de la valeur de la résistance. Cette variation avec la fréquence est sans doute due à l'oscillateur. A partir de ces courbes de référence, il est possible de déduire l'amplitude d'une note de n'importe quelle hauteur, connaissant l'amplitude d'une note de hauteur fixée.

3.4 dB_{SPL} et dB_{elec}

Dans la mesure où le musicien appuie sur la touche d'intensité avec son doigt et écoute le son résultant, les paramètres pertinents sont la force avec laquelle le musicien appuie, l'enfoncement de la touche et l'intensité sonore dB_{SPL} . Mais pour une note fixée, puisque le signal est purement sinusoïdal, la différence entre les dB_{SPL} captés par le microphone et les dB_{elec} ($dB_{électriques}$, soit $dB_{elec} = 20 \log V_{sac}$), ne dépend (voir Figure 2) que de la réponse acoustique de la salle (en première approximation).

La Figure 7 montre les deux signaux, dB_{SPL} et dB_{elec} , alors qu'une note (Do_3 , 262 Hz) est jouée pendant quelques secondes. La valeur de dB_{elec} a été augmentée de 93 dB pour mettre en évidence la superposition des deux courbes lorsque la touche est enfoncée. Lorsque la touche est relâchée et qu'aucun son n'est généré (à partir de 3,5s), les dB_{SPL} diminuent plus lentement que les dB_{elec} , à cause des

sons réverbérés, avant d'atteindre le niveau de bruit ambiant (environ 45 dB). Pour la suite de la caractérisation de la touche d'intensité, l'utilisation des dB_{elec} sera privilégiée, pour tenir compte des 40 dB d'informations supplémentaires (en dessous du niveau de bruit ambiant) et s'affranchir de la réponse de la salle.

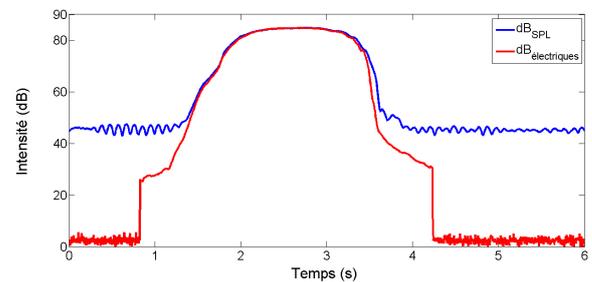


FIGURE 7 – Intensité des signaux temporels, dB_{elec} pour le signal électrique en aval du sac, et les dB_{SPL} absolus issus du microphone, pour une note (Do_3), dont le volume sonore passe d'un son inaudible à un fortissimo.

3.5 Réponse électrique de la touche d'intensité

Une note fixée (Do_3) a été jouée à différentes vitesses, en effectuant un *crescendo* depuis un son inaudible jusqu'à un *triple forte*. Le temps d'exécution (temps nécessaire pour parcourir toute la dynamique sonore) est listé dans le Tableau 1.

TABEAU 1 – Temps d'exécution des notes $Do3_a$ à $Do3_e$.

Note	$Do3_a$	$Do3_b$	$Do3_c$	$Do3_d$	$Do3_e$
temps (s)	5,3	4,7	3,6	1,5	0,9

La Figure 8 montre la variation de dB_{elec} en fonction de l'enfoncement lorsqu'on appuie sur la touche. Le cas où la touche est relâchée n'a pas été traité ici.

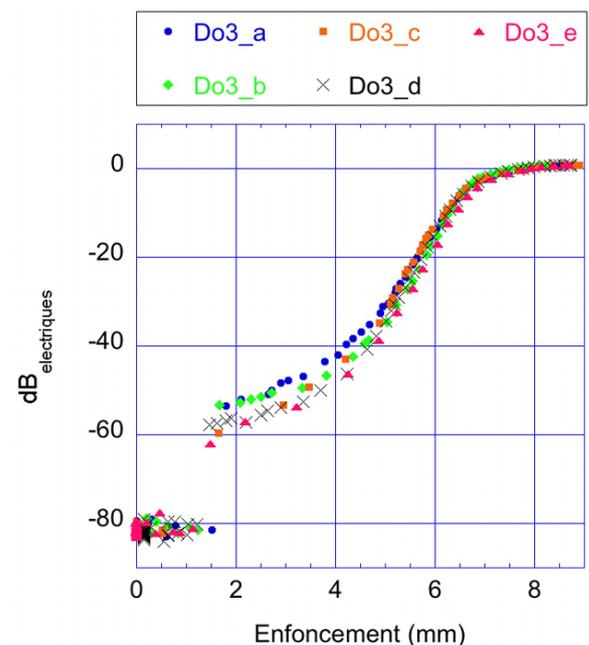


FIGURE 8 – Variation de dB_{elec} en fonction de l'enfoncement de la touche, pour une note fixée (Do_3).

En premier lieu, la Figure 8 montre que la touche d'intensité procure une énorme dynamique : plus de 50dB pour les dB_{elec} ce qui correspond à une dynamique sonore audible d'environ 48dB_{SPL} . A noter que le saut de $-80\text{dB}_{\text{elec}}$ à $-50\text{dB}_{\text{elec}}$ (pour un enfoncement d'1,5mm) correspond au déclipsage du coupe-circuit (voir Figure 3). Compte-tenu du § 3.3, cette dynamique sonore peut être étendue à l'ensemble de la tessiture (en ôtant quelques dB pour les notes les plus aiguës). A titre de comparaison, [13] a montré que la dynamique de la plupart des instruments traditionnels dépassait rarement 20 dB.

Deuxièmement, l'ensemble de cette dynamique sonore correspond à un geste instrumental de faible amplitude (l'enfoncement de la touche variant au plus, de 3mm à 8mm).

Enfin, la Figure 8 montre que la variation de dB_{elec} en fonction de l'enfoncement ne semble pas dépendre de la vitesse d'exécution des notes par le musicien, dans la mesure où la courbe de $\text{Do}3_e$ ne diffère pas des autres courbes.

3.6 Réponse mécanique de la touche d'intensité

La force exercée par le musicien et l'enfoncement de la touche sont liés par la réponse mécanique de la touche. La Figure 9 montre la variation de cette force en fonction de l'enfoncement de la touche, pour une même note ($\text{Do}3$) jouée plusieurs fois (mêmes expériences que pour la Figure 8). Les Figures 8 et 9 montrent que les grandes variations d'amplitude du signal audio correspondent aux variations non-linéaires de la force (vis-à-vis de l'enfoncement).

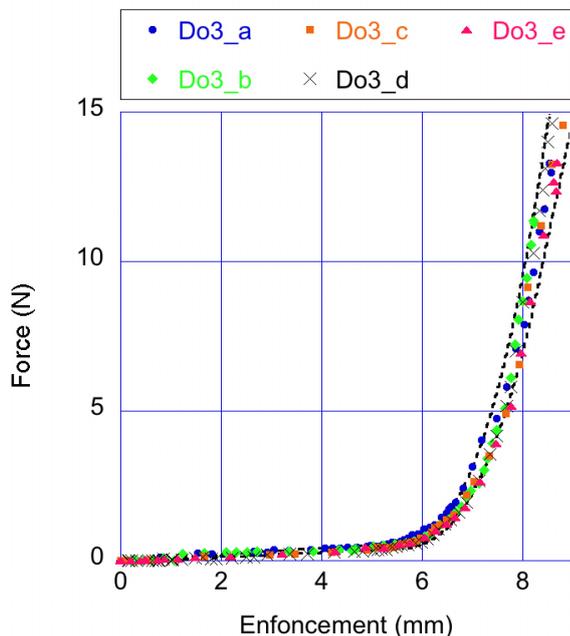


FIGURE 9 – Réponse mécanique de la touche ; variation de la force exercée par le doigt sur la touche, en fonction de l'enfoncement, pour plusieurs notes ; les tirets correspondent à l'incertitude élargie à 95 % de fiabilité.

Pour préciser les liens existant entre la dynamique audio, la force exercée et l'enfoncement de la touche, la dynamique totale (soit 48dB_{SPL}) est divisée en six parts égales, assimilées, en première approximation, aux six nuances musicales *pp* à *fff*. Les valeurs moyennes des forces et enfoncements (des expériences correspondant aux

Figures 8 et 9) sont calculées pour chaque nuance. Elles sont reportées dans le Tableau 2 et illustrées par la Figure 10.

TABLEAU 2 – Forces moyennes, Enfoncements moyens et écart-types (*e.c.*), calculés à partir des mesures sur $\text{Do}3_a$ à $\text{Do}3_e$, pour les valeurs de dB_{SPL} correspondant aux limites de six nuances musicales réparties de façon égale sur l'ensemble de la dynamique sonore.

dB_{SPL}	Enfoncement moyen (mm)	Force moyenne (N)
45	4.0 (<i>e.c.</i> 0.3)	0.31 (<i>e.c.</i> 0.02)
53	4.8 (<i>e.c.</i> 0.2)	0.40 (<i>e.c.</i> 0.05)
61	5.2 (<i>e.c.</i> 0.1)	0.46 (<i>e.c.</i> 0.04)
69	5.6 (<i>e.c.</i> 0.1)	0.57 (<i>e.c.</i> 0.06)
77	6.0 (<i>e.c.</i> 0.1)	0.80 (<i>e.c.</i> 0.12)
85	6.4 (<i>e.c.</i> 0.1)	1.26 (<i>e.c.</i> 0.10)
93	8.6 (<i>e.c.</i> 0.3)	13 (<i>e.c.</i> 1.9)

Le Tableau 2 montre qu'il suffit au doigt du musicien de se déplacer de seulement 4,6mm pour passer d'un son inaudible (45dB_{SPL}) au maximum d'intensité sonore (93dB_{SPL}). Vu la faible amplitude de ce geste instrumental, celui-ci peut être réalisé de façon suffisamment rapide pour permettre les transitoires d'attaques les plus secs (sons percussifs). Ainsi, lorsque le musicien utilise la touche d'intensité, c'est en fait toute la dynamique temporelle des notes (incluant les attaques et les extinctions) qu'il contrôle. Par ailleurs, la gamme des forces utilisées pour contrôler la touche (de 0,3 à 3N) correspond bien à la gamme de force usuelle pour pouvoir jouer d'un instrument sans fatigue excessive. Ainsi [14] mesure cette gamme de force au bout des doigts de violonistes appuyant sur leurs cordes.

Ainsi, la réponse mécanique de cette touche (en particulier dans sa partie la plus non-linéaire) semble primordiale pour comprendre comment le musicien parvient à contrôler finement une dynamique sonore aussi étendue avec un geste aussi resserré.

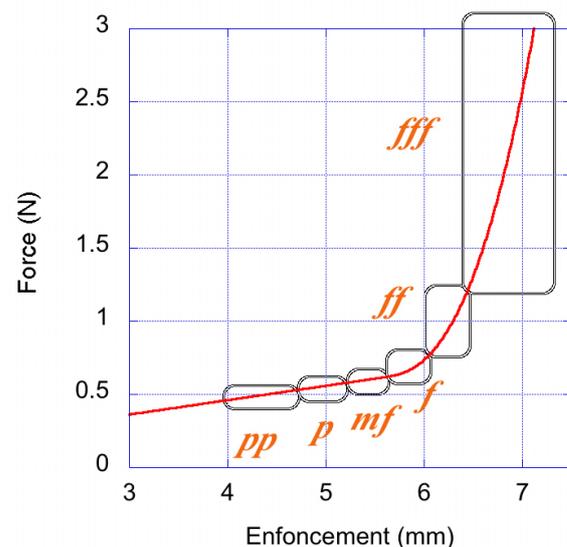


FIGURE 10 – Réponse mécanique moyenne de la touche d'intensité, calculée pour les notes $\text{Do}3_a$ à $\text{Do}3_e$, et les nuances musicales associées.

4 Une touche haptique

Afin de mieux comprendre le contrôle fin exercé par l'Ondiste sur la dynamique sonore, certains aspects psychophysiques et physiologiques de la touche d'intensité sont discutés.

4.1 Force appliquée et force perçue

Dans la partie 3.6, la Figure 10 montre la variation de la force F exercée par le doigt du musicien sur la touche d'intensité, en fonction de l'enfoncement. Compte-tenu de son faible poids (environ 30g), l'inertie de cette touche peut être considérée comme négligeable. Ainsi la force F , nécessaire au doigt pour actionner la touche, est également la force de réaction qu'exerce la touche sur le doigt. Cette touche peut alors être vue comme un dispositif haptique, purement mécanique.

4.2 Loi de Bouguer-Weber

La Figure 11 montre la variation des dB_{SPL} absolus en fonction de la force F appliquée à l'extrémité du doigt du musicien. L'asymptote horizontale (à partir de 3N) indique qu'il existe un palier pour l'intensité maximale. A noter que 3N correspond justement à la force maximale usuelle du doigt pour jouer d'un instrument sans fatigue excessive (voir § 3.6 et [14]). La majeure partie de la courbe (en dessous de 84dB_{SPL} et 1,3N), zone recouvrant toutes les nuances musicales excepté le *fff* (voir Figure 10), est quasi-linéaire.

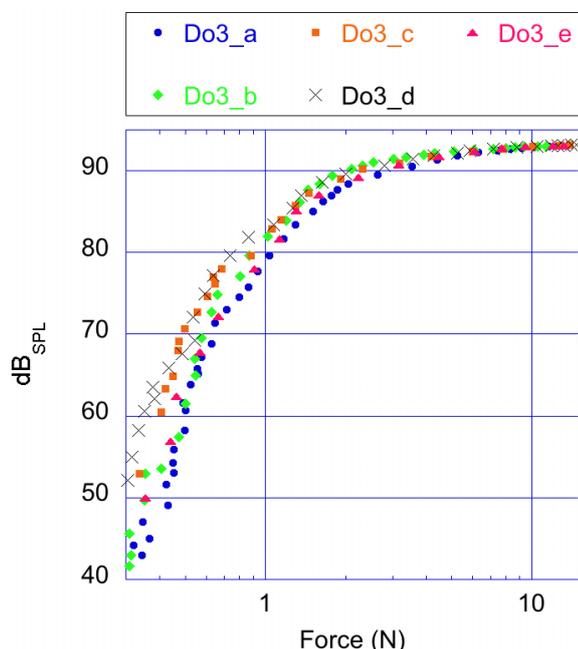


FIGURE 11 – Variation de l'intensité sonore absolue (dB_{SPL}), en fonction de la force au bout du doigt.

D'après les lois de la Psychophysique (loi de Bouguer-Weber, [15]), la sensation psychologique ressentie S et le stimulus physique I_{ph} qui en est la cause, sont reliés par la formule : $S = \beta \log I_{ph}$, où β est une constante. Ainsi, le logarithme de F peut être vu comme une quantité directement proportionnelle à la force de réaction *ressentie* par le musicien. Cela suggère une interprétation psychophysique de la Figure 11. Lorsque le musicien agit sur la touche, il

ressent l'effet de cette action de deux façons simultanées : auditivement (variation de l'intensité sonore dB_{SPL}) et tactilement (variation de la force *perçue* à l'extrémité du doigt). La quasi-linéarité de la courbe de la Figure 11 incite à penser que la touche d'intensité délivre un retour de force bien adapté au contrôle fin de l'intensité sonore.

4.3 Enaction

En 1997, Serina & al. ([16]) ont mesuré expérimentalement les propriétés mécaniques de l'extrémité du doigt humain, in vivo (voir également [17, 18]). Ils ont montré que la pulpe du doigt était un matériau visco-élastique, avec une relation force-enfoncement non-linéaire. La Figure 12 montre un collage entre

- la force F à l'extrémité du doigt en fonction de l'écrasement de la pulpe, pour un doigt appuyant sur une surface plane fixe ; la courbe est extraite de [16] ; l'axe horizontal (en noir) varie de 0 à 3 mm ;
- la courbe Force-Enfoncement de la touche d'intensité ; courbe extraite de la Figure 10 ; l'axe horizontal (en gris) varie de 0 à 8 mm.

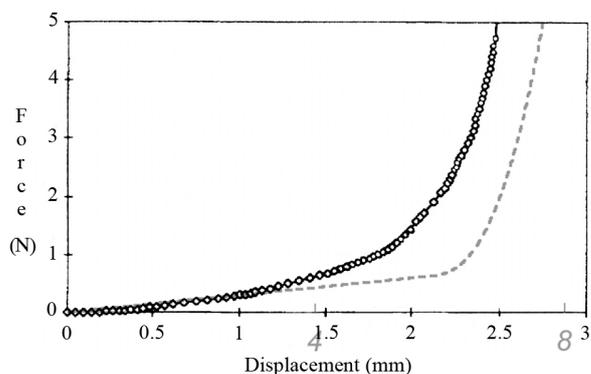


FIGURE 12 – Collage entre la relation Force-Enfoncement de la pulpe du doigt (losanges noirs), extraite de [16] (l'axe horizontal, en noir, varie de 0 à 3mm) et la relation Force-Enfoncement de la touche d'intensité (pointillés gris), extraite de la Figure 10 (l'axe horizontal, en gris, varie de 0 à 8mm).

La courbe Force-Enfoncement de la pulpe du doigt traduit une expérience sensorielle triviale : c'est en s'appuyant sur la variation de résistance mécanique ressentie au bout des doigts que chacun apprend à explorer son environnement proche à l'aide de ses mains. Ici, les deux courbes de force présentent une allure non-linéaire extrêmement proche. En particulier, les efforts en jeu sont les mêmes pour les deux courbes (axe vertical de 0 à 5N). Ceci suggère fortement que les Ondistes ré-utilisent toute une connaissance implicite (préalablement acquise au cours de l'observation du monde extérieur à l'aide des doigts) pour contrôler finement la touche d'intensité.

5 Conclusion

Dans cette communication, la touche d'intensité des Ondes Martenot a été étudiée pour essayer de comprendre la finesse de contrôle si particulière qu'elle offre au musicien. Les mesures expérimentales montrent que :

- la variation d'intensité sonore des notes jouées ne dépend que de l'enfoncement de la touche ou de la force qui lui est appliquée; en particulier, cette variation est indépendante de la vitesse d'exécution du geste musical;
- la touche d'intensité procure une énorme dynamique sonore, de près de 50dB_{SPL} sur toute la tessiture de l'instrument, et ce pour un déplacement total du doigt de moins de 5mm; ainsi, le contrôle fin de cette touche permet d'obtenir toute une variété d'attaques, du "legato absolu au staccato le plus sec";
- parallèlement à l'augmentation d'intensité sonore, la force requise pour actionner la touche augmente fortement, d'une façon non-linéaire avec l'enfoncement.

Ce comportement mécanique particulier semble jouer un grand rôle dans la finesse de contrôle exploitable par les Ondistes. Des arguments psychophysiques et physiologiques suggèrent que cette touche peut être comprise comme un dispositif haptique particulièrement bien adapté.

Remerciements

Les auteurs remercient Valérie Hartman-Claverie, Ondiste professionnelle et professeure au C.N.S.M.D.P., de leur avoir permis d'utiliser un des instruments de sa Classe d'Ondes Martenot pour leurs mesures expérimentales, et Nadia Ratsimandresy, Ondiste professionnelle, pour les nombreuses discussions fructueuses.

Références

- [1] S. Vaiedelich & L. Quartier, "Obsolescence technologique et survivance musicale : le cas des Ondes Martenot", in *Technè*, n°37, 2013, pp. 66-71.
- [2] T. Bloch, "Les Ondes Martenot : vie ou survie ? Un bilan pour 60 années d'existence", in *Musique et claviers* n°10, 1989, pp. 151-162.
- [3] J. Laurendeau, "Maurice Martenot, luthier de l'électronique", Louise Courteau Ed., 1990.
- [4] E. Leipp & M. Martenot, "Les Ondes Martenot", in bulletin du GAM n°60, 1972.
- [5] J. Loriod, "Technique de l'Onde électronique", A. Leduc Ed., 1987.
- [6] S. Vaiedelich, I. Guillot & V. Hartman-Claverie, "Maurice Martenot. La poudre de l'enchanteur", in *Int. Conf. on Interdisciplinary Musicology (CIM09)*, Paris, 2009 (proceedings parus dans "La musique et ses instruments", Delatour Ed., 2013).
- [7] E. Falcon, B. Castaing & M. Creyssels, "Nonlinear electrical conductivity in a 1D granular medium", in *The European Physical Journal B*, 2004, pp 475-483.
- [8] M. Creyssels, S. Dorbolo, A. Merlen, C. Laroche, B. Castaing & E. Falcon, "Some aspects of electrical conduction in granular systems of various dimensions", in *The European Physical Journal E*, 2007, pp 255-264.
- [9] T. Meurisse, "Etude d'un système à retour d'effort simulant la touche d'expression des Ondes Martenot", Master Thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2011.
- [10] L. Quartier, T. Meurisse, M. Jossic & S. Vaiedelich, "The 'expression key' of Martenot Waves : a human-centered system for controlling musical gestures", 1st Int. Conf. of ANIMUSIC, Aveiro (Portugal), 2012 (proceedings publiés dans "Liranimus, vol.1", Ed. Patricia Bastos, Lisbon, 2013).
- [11] T. R. Jensen, R. G. Badwin & J. G. Webster, "A conductive polymer sensor for measuring external finger forces", in *J. of Biomechanics*, 1991, pp 851-858.
- [12] R. S. Hall, G. T. Desmoulin & T. E. Milner, "A technique for conditioning and calibrating force-sensing resistors for repeatable and reliable measurements of compressive force", in *J. of Biomechanics*, 2008, pp 3492-3495.
- [13] M. Clark & D. Luce, "Intensities of orchestral instrument scales played at prescribed Dynamic making", in *J. of the Audio Engineering Society* 13 (2), 1965, pp. 151-157.
- [14] H. Kinoshita & S. Obata, "Left hand finger force in violin playing : Tempo, loudness, and finger differences", in *J. Acoust. Soc. Am.*, 2009, pp. 388-395.
- [15] B. C. J. Moore, "An introduction to the Psychology of Hearing", Emerald Ed., 1977.
- [16] E. R. Serina, C. D. Mote Jr. & D. Rempel, "Force response of the fingertip pulp to repeated compression - effects of loading rate, loading angle and anthropometry", in *J. Biomechanics*, Vol. 30, 1997, pp. 1035-1040.
- [17] R. J. Gulati & M. A. Srinivasan, "Determination of mechanical properties of the human fingerpad in vivo using a tactile stimulator", RLE Technical Report, Massachusetts Institute of Technology (1997).
- [18] M. Wiertelowski & V. Hayward, "Mechanical behavior of the fingertip in the range of frequencies and displacements relevant to touch", in *J. Biomechanics*, vol. 45, 2012, pp. 1869-1874.