



Stage expérimental de Licence 3 (Année 2010-2011)

# Caractérisation et étude paramétrique de la poudre de l'Onde Martenot

Marguerite JOSSIC

Encadrants :  
Laurent Quartier  
Ivan Guillot  
Stéphane Vaiedelich

Equipe Lutherie-Acoustique-Musique, Institut Jean le Rond d'Alembert  
Institut de Chime et Matériaux de Paris-Est  
Laboratoire de la Cité de la Musique - Conservation et Recherche

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
1.1	Objet du stage . . . . .	4
1.2	Les Ondes Martenot : histoire et fonctionnement . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Analyse bibliographique</b>	<b>6</b>
2.1	Littérature . . . . .	6
2.2	Travaux de recherche . . . . .	6
2.3	Objectifs et déroulement du stage . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Préparation et analyse du mica et du graphite</b>	<b>7</b>
3.1	Matériel . . . . .	7
3.2	Préparation des composants . . . . .	8
3.3	Analyse au microscope optique . . . . .	8
3.3.1	Préparation des échantillons . . . . .	8
3.3.2	Analyse des échantillons . . . . .	9
3.4	Analyse au Microscope Electronique à Balayage (MEB) . . . . .	10
3.4.1	Principe du MEB . . . . .	10
3.4.2	Préparation des échantillons . . . . .	11
3.5	Résultats . . . . .	11
3.5.1	Analyse du mica . . . . .	11
3.5.2	Analyse du graphite . . . . .	12
3.5.3	Conclusion . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Confection du sac</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Tests des poudres sur l'instrument</b>	<b>14</b>
5.1	Démarche et paramètres . . . . .	14
5.2	Tests par Valérie Hartman . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>17</b>
<b>A</b>	<b>Annexe : Schéma de fonctionnement de l'Onde Martenot</b>	<b>22</b>
<b>B</b>	<b>Annexe : Fits expérimentaux</b>	<b>23</b>
<b>C</b>	<b>Annexe : Notice du graphite SC</b>	<b>24</b>
<b>D</b>	<b>Annexe : Diffraction aux rayons X du mica MICA-MU M 2/1 et du mica BRIOMICA 115</b>	<b>25</b>
<b>E</b>	<b>Annexe : Mesure de résistance statique</b>	<b>26</b>

# Remerciements

Laurent Quartier pour son encadrement, sa grande disponibilité et ses conseils

Ivan Guillot pour son encadrement, son temps et ses explications sur le monde des matériaux

Stéphane Vaiedelich pour la découverte de la "physique non théorique" et sa disponibilité.

Diandra, Joachim, Maxime, Thibaut et les autres stagiaires du LAM...pour l'ambiance

L'ensemble de l'équipe du LAM qui m'a renseignée sur les activités diverses du laboratoire

Sandie Leconte, Léandre de la Cité de la Musique

Rémi pour l'utilisation et l'explication du MEB, et Rémi pour le programme ImageJ (ICMPE)

L'ensemble des chercheurs et techniciens de l'ICMPE pour leur accueil

Valérie Hartman pour son avis musical sur le travail effectué

# 1 Introduction

## 1.1 Objet du stage

L'onde Martenot est un instrument de musique apparu à l'aube du 20ème siècle et dont d'importants compositeurs, comme Olivier Messiaen, se sont emparés. Enseigné dans les conservatoires et particulièrement au Conservatoire National Supérieur de Musique, l'instrument pose de très importants problèmes de conservation liés en partie à la disparition d'informations relatives à sa conception. Ainsi, la recherche scientifique qui s'est récemment développée autour de ce sujet s'inscrit dans une démarche de conservation voire de restauration de l'instrument.

Le stage avait pour but de reconstituer un élément crucial dans la chaîne de production sonore de l'instrument : la poudre conductrice qui fait partie intégrante du mécanisme de la touche d'expression. En effet, depuis la mort de Maurice Martenot il y a un peu plus de trente ans, peu de musiciens ou de luthiers peuvent prétendre connaître le protocole de fabrication de la poudre, dont le secret a été jalousement gardé par son inventeur. Or celle-ci confère à la touche d'expression le rôle de véritable archet, et sa qualité se dégrade au cours du temps. Le besoin se fait donc sentir, tant chez les ondistes actuels que du point de vue de la conservation du geste musical initié par la création de cet instrument, de remplacer les poudres usagées des vieilles Ondes Martenot. Reconstituer cette poudre est tout l'objet de ce stage.

Ainsi, la recherche sur la poudre des Ondes Martenot se doit d'être à la croisée de plusieurs disciplines, comme l'illustre l'association des trois laboratoires (Musée de la Musique, LAM, ICMPE) qui s'est mise en place autour de ce projet. En effet, l'étude physicochimique de la poudre n'a de sens que si elle est mise en relation avec un important travail de documentation historique, et la volonté de conserver un geste musical qui pourrait bien, malheureusement, se perdre dans les prochaines années.

## 1.2 Les Ondes Martenot : histoire et fonctionnement

L'Onde Martenot, qui porte le nom de son inventeur Maurice Martenot (1898-1980), est un instrument électronique monophonique. Elle voit le jour à la fin de la Première Guerre Mondiale, cependant Martenot n'aura de cesse de transformer son instrument au cours du XXe siècle, du premier modèle des années 20 qui ressemblait fort au thérémine de la même époque<sup>1</sup>, en passant par le deuxième modèle à bague qui fut présenté à l'Opéra en 1928, jusqu'au septième modèle des années 70 (voir figure 1).



FIGURE 1 – Onde Martenot, modèle des années 70

On trouvera en Annexe A le schéma de fonctionnement de l'onde, dont le principe est le suivant :

La fréquence de la note jouée est déterminée par un oscillateur (ou système hétérodyne<sup>2</sup>), dont la fréquence est commandée par une résistance variable constituée par un clavier (sous chaque touche duquel est

---

1. Un des plus anciens instruments de musique électronique, inventé en 1919 par le Russe Lev Sergeïevitch Termen. Composé d'un boîtier électronique équipé de deux antennes, le thérémine a la particularité de produire de la musique sans être touché par l'instrumentiste, qui contrôle la fréquence du son de la main droite, et le volume sonore de la main gauche

2. Système de production des sons utilisé dans les radiorécepteurs

placée une résistance) ou une bague que l'instrumentiste glisse à son doigt (figure 1) et qui, reliée à un potentiomètre, permet d'avoir un spectre continu de fréquence. Ce clavier ou cette bague est commandée par la main droite de l'instrumentiste. De sa main gauche, celui-ci contrôle toutes les autres caractéristiques du son à l'aide du tiroir situé sur sa gauche (cf 2) : intensité, timbre, jeu avec bague/clavier, accord... En particulier l'intensité du son est contrôlée au moyen d'une touche d'expression. En appuyant dessus, l'instrumentiste comprime un petit sac en cuir contenant une poudre, constituée d'un isolant et d'un conducteur (voir figure 3). Ce sac fonctionne sur le même principe que les premiers microphones à charbon : les granules de charbon remplissent un volume fermé par la membrane, et le déplacement de celle-ci modifie les contacts entre les granules, entraînant ainsi une variation de résistance qui est transmise par un transformateur (figure 4). De même le sac des Ondes Martenot voit sa résistance diminuer exponentiellement avec l'écrasement.



FIGURE 2 – Tiroir de l'Onde



FIGURE 3 – Touche d'expression démontée

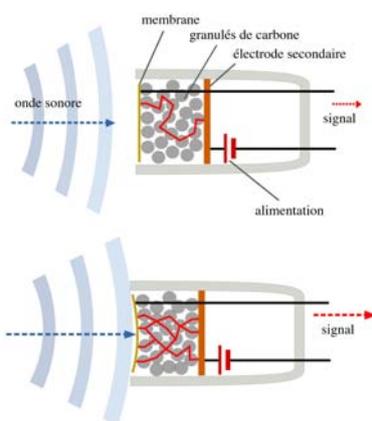


FIGURE 4 – Principe du microphone à charbon

Le son de l'onde est émis par des diffuseurs (au nombre de trois). Ceux-ci possèdent des propriétés mécaniques leur donnant des caractéristiques acoustiques uniques ( création d'harmoniques par "sympathie",

résonance à certaines fréquences, prolongation du son...) qui ajoutent encore à la diversification sonore de l'instrument.

## 2 Analyse bibliographique

### 2.1 Littérature

Concernant la description de la structure de l'Onde Martenot ainsi que son fonctionnement, plusieurs documents sont aujourd'hui accessibles. Ceux écrits par Maurice Martenot lui-même se contentent d'évoquer le système du petit sac de poudre sans jamais, malheureusement, entrer dans les détails [1]. Par ailleurs, Jeanne Lorient, élève puis interprète de prédilection de Martenot, a rédigé une Technique de l'Onde Electronique [2], dont le Volume 1, *Le Clavier*, fournit des informations précises sur le fonctionnement de l'instrument.

### 2.2 Travaux de recherche

Les travaux et expériences qui ont été réalisés dans les dernières années ont servi de base pour le stage que j'ai effectué :

S. Vaiedelich (Cité de la Musique) et I. Guillot (ICMPE) ont présenté à la CIM09 (Conference on Interdisciplinary Musicology 2009) un travail de recherche portant sur la caractérisation physicochimique (composition...) et morphologique (taille moyenne, distribution des tailles...) de la poudre des Ondes Martenot ([3]).

De ces travaux, réalisés sur plusieurs ondes, on retiendra que :

- L'analyse au microscope optique puis au MEB montre que la poudre des Ondes Martenot comporte deux phases majoritaires, un isolant et un conducteur, composées respectivement de mica (Muscovite 2M-1), identique dans toutes les ondes, et de graphite.
- L'analyse d'une centaine de grains montre une distribution de taille centrée sur 28 microns pour le mica, et 7 microns pour le graphite.
- La proportion des deux composants reste quant à elle quasiment inconnue. En effet la petitesse de l'échantillon analysé ne permet pas de conclure de façon générale sur la proportion exacte en mica et graphite. De plus, l'observation même des deux phases indépendamment l'une de l'autre reste difficile, notamment par la présence d'inclusions de mica au sein même du graphite, ou de grains de mica recouverts de grains de graphite, plus petits.
- La résistance aux bornes du sac, qui diminue avec l'enfoncement de la touche, suit un comportement non linéaire (cf figure 5)

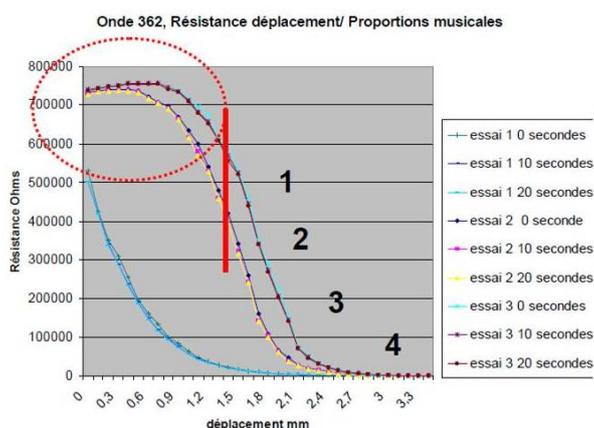


FIGURE 5 – Résistance du sac en fonction de l'enfoncement

Par ailleurs, des analyses du comportement électrique de la poudre en fonction de l'enfoncement de la touche d'expression ainsi que de la force appliquée par le doigt sur celle-ci ont été réalisés par Thibaut Meurisse (M2 ATIAM) et Laurent Quartier (Laboratoire d'Acoustique Musicale)[4]. De ce travail on peut retenir les principaux *fits* tirés des mesures sur l'Onde Martenot n°320, à savoir la tension en sortie du sac en fonction de l'enfoncement de la touche, ou de la force appliquée (cf Annexe B)

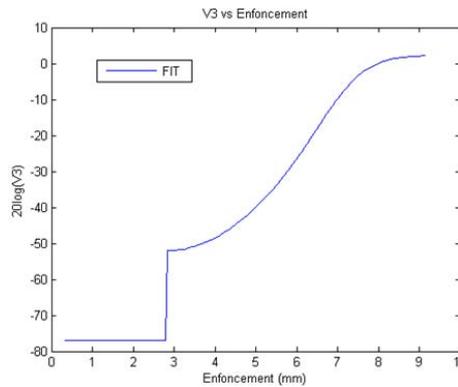


FIGURE 6 –  $20\log(V3)$  en fonction de l'enfoncement

On retiendra notamment la figure 6, où  $V3$  est la tension en sortie du sac. En effet, même si ce résultat correspond à une poudre usée, il servira de référence, non pas à approcher, mais plutôt à comparer avec les mesures faites sur les poudres fabriquées pour les tests. Le saut d'environ  $-80\text{dB}/-50\text{dB}$  au début de l'enfoncement de la touche est dû au déclipsage du coupe-circuit (voir figure 3). En effet, même quand la touche est relâchée, il existe un bruit de fond résiduel dû à un éventuel courant parasite. Le coupe-circuit est une petite lame métallique conçue pour court-circuiter le sac pour un enfoncement allant de 0 à 3mm (pour l'onde 320), permettant un silence propre avant l'arrivée des toutes premières nuances faibles à  $-50\text{ dB}$ . Son réglage, minutieux, est propre à chaque Onde.

### 2.3 Objectifs et déroulement du stage

Afin de parvenir à l'objectif de reconstituer une poudre adaptée au jeu instrumental, le stage s'est déroulé en quatre temps :

- La première partie s'est déroulée dans les laboratoires de l'ICMPE (Institut de Chimie Matériaux de Paris-Est) à Thiais, où plusieurs poudres de mica et de graphite, avec des granulométries différentes, ont été préparées et analysées séparément au Microscope Optique et au Microscope Electronique à Balayage.
- La deuxième partie a eu lieu au laboratoire de la Cité de la Musique (Paris 19e), afin de préparer les sacs, fidèles au modèle d'origine, qui contiendront les différentes poudres à tester.
- Une troisième partie, au LAM (Laboratoire d'Acoustique Musicale) a consisté à effectuer différents essais de mélanges de poudre sur l'Onde n°320, en reprenant le protocole de mesures de Thibaut Meurisse.
- Enfin, le temps restant a permis de soumettre à l'appréciation de Valérie Hartman, professeur d'Onde Martenot au Conservatoire National Supérieur de Musique de Paris (CNSM), les poudres semblant le plus satisfaisantes, afin qu'elle donne une analyse non plus physique de ces mêmes poudres, mais sensitive et musicale.

Tout au long de l'étude menée durant ce stage, le parti est pris de s'appuyer sur un protocole expérimental (matériel, composants...) qui correspond le plus possible aux informations historiques que l'on possède sur l'élaboration des poudres par Maurice Martenot.

## 3 Préparation et analyse du mica et du graphite

Le protocole est le suivant : on cherche à préparer plusieurs échantillons de mica et de graphite, que l'on veut ensuite caractériser en terme de granulométrie, au microscope optique ou au MEB. Les résultats seront ensuite comparés aux granulométries obtenues dans les travaux de S. Vaiedelich et I. Guillot [3], afin d'éliminer d'emblée des poudres aux granulométries trop grandes ou trop faibles.

### 3.1 Matériel

Historiquement on sait très peu de choses de la façon dont Martenot fabriquait ses poudres, hormis qu'il utilisait un moulin à café, soit pour moudre le mica et le graphite, soit pour les mélanger. Dans l'objectif que

l'on s'est fixé de s'approcher au mieux historiquement du processus que suivait Martenot, on utilisera donc ici un moulin à café moderne pour moudre les composants.

Par ailleurs, aucun indice ne donne la façon dont Martenot s'approvisionnait en mica et graphite. Le marché de ces deux composants offrant plusieurs possibilités, le mica et le graphite ont été achetés sous plusieurs formes :

- Le graphite sous forme de poudre uniquement (Poudre de graphite SC, voir annexe C)
- Le mica sous forme de poudre (BRIOMICA 115) et sous forme de cristaux (MICA-MU M 2/1), fournis par l'entreprise CMMP (Comptoir des Minéraux et Matières Premières).

Les différences structurales entre les deux sortes de mica sont minimes, à en juger par une diffraction aux rayons X (Annexe D). On suppose ici que les différences de constitution et de structure des phases sont suffisamment faibles pour que les propriétés diélectriques du mica varient très peu.

## 3.2 Préparation des composants

Le broyage des poudres a été uniquement réalisé dans le cas du mica et s'est fait suivant deux facteurs :

- le temps de broyage
- la masse de mica broyée - en effet quand celle-ci est trop faible, on obtient vite un "nuage" de poudre dans le moulin, qui devient inefficace.

le but n'étant pas de faire toutes les combinaisons possibles mais plutôt d'avoir quelques échantillons suffisamment différents dans leurs caractérisations pour pouvoir ensuite affiner si certains correspondent aux caractéristiques des grains de mica analysés à partir des poudres usées [3].

En plus de la poudre de mica 115, cinq échantillons ont été préparés, avec les facteurs suivants :

Temps de broyage	1min30	2min30	2min30	3min30	3min30
Masse de mica broyée	5g	5g	12g	5g	12g

De plus, il faut rajouter à ces six échantillons de mica un septième échantillon constitué par la poudre de graphite.

## 3.3 Analyse au microscope optique

### 3.3.1 Préparation des échantillons

Les grains du composant à analyser sont déposés sur une plaque de verre selon les étapes suivantes : un petit échantillon de la poudre est placé en solution dans un flacon avec de l'éthanol. Le flacon est ensuite placé dans un bain à ultrasons qui disperse les grains à l'intérieur de la solution. Une goutte de cette solution est alors déposée sur une plaque de verre et l'échantillon est prêt.



(a) Echantillons en solution dans de l'éthanol



(b) Bains à ultrasons

FIGURE 7 – Echantillons et bain à ultrasons

### 3.3.2 Analyse des échantillons

Les deux composants ont été visualisés puis analysés avec un microscope optique (Axio Vision, Imager A2 Vario de la marque Zeiss). Celui-ci a été utilisé pour déterminer la distribution en taille (ou en surface) des grains des poudres réalisées. Cependant, il s'est avéré que les images obtenues pour le mica n'étaient pas exploitables pour une analyse d'image, car le contraste entre les grains de mica et le substrat (verre) était trop faible. Pour le mica, on a donc préféré une analyse au MEB (voir plus loin).

En revanche, l'analyse au microscope optique du graphite n'a posé aucun problème de contraste étant donné que le graphite est opaque.

Les clichés de l'échantillon sont pris sous le logiciel AxioVision de Zeiss et traités avec le logiciel Image J.

On réalise une série de 10 clichés d'un échantillon de graphite sur plaque de verre. Cependant, en raison du relief des grains, il est difficile d'observer une zone entière de façon nette ; c'est pourquoi chaque cliché que nous avons réalisé correspond en réalité à la superposition de plusieurs images (de l'ordre de la vingtaine) faites sur des plans parallèles à l'échantillon mais à des altitudes différentes, puis compilées afin d'obtenir une seule image nette. L'ensemble des images compilées est ensuite chargé sous le logiciel Image J qui, à l'aide d'une macro écrite sous Java, réalise une analyse en niveau de gris, compte les grains et donne leur surface. On obtient ainsi l'aire de presque 6000 grains de graphite.

Le choix des images prises n'est pas tant aléatoire du fait que les grains de l'échantillon ne sont pas parfaitement dispersés, et que des amas sont de ce fait présents à plusieurs endroits de l'échantillon observé (figure 8). Les clichés de l'échantillon sont choisis afin de minimiser la présence de ces gros amas, qui sont comptés par le logiciel comme une grosse particule et non pas comme plusieurs grains accolés. On acceptera que ces amas, en petite quantité, soient comptés dans l'erreur globale de comptage et de distribution des tailles.

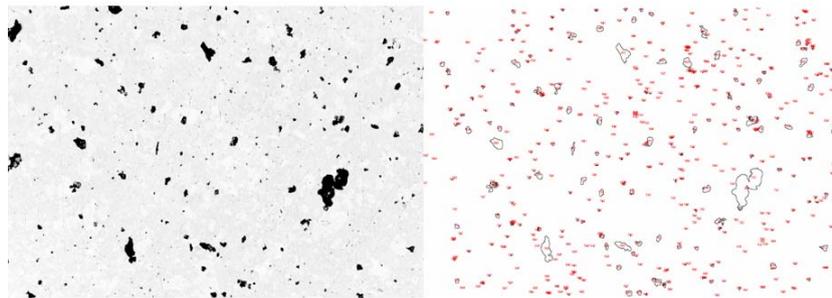


FIGURE 8 – Echantillon de graphite vu au microscope optique (à gauche) et comptage des grains par le logiciel ImageJ (à droite)

## 3.4 Analyse au Microscope Electronique à Balayage (MEB)

### 3.4.1 Principe du MEB



FIGURE 9 – Microscope Electronique à Balayage

Le principe général de fonctionnement du MEB est le suivant : un faisceau très fin d'électrons (électrons primaires) est émis par une source et balaie la surface d'un échantillon. Des interactions électrons-matière se produisent alors dans une zone appelée " poire d'interaction ", dépendant du numéro atomique de l'élément balayé, et tout un spectre d'électrons est alors réémis vers des détecteurs. On distingue plusieurs types d'électrons réémis :

- Les électrons secondaires, qui initialement sont des électrons peu liés à l'atome et sont éjectés par absorption d'une partie de l'énergie d'un électron incident. Ces électrons du fait de leur faible énergie n'atteignent que la surface (profondeur  $< 10\text{nm}$ ) et donnent des renseignements sur la topographie de l'échantillon. Ils servent donc en imagerie (mode SE, Secondary Electrons)
- Les électrons rétrodiffusés, qui résultent de l'interaction entre des électrons primaires et les noyaux des atomes. Ces électrons ont une énergie élevée, beaucoup plus importante que celle des électrons secondaires, et sont réémis dans une zone pouvant atteindre le micromètre de profondeur. Par la nature de leur interaction, ils dépendent du numéro atomique de l'élément balayé et fournissent donc des renseignements sur la nature chimique des différents éléments présents dans l'échantillon (mode BSE : Back Scattering Electrons).
- Les photons X, émis par désexcitation du cortège électronique des atomes dont un électron de coeur a été arraché sous l'impact électronique. Ce type de rayonnement X, quantifié, donne des informations sur la nature chimique de l'atome cible (analyse EDS : Energy Dispersive Spectroscopy).

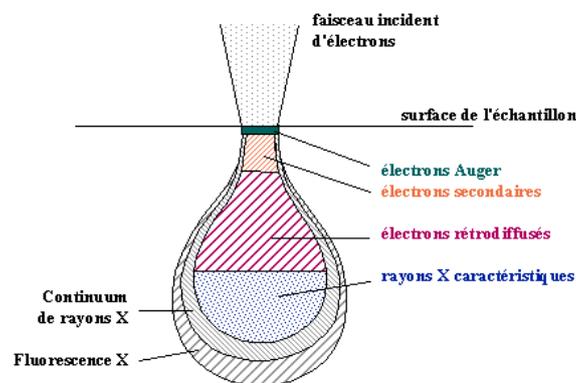


FIGURE 10 – "Poire d'émission" du MEB

Pour des raisons de visibilité (figure 11), l'analyse du mica sur le MEB a été effectuée par électrons rétrodiffusés, le contraste chimique étant supérieur au contraste topologique.

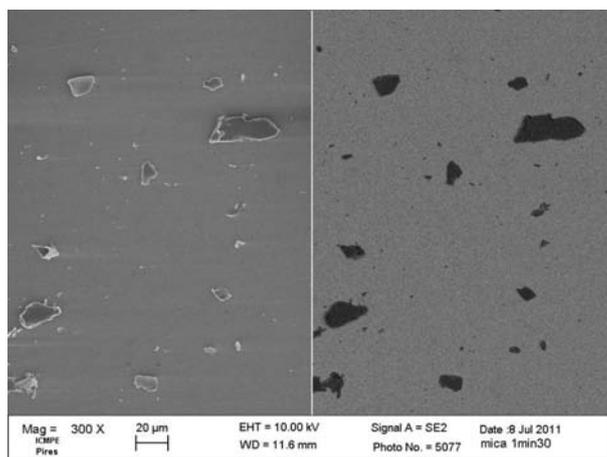


FIGURE 11 – Analyse du mica avec temps de broyage 1'30 en électrons secondaires (à gauche) et en électrons rétrodiffusés (à droite)

### 3.4.2 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons de mica pour la visualisation au MEB suit le même principe que la préparation pour le microscope optique, à la différence que les grains de mica (composés essentiellement des éléments aluminium, oxygène et silicium) doivent être déposés sur des substrats en cuivre, de numéro atomique bien plus élevé, pour une meilleure visualisation des électrons rétrodiffusés : en effet, la visualisation en BSE (électrons rétro-diffusés) correspond à une visualisation en contraste chimique ; or les plaques de verre que l'on utilisait pour le microscope optique sont composées essentiellement de silice, élément que l'on retrouve dans le mica que l'on analyse.

Le cuivre est conducteur mais le mica est un isolant. Il faut donc, une fois le mica déposé sur le substrat de cuivre, placer l'échantillon dans un métalliseur, qui dépose sur le mica une mince couche de platine conductrice d'épaisseur 3nm environ. Cette dernière étape clôt la préparation de l'échantillon.

La prise d'images sur les échantillons de mica et leur traitement suit ensuite le même protocole que celles effectuées avec le microscope optique pour le graphite, à l'exception de la compilation, le MEB ayant une profondeur de champ bien supérieure.

## 3.5 Résultats

### 3.5.1 Analyse du mica

Le résultat concernant la distribution de tailles des différentes poudres de mica préparées est le suivant :

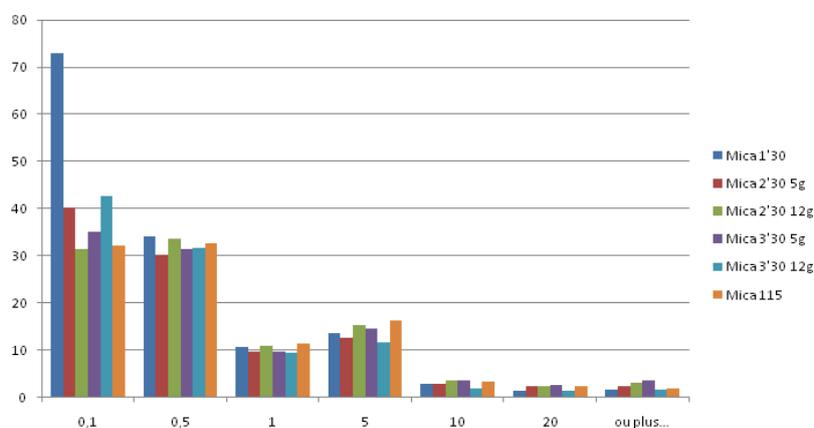


FIGURE 12 – Distribution en pourcentage de la taille des grains de mica

De ces résultats on peut remarquer que :

- Premièrement, il ne semble pas y avoir de grande différence entre les différentes poudres préparées, malgré leur temps de broyage différents, et surtout malgré le fait qu'à *l'oeil nu*, on observe des différences nettes de brillance (dues aux plaquettes de mica, plus ou moins grosses).
- Deuxièmement, la distribution de taille est maximale autour de 0.1 micron, quelque soit la poudre, valeur qui est cent fois inférieure à celle des poudres usées observées par S. Vaiedelich et I. Guillot.

### 3.5.2 Analyse du graphite

Pour le graphite on obtient la distribution de taille suivante :

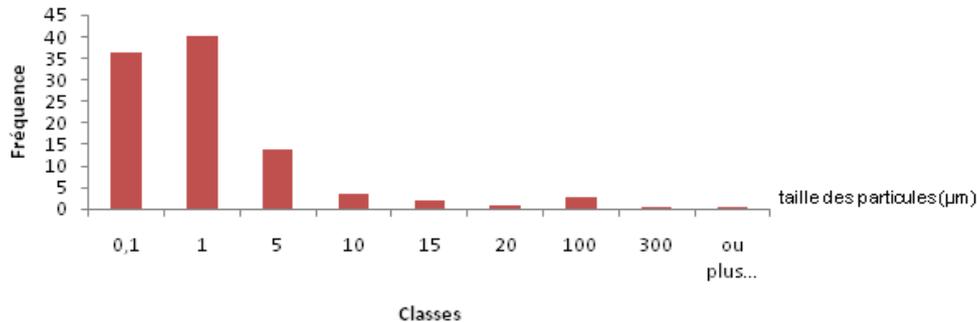


FIGURE 13 – Distribution en pourcentage de la taille des grains de graphite

De façon similaire au mica, on constate la présence de grains plus petits que ceux observés sur les poudres usées, dont la distribution est centrée sur 7 microns alors que près de 80% des grains du graphite analysé ici ont une taille comprise entre 0 et 1 micron. Malheureusement, contrairement au mica, la taille du graphite utilisé pour composer les poudres n'est pas ajustable, étant donné que le graphite analysé est de type industriel, déjà sous forme de poudre.

### 3.5.3 Conclusion

On est face ici à un double problème :

- Une similitude microscopique entre les tailles des différentes poudres broyées, qui vient contredire la nette différence de brillance qu'on observe au niveau macroscopique entre les différentes poudres.
- Une différence de taille d'un facteur 100 entre ce qu'on a broyé et les grains provenant des poudres usées ([3]).

On peut supposer que l'explication du premier problème provient de l'étendue de l'échantillon sur lequel la statistique a été effectuée : l'échantillon analysé, de seulement quelques milliers de grains, n'est peut être pas représentatif d'une poudre qui semble très hétérogène.

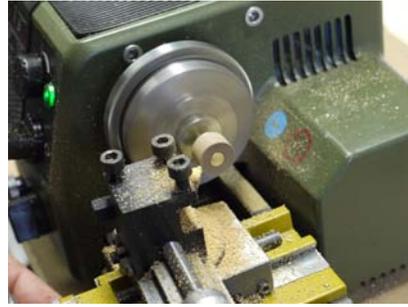
Pour le deuxième problème, il faut à ce stade prendre en compte le fait que la statistique effectuée par S. Vaiedelich et I. Guillot sur les poudres usées ne porte que sur quelques images et ne concerne donc qu'une centaine de grains, soit plus de dix fois moins que le nombre de grains analysés ici. En plus de cela, le fait que leurs analyses portent sur des poudres déjà faites, ie avec du mica et du graphite mélangés, renforce le problème de la distinction des tailles des différents grains, et notamment de ceux de petites tailles. Ces deux facteurs contribuent à augmenter l'incertitude, et c'est donc avec précaution que leurs résultats [3] et ceux obtenus ici doivent être comparés.

## 4 Confection du sac

Pour des raisons évidentes de conservation du patrimoine, les sacs contenant la poudre sur les Ondes Martenot ne pouvaient pas être utilisés, et il a donc fallu fabriquer de toutes pièces ceux utilisés pour les tests.



(a) Sac de la touche d'expression démonté



(b) Tour à métaux

FIGURE 14 – Usinage des pièces

Tous les matériaux ont été préalablement identifiés et scrupuleusement respectés, et les différentes pièces réalisées au tour à métaux. La confection du sac a en outre nécessité un cuir d'agneau, très fin, qu'on utilise habituellement en mégisserie. Le sac est monté à l'aide d'une section de tube de PVC servant à régler la hauteur générale du sac dans lequel on glisse l'électrode du bas (cf figure 15), fixée préalablement à la rondelle de cuir (cf figure 16). Il suffit donc ensuite de fermer le sac à l'aide d'un fil de lin.

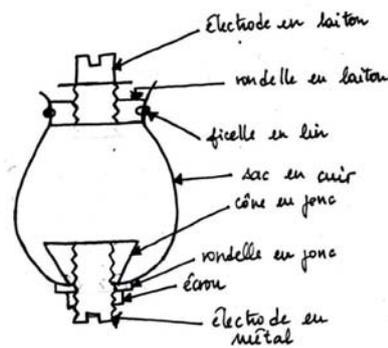


FIGURE 15 – Plan en coupe du sac confectionné

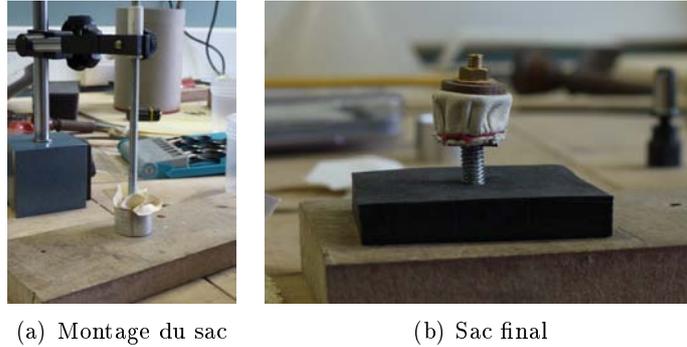


FIGURE 16 – Montage du sac

## 5 Tests des poudres sur l'instrument

Une fois le sac monté, des premiers mélanges ont pu être testés sur l'Onde n°320. Il est important de noter que chaque Onde Martenot est légèrement différente au niveau de la touche d'expression. En toute rigueur, les résultats exposés ici seront donc propres à l'onde n°320.

Quinze poudres ont été réalisées. Cependant, en vue d'une compréhension plus synthétique, on en présentera ici que certaines.

### 5.1 Démarche et paramètres

L'élaboration des poudres finales - mélange de mica et de graphite - dépend de plusieurs paramètres, tout comme le protocole de remplissage du sac :

- la taille des grains de mica (celle du graphite étant imposée, on le rappelle)
- la proportion en mica et en graphite
- le niveau de remplissage du sac

Etant donné le principe de fonctionnement du sac (cf section 1.2), la réflexion sur les proportions de mica et de graphite se fait en *nombre de grains*. Cependant, pour plus de facilité et parce qu'il est nécessaire d'avoir une reproductibilité des expériences, on travaillera plutôt en *proportions massiques*.

Le protocole pour la préparation des poudres est le suivant :

- Le mica et le graphite sont pesés individuellement - avec une précision au centième de gramme.
- La poudre finale est ensuite introduite dans le petit sac, dont on mesure la masse pour travailler à taux de remplissage constant.

On réalise une première poudre avec une proportion massique 50/50 en mica 115 (industriel) et en graphite et une masse de 0,77g pour chaque composant. On acquiert ensuite  $20\log(V3)$ , où  $V3$  est la tension en sortie du sac, à l'aide un programme Matlab .

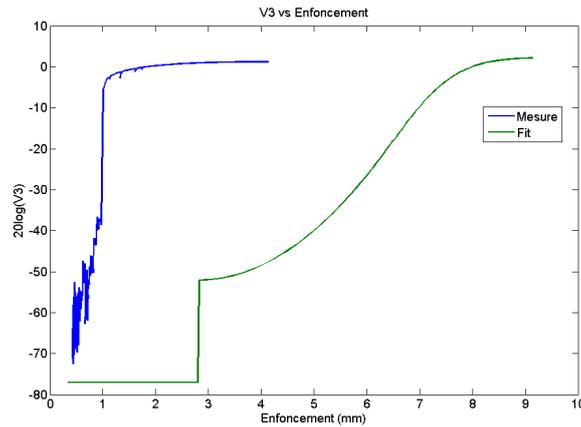


FIGURE 17 – Poudre n°1 - 0.77g graphite/0.77g mica 115

Sur cette figure 17, le *fit* expérimental [4] est en vert, et l'acquisition en bleu.

On remarque que la pente est beaucoup trop élevée, notamment parce que la proportion en graphite est trop grande. L'absence d'une transition "douce" au niveau des -50 dB caractérise une absence quasi-complète d'une nuance piano, ou sinon très difficile à maîtriser par l'instrumentiste.

On élabore donc une autre poudre moins conductrice, avec 0.23g de graphite et 0.90g de mica 115 :

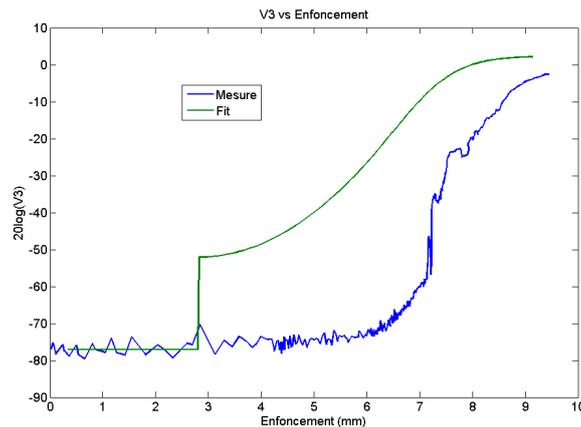


FIGURE 18 – Poudre n°3 - 0.23g graphite/0.90g mica 115

La proportion en mica/graphite semble ici plus juste. L'instant de déclipsage est difficilement distinguable de la nuance piano qui le suit. En effet, les nuances pianos tournent autour de  $10^{-4}$  volts et malgré le passage au log, leur amplitude reste faible et noyée dans le bruit.

On note aussi, à l'oreille, la présence d'un souffle au niveau du timbre, ou de "crachottis", notamment dans les nuances *pianissimo*. La première interprétation consistait à imputer la faute à la mauvaise mise en place du coupe-circuit, qui au cours des manipulations aurait très bien pu se tordre ou se déplacer, et ainsi ne pas remplir son rôle. Mais la remise en place du sac avec la poudre d'origine fait disparaître ces parasites sonores, ce qui montre bien que ceux-ci sont uniquement dus aux poudres que l'on a fabriquées.

Le fait que la pente persiste à être trop forte amène à reconsidérer la taille du grain du mica. En effet, une poudre qui possède des grains de mica plus gros qu'une autre aura tendance à être moins conductrice, à fraction massique ou nombre de grains égaux.

Cette hypothèse est testée dans ce qui suit : on cherche à déterminer l'influence de la taille du mica sur la pente de la courbe, en réalisant trois poudres avec une même proportion massique en mica et en graphite, mais avec des tailles de mica différentes.

A ce moment intervient de nouveau le problème de la différence de distribution des tailles observée au MEB entre les différentes poudres moulées à la main.

Il s'avère qu'une observation au microscope optique vient confirmer ce qu'on observait auparavant à l'oeil nu, à savoir que les poudres sont bien de tailles *différentes*.

On réalise donc trois poudres avec les poudres moulues à 1'30 et 3'30, et le mica 115, plus petit et plus homogène. Ces trois poudres possèdent un peu plus de graphite que la précédente (0.3g graphite, 0.9g mica) afin de corriger le niveau dans les nuances forte, qui semble un peu trop faible.

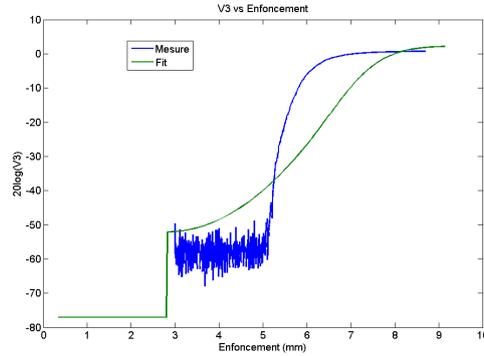


FIGURE 19 – Poudre n°10 - 0.30g graphite/0.90g mica 115

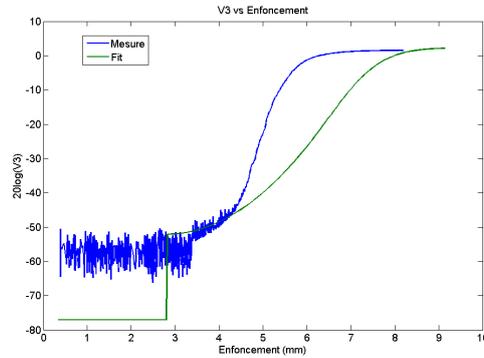


FIGURE 20 – Poudre n°11 - 0.30g graphite/0.90g mica 3'30 12g

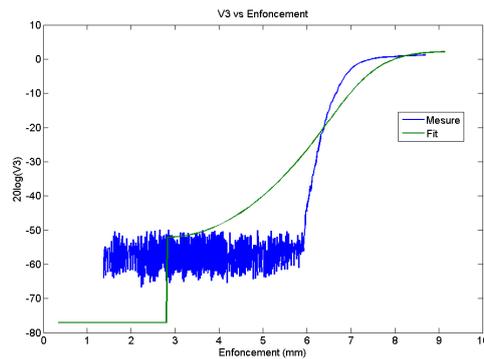


FIGURE 21 – Poudre n°12 - 0.30g graphite/0.90g mica 1'30

Les poudres 10 et 11 (figure 19 et 20) semblent valider l'hypothèse qu'une poudre contenant du mica plus gros possède une pente plus douce.

La poudre 10 possède une pente trop forte et surtout pas assez de puissance dans les *forte*, en revanche la poudre 11 s'approche mieux du fit expérimental. Malheureusement, on dénote toujours à l'oreille la présence d'un souffle ou de crachottis, et ce quelque soit la nuance.

La poudre 12 quant à elle possède une pente trop forte : en effet, les grains de mica y sont plus gros, et la proportion *en nombre de grains* du graphite est trop grande.

On se retrouve donc confronté à deux problèmes majeurs : une pente trop forte (c'est à dire que l'instrumentiste a peu de plage d'enfoncement pour contrôler le passage du *piano* au *forte*), et la présence d'un souffle ou de crachottis, qui viennent altérer sérieusement la qualité du timbre.

La réponse ne semblant pas venir exclusivement de la proportion ni de la taille du mica, c'est donc au niveau des composants qu'il faut regarder. Ainsi, une treizième poudre a été réalisée, identique à la poudre n°11, mais avec un graphite différent (Graphite Sennelier). Malheureusement le résultat n'est pas plus concluant.

N.B : Une mesure statique de résistance a été effectuée avec la poudre 10, afin de vérifier que sa résistance décroît bien exponentiellement avec l'enfoncement [3] (cf Annexe C)

## 5.2 Tests par Valérie Hartman

Valérie Hartman, professeure d'Onde Martenot au Conservatoire National Supérieur de Musique de Paris, a essayé la poudre n°11 (et quelques déclinaisons de cette même poudre).

De cette expérience, on peut retenir :

- Outre le problème gênant des "crachottis", la poudre rend bien les nuances *piano* et *forte* voire *fortissimo* et les notes *staccato*, chose qui n'est pas toujours possible avec les remplaçants sur le marché de la poudre Martenot.
- Cependant, la marge d'enfoncement dans les nuances *pianissimo* et *piano* pourrait être plus grande, c'est à dire qu'il manque une gamme *ppp*. Ceci est confirmé quand on choisit le timbre T (Tutti : somme des différents timbres de l'Onde), qui est un timbre perceptible même dans les très faibles nuances. Ce timbre met en évidence la présence d'une "marche sonore" assez forte sur les premiers millimètres, au moment où le coupe-circuit se déclipse et que les premières nuances apparaissent.
- Les faibles nuances ne sont pas accessibles avec des notes "détachées".

Le fait qu'il soit difficile de faire des "détachés" est notamment dû au fait que la poudre n'est pas réversible en enfoncement : alors que l'intensité du son s'établit progressivement quand on enfonce la touche, elle s'éteint beaucoup plus brutalement quand on la relève.

Le problème de la possibilité d'accéder aux nuances *ppp* et d'avoir une poudre réversible sont cruciales d'après l'ondiste, premièrement parce que la première permet de faire naître le son "à partir du silence le plus complet", et la seconde de jouer des notes détachées sans avoir à remonter la touche jusqu'au coupe-circuit.

Ces nuances extrêmes (*pianissimo* et même *fortissimo*) sont éventuellement plus importantes que la question de la pente, sur laquelle V.Hartman assure qu'il ne faut pas trop se focaliser. En effet d'une Onde à l'autre, la "longueur" de la poudre (ie si elle possède une pente forte ou non) varie, et cette caractéristique fait partie de l'adaptation de l'ondiste à chaque instrument.

## 6 Conclusion

Ce stage a permis de réaliser des premières poudres ayant quelques bonnes caractéristiques (plage de nuances étendue en enfoncement, possibilité de *p*, de *ff* et de *staccato*...) caractéristiques qu'on ne trouve souvent pas simultanément, d'après Valérie Hartman, dans les produits qui tentent de remplacer la poudre Martenot.

Un bon nombre de poudres ont été réalisées en changeant la proportion et la taille des grains de mica, sans pour autant améliorer la présence d'une "marche" sonore dans les nuances faibles, et la présence des parasites sonores. Il semble donc que le problème ne vienne pas de ces paramètres mais des constituants eux-mêmes : en gardant à l'esprit que Martenot était bricoleur et utilisait parfois du matériel de récupération, il est fort possible que le mica et le graphite utilisés dans le cadre de nos expériences ne possèdent pas les bonnes propriétés diélectriques du fait de leur provenance industrielle. Il faudrait donc comparer les propriétés diélectriques des différents micas.

Quant aux problèmes de granulométrie rencontrés au MEB et au microscope optique, il faudrait procéder à une statistique sur un plus grand nombre d'échantillons de poudres usées. Le protocole d'observation au microscope peut lui aussi être revu (observation sur d'autres supports, observation en réflexion...)

D'autre part, une recherche documentaire sur les matériaux utilisés à l'époque de Martenot va se mettre en place, et ouvrira certainement d'autres pistes d'amélioration.

Ce stage m'a permis de beaucoup apprendre sur les différentes techniques scientifiques de préparation et d'analyse (Optique ou MEB) d'échantillons, les techniques artisanales d'usinage du métal, et d'acquérir des connaissances sur différents matériaux en général.

# Résumé / Abstract

Ce stage s'est intéressé à la touche d'expression des Ondes Martenot, un instrument électronique qui a maintenant un siècle. Le fonctionnement de cette touche est fondé sur un petit sac rempli d'une poudre, qui joue le rôle d'une résistance variable. Les caractéristiques de cette poudre restent méconnues, et l'objet de ce stage est de tenter d'en reproduire un échantillon, afin de faire face au vieillissement de ses composants et préserver ainsi l'instrument et le geste musical qui l'accompagne.

Cette poudre contient un isolant (mica) et un conducteur (graphite). Dans un premier temps, ces composants ont été moulus au moulin à café (comme le faisait, on le suppose, Martenot). Un sac -facsimilé du sac d'époque- a été ensuite fabriqué, et différents mélanges de poudres réalisés - avec différentes proportions et tailles de grains.

Ces poudres ont été ensuite testées sur l'instrument, et la courbe de leur résistance a été comparée à celle que l'on obtenait pour une poudre usée. La "meilleure" poudre a ensuite été soumise à l'appréciation de Valérie Hartman, professeure d'Ondes Martenot au CNSM, afin d'avoir son avis musical sur le travail réalisé.

De l'avis de l'instrumentiste il ressort que la poudre possède une bonne gamme de nuances entre le *piano* et le *forte*, mais qu'elle reste imparfaite au niveau des faibles nuances (présence d'une "marche sonore"), de sa réversibilité (hystérésis de l'intensité du son par rapport à l'enfoncement), et surtout de la qualité de son timbre, car on dénote la présence de parasites sonores ("crachottis") qui viennent sérieusement l'altérer.

Les pistes d'amélioration portent plutôt plus sur les composants eux-mêmes que sur leurs proportions. Une analyse plus complète des poudres usées et un travail bibliographique plus conséquent sur les composants utilisés à l'époque de Martenot permettront peut être une amélioration significative et, à terme, la réalisation de la poudre tant convoitée.

This study relates to the " expression key " of the Ondes Martenot, an electronic musical instrument which was invented a century ago. The key operates through a small bag filled up with a powder playing the role of a variable resistance. The physical properties of this powder are still unknown, although its skill was shown to deteriorate with time. The goal of our work was to try to reproduce a powder with adequate characteristics, therefore preserving the life time of the instrument components and the musical technique associated with it.

The powder contains an isolating material (mica) and a conductive material (graphite). As a first step, these components have been grinded with a coffee grinder (as Martenot presumably used to do). Various mixtures of powder based on different grain sizes or ingredient proportions have been elaborated. A facsimile (with regards to the original one) bag was then made. The different powders have been tested with the instrument and the corresponding resistance curves compared with the curve of a used powder. The instrument equipped with the " best " of our powder mixtures has been played by Valérie Hartman, Ondes Martenot teacher at the CNSM, who could then give us her opinion on the musical skill of the powder. According to her, our powder was able to produce an adequate range of nuances from piano to forte but was still imperfect as to producing weak nuances (a sound step was present), to its reversibility (an hysteresis exists in the sound intensity as a function of the key driving in) and, more importantly, to the quality of its timbre (some "sizzling" was noticed, deteriorating the sound).

Better results are expected to be obtained by improving the components themselves rather than their proportion. A more thorough analysis of the used powders and a systematic search in the existing literature of information concerning the components originally used by Martenot may bring significant improvement to the powder performance.

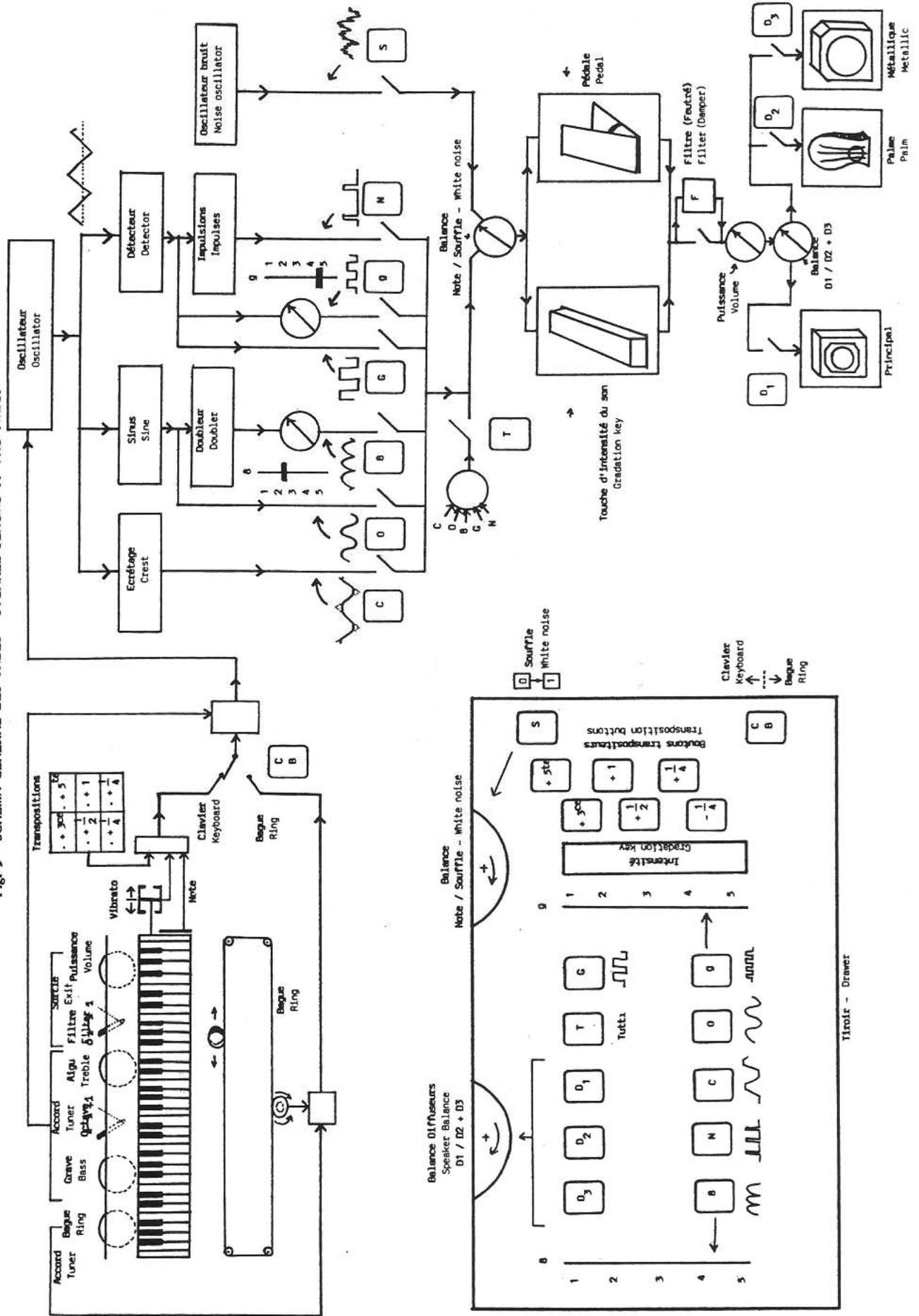
## Références

- [1] Martenot, *Brevet d'invention : Résistance variable pour instruments électriques et radio-électriques*, publié 8 mai 1931  
E Leipp et M Martenot, *Les Ondes Martenot*, Bulletin du Groupe d'Acoustique Musicale (GAM), 1972
- [2] J Loriod, *Technique de l'Onde Electronique*, Ed Alphonse Leduc, 1982
- [3] I Guillot, V Hartman-Claverie et S Vaiedelich, *Maurice Martenot, la poudre de l'enchanteur*, CIM09 (fifth Conference on Interdisciplinary Musicology), octobre 2009
- [4] Meurisse, *Etude d'un système à retour d'effort simulant la touche d'expression des Ondes Martenot*, 2011



# A Annexe : Schéma de fonctionnement de l'Onde Martenot

Fig. 3 - SCHEMA GENERAL DES ONDES - OVERALL SCHEME OF THE ONDES



## B Annexe : Fits expérimentaux

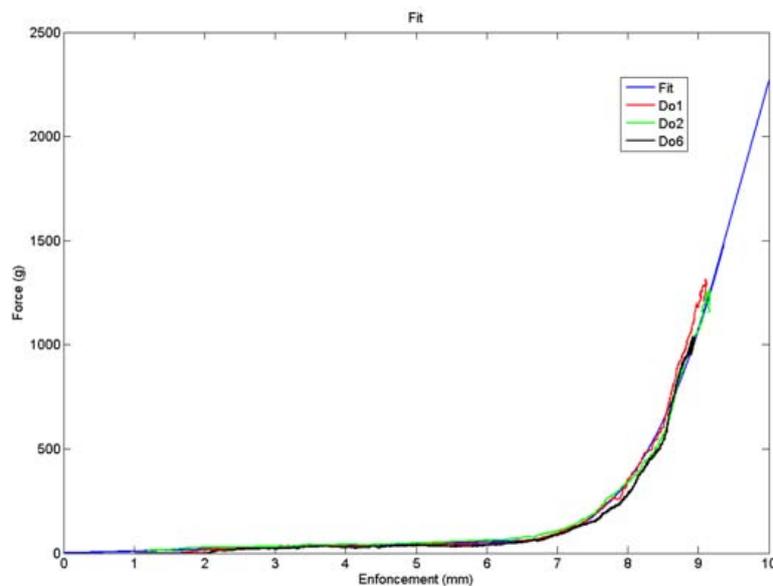


FIGURE 22 – Force appliquée sur la touche en fonction de l'enfoncement

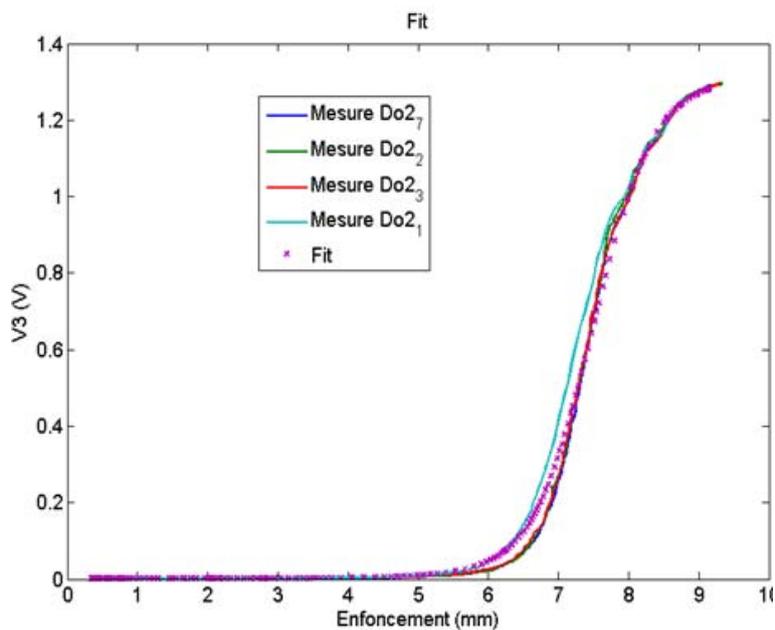


FIGURE 23 – Tension en sortie du sac en fonction de l'enfoncement de la touche



## Poudre de graphite

### Domaines d'applications :

Résistance chimique, modificateur de friction, propriétés lubrifiantes, réduction de l'usure, résistance aux chocs thermiques, propriétés amortissantes, conductibilité électrique et thermique.

### Données techniques / valeurs caractéristiques :

<i>Teneur en carbone :</i>	> 99,9 %
<i>Structure cristalline :</i>	Lamellaire
- espacement inter-plan $c/2$	0.3355 nm
- dimension des cristallites $L_c$	> 100 nm
<i>Pourcentage d'humidité :</i>	< 0,1 %
<i>Masse Volumique :</i>	
- dans le xylène	2,248 g / cm <sup>3</sup>
- dans le mercure	2,20 g / cm <sup>3</sup>
- Scott	0.22 g / cm <sup>3</sup>
<i>Surface spécifique BET :</i>	9 m <sup>2</sup> . g <sup>-1</sup>
<i>Microdureté Vickers :</i>	8,3 10 <sup>7</sup> Pa
<i>Résistance électrique parallèle à la direction de compactage :</i>	
$\rho = 2,5 \cdot 10^5$ Pa	9,6 . 10 <sup>-5</sup> Ohm. m
<i>Conductibilité thermique :</i>	
- à 40 °C : 16,3 . 10 <sup>-1</sup> W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	- à 94 °C : 16,3 . 10 <sup>-1</sup> W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>

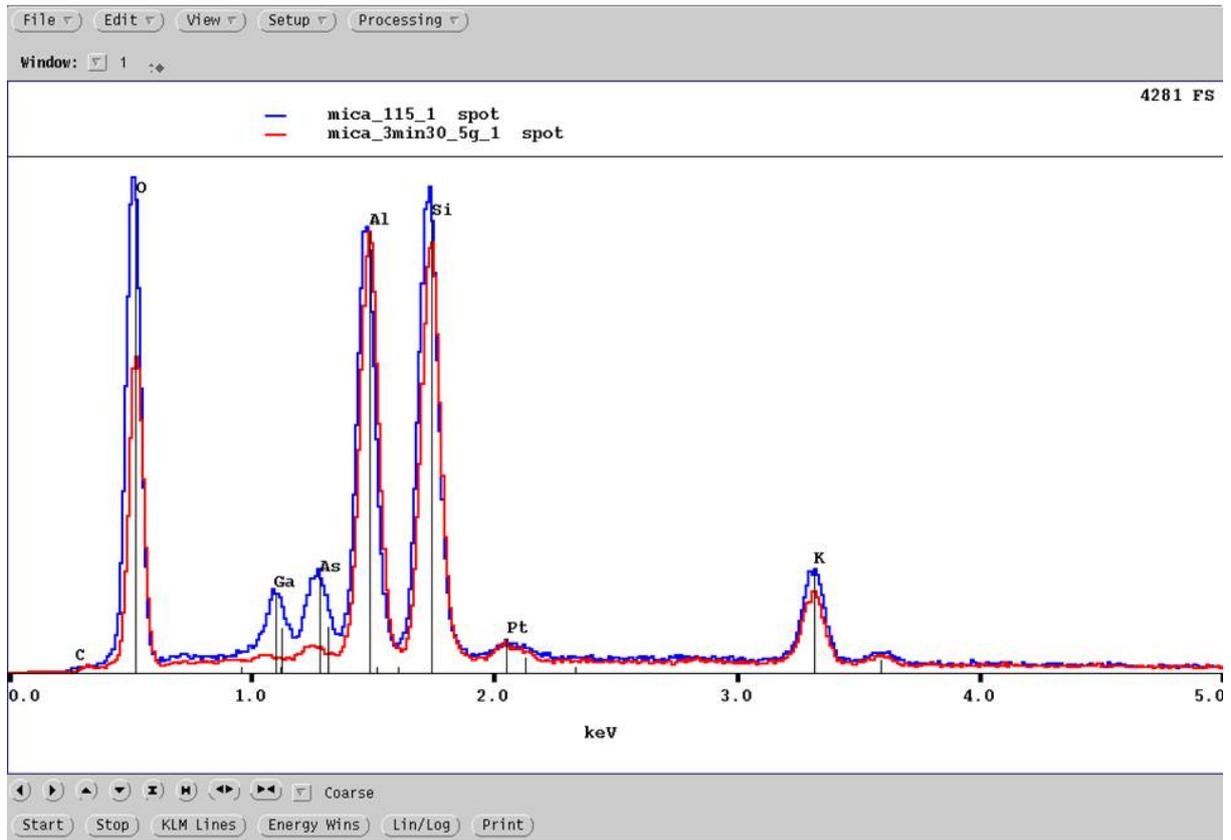
### Taille des particules en microns ( Laser diffraction ) :

<2	0.8 %
< 4	7.1 %
< 8	22.2 %
< 16	44.4 %
< 32	77.1 %
< 48	93.0 %
< 64	99.0 %
< 128	100.0 %

### Éléments en traces (ppm) :

Aluminium	6	Nickel	2
Arsenic	<0.5	Plomb	0.5
Calcium	100	Antimoine	<0.1
Chrome	2	Silicium	90
Cuivre	2	Titane	5
Fer	40	Vanadium	2
Magnésium	1	Soufre	60
Molybdène	<0.5		

D Annexe : Diffraction aux rayons X du mica MICA-MU M 2/1 et du mica BRIOMICA 115



## E Annexe : Mesure de résistance statique

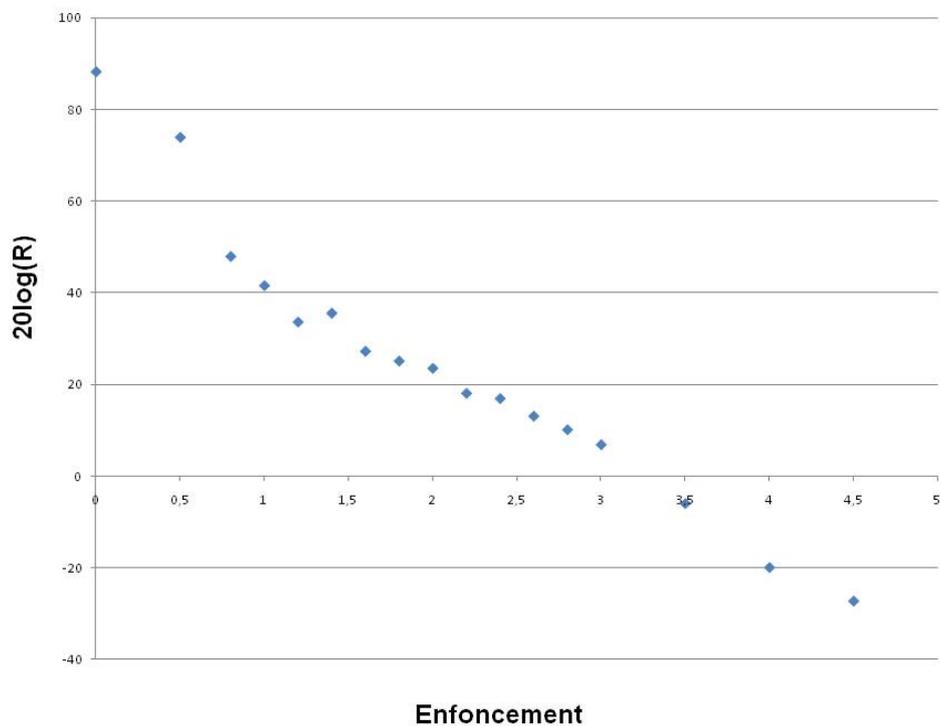


FIGURE 24 –

On retrouve la même allure que celle mesurée par S. Vaiedelich et I. Guillot sur les poudres usées (figure 5), à la différence que la pente est plus raide, notamment par le fait que, dans la poudre 10, la proportion en graphite est trop forte (cf figure 19)