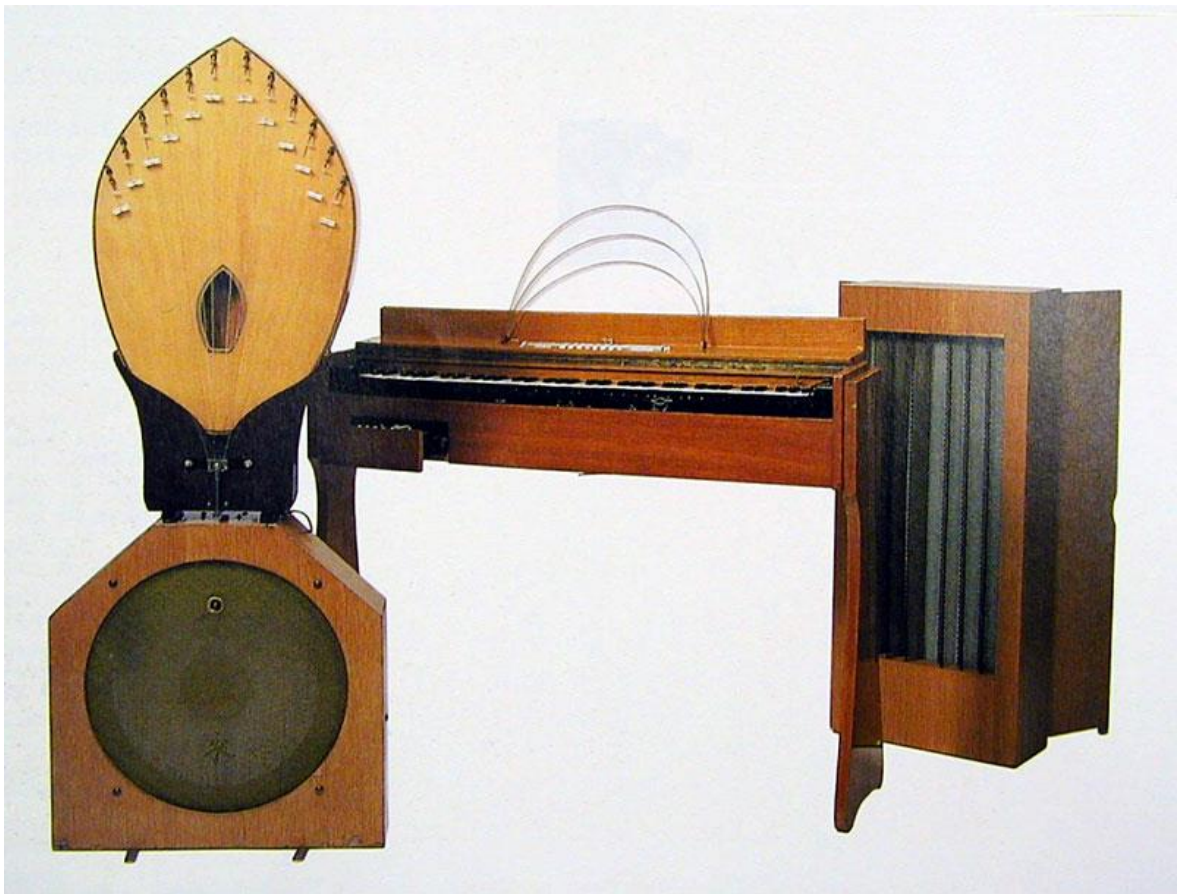


Les ondes Martenot, Analyse technique Et perspectives d'avenir



Mémoire de fin de formation : Audio engineer, SAE Paris.

Réalisé par M. FRANCOIS Maxime, AE906F.

Table des matières

- Préface
- Introduction
- 1. Présentation générale de l'instrument et de ses diffuseurs
- 2. L'instrument :
 - 2.1 : Le ruban
 - 2.2 : Le clavier expressif
 - 2.3 : La touche
 - 2.4 : Pédale, aiguilles et boutons transpositeurs
 - 2.5 : Tiroir, timbres et synoptique de l'instrument
- 3. Les diffuseurs :
 - 3.1 : Généralités, connectique, alimentation
 - 3.2 : Principal
 - 3.3 : Résonance
 - 3.4 : Le métallique
 - 3.5 : La palme
- Conclusions
- Bibliographie et remerciements

Préface

Les ondes Martenot, ancêtre lointain du synthétiseur, est un instrument auquel je voue une grande passion. M'intéressant depuis de longues années à la synthèse sonore, je fis la rencontre de cet instrument au conservatoire de Strasbourg où Thomas Bloch (qui en donne l'enseignement) me le présenta. Je fus alors conquis par les sonorités très particulières qu'il produit et surtout par les possibilités musicales et d'expression qu'il donne au musicien. Je n'avais jamais vu un instrument électronique sur lequel il est vraiment possible d'exprimer sa sensibilité, ses émotions, de la même manière que sur un violoncelle ou tout autre instrument dit « classique ». Je m'inscrivis à la rentrée de Septembre 2005 au CNR de Strasbourg dans la classe de Thomas Bloch et Christine Ott pour apprendre à en jouer et préparer en parallèle les concours d'entrée aux formations d'ingénieur du son. Cette année me permit d'apprendre les bases du jeu aux ondes Martenot et de cultiver mon goût pour l'instrument. Je pris également conscience de l'état du parc instrumental et de la situation des ondistes, confrontés à un problème évident de manque d'instrument et de dégradation des modèles « vintages ». Si aujourd'hui quelqu'un désire être ondiste professionnel, il ne peut compter pour se procurer un instrument ni sur les modèles originaux fabriqués par Maurice Martenot (au nombre de 400 environ dans le monde), ni sur le modèle Ondéa commercialisé en 2005 par la société SEAM et dont le système de production ne permet pas de satisfaire la demande. Etant moi même désireux de pouvoir jouer des ondes et de posséder un instrument, je m'intéressai à sa fabrication. C'est en 2006 que l'idée se développa. Je pus mettre en application les connaissances acquises au fur et à mesure de ma formation à la SAE pour comprendre les aspects techniques des ondes et imaginer des améliorations. Lors de mes rencontres notamment avec Jean-Louis Martenot (fils de l'inventeur et créateur du modèle numérique) et Ambro Oliva (créateur de l'Ondéa), je pus confronter ces nouvelles idées aux avis des personnes maîtrisant le mieux la fabrication de l'instrument et prendre conscience de certains de ses enjeux techniques. Je commençai également la construction d'un prototype de contrôleur à ruban.

Ce mémoire est le résultat de ces investigations. Il représente un état des lieux des connaissances que j'ai acquises sur les aspects techniques de l'instrument et des idées que j'ai élaborées concernant son évolution. Si cet état des lieux est un travail qu'on peut considérer comme achevé, mes recherches doivent continuer pour permettre des réalisations performantes et abouties. Aussi, l'électronique des systèmes de génération de timbre et les caractéristiques acoustiques des diffuseurs sont des sujets qui ne seront abordés dans ce mémoire que de manière superficielle et qu'il me faudra approfondir en priorité dans mes recherches à venir.

Introduction

Les Ondes Martenot est le nom donné à un instrument de musique électro-acoustique inventé en 1928 par le français Maurice Martenot. Il est l'un des premiers instruments de musique à utiliser l'électricité pour produire un son. Avec le Theremin, le Trautonium et l'Ondioline, il constitue un ancêtre important du synthétiseur et des dispositifs modernes de musique électronique. Ces instruments ayant dicté nombre de règles de la création d'instruments de musique et de la création musicale elle-même (puisque à partir du XXe siècle et de plus en plus, on compose à partir des instruments et des outils eux-mêmes et non plus avec une feuille de papier et un crayon) leur étude permet de comprendre bien des tournants dans l'évolution technologique et artistique musicale de ces 90 dernières années.

Afin de saisir l'ampleur de l'influence de l'instrument, on peut nommer de manière non exhaustive les auteurs du répertoire écrit pour l'instrument et quelques formations modernes dans lesquelles il est utilisé. Le compositeur ayant le plus écrit pour les ondes est Olivier Messiaen qui est très 'proche' de l'instrument puisque son épouse Yvonne Messiaen est la sœur de Jeanne Loriod qui est l'interprète et le professeur le plus important de l'histoire de l'instrument ayant rédigé une méthode d'apprentissage. Jeanne et Yvonne (au piano) composeront, joueront et enregistreront ensemble de nombreuses œuvres. O. Messiaen composera pour onde seule, avec piano, avec orchestre et une pièce pour six ondes. Parmi les autres compositeurs, on peut citer Edgar Varèse, Jacques Charpentier, Pierre Boulez, Bohuslav Martinu, Maurice Ravel... Dans la musique populaire (plus ou moins populaire...), les formations et artistes ayant utilisé l'instrument sont nombreux : Radiohead, Tom Waits, Frank Zappa, Joe Jackson et en France : Leo Ferré, Jacques Brel, Yann Tiersen, Emilie Simon, Arthur H, Dominique A, Zazie ... (et même Lara Fabian). L'engouement pour cet instrument n'est pas anodin et certainement dû aux grandes innovations qu'il a apporté et à certaines qualités dont il a, encore aujourd'hui, l'exclusivité.

L'invention des Ondes Martenot apporte trois concepts importants et nouveaux dans l'histoire de la musique et des technologies de lutherie.

L'utilisation de l'électricité comme source sonore est une idée naissante au début du XXe siècle. On sait déjà s'en servir pour transformer et transmettre un signal acoustique, avec la radiophonie, mais la création de sons musicaux avec à son origine l'électricité apparaît plus tard. C'est le russe Lev Sergeïevitch Termen qui, le premier, a réalisé un instrument de musique à partir de composants électriques : travaillant sur les transmissions au moment de la première guerre mondiale, il décide d'utiliser les vibrations des lampes triodes pour créer un son. En utilisant deux tubes triodes oscillant à des fréquences élevées (hors de l'air audible) dont une fixe (dans le cas du theremin, 170kHz) et une variable, il obtient, par sommation des deux oscillations et grâce au phénomène de battements, une

oscillation dont la fréquence est la différence des deux fréquences élevées. Ce type d'oscillateur est dit hétérodyne, pour générer par exemple un son de 440 Hz, on sommerait deux oscillations dont la différence des fréquences :

$$170\,000 - 169\,560 = 440 \text{ Hz.}$$

Il ne reste qu'à convertir la variation de tension en variation de pression acoustique via un haut parleur et on obtient un son qui est, pour plusieurs raisons, différent des sons acoustiques obtenus par des phénomènes purement mécaniques (instruments 'classiques').

D'une part, la forme d'onde de ces signaux peut être très proche d'une sinusoïde pure de par leur mode de génération et en combinaison avec l'utilisation de filtres (qu'on détaillera plus tard). Les traitements dans le domaine électrique permettent également l'obtention de formes d'ondes plus ou moins riches en harmoniques qui sont impossibles ou difficiles à générer de manière mécanique, par exemple un signal carré (bien carré) ou un signal impulsionnel ou encore le renforcement d'une harmonique (y compris les 'sous harmoniques') à un niveau bien plus élevé que le fondamental sans générer un deuxième son (sans générer les harmoniques de l'harmonique...).

D'autre part, lorsqu'on décide de produire un son à partir d'un oscillateur, on ne demande pas à l'oscillateur de se mettre en route à ce moment précis, il oscille continuellement dès lors que l'appareil est sous tension. Initier un son avec ce type d'appareil consiste en fait à ouvrir la porte derrière laquelle se cache une source d'oscillation qui est continuellement active. Dans sa forme la plus simple, et c'est le cas dans les Ondes Martenot et le Theremin, l'ouverture de cette porte se résume à l'augmentation du niveau électrique dans le circuit après l'oscillateur, ou plutôt à la diminution de l'atténuation de ce niveau (à l'aide d'un VCA, voltage controlled attenuator). Dès lors, la notion de transitoire d'attaque est pour ces sons très particulière voire inexistante ; si on définit cette notion comme suit : « La transitoire d'attaque est la courte partie du son qui décrit son attaque. Elle est principalement constituée de composantes de bruit et est déterminante dans la reconnaissance du son. » (Fabien, cours de théorie audio) on peut alors dire que les sons générés de cette manière sont soit dépourvus de transitoire d'attaque, soit que cette transitoire est particulière car elle ne contient pas de composantes de bruit et est identique spectralement au reste du son. Il en va de même pour la transitoire d'extinction. Cependant, si le spectre de ces transitoires ne permettent pas de les définir comme telles, celles-ci sont bel et bien à la base de la reconnaissance du son de ces instruments souvent décrit comme « éthéré, aérien » ; c'est cette absence des composantes caractérisant les sons créés mécaniquement qui lui donnent ce côté éthéré et dématérialisé.

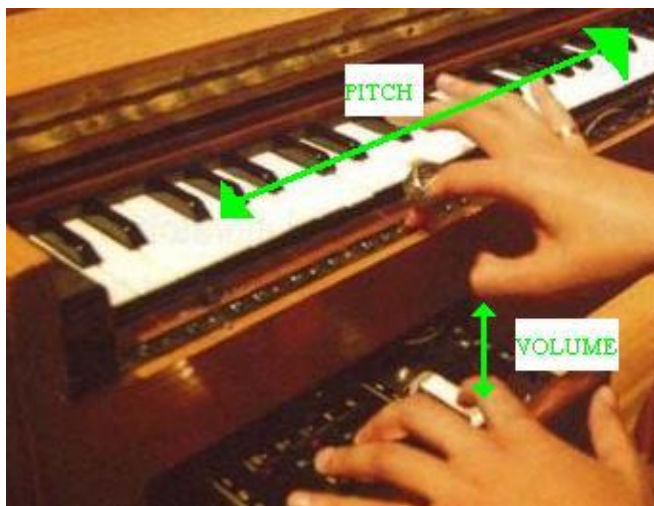
Enfin, en 'régime continu', le son d'un oscillateur est stable spectralement et potentiellement infini tant que l'appareil reste sous tension, la longueur des 'notes' n'est donc pas limitée par le souffle de l'instrumentiste ou son bras, ce qui est rare dans les instruments dits classiques.

Les sons créés à l'aide d'une oscillation électrique entretenue sont donc nouveaux dans le paysage musical du début du XX^e siècle de par leur particularité spectrale, leurs transitoires sans bruit et leur stabilité et durabilité en régime

continu. Bien que les ondes Martenot ne soient pas historiquement le premier instrument à utiliser cette technologie (le Theremin l'a devancé d'une décennie) ses autres qualités notamment en matière d'expression et de musicalité lui donnèrent un certain cachet dans le domaine de la création musicale et en firent un représentant majeur des instruments électriques.

La deuxième innovation importante apportée par les Ondes Martenot est la manière dont on en joue. Celle-ci est à la fois limitée par la technologie employée par l'instrument et influence dans les inventions postérieures d'instruments de musique électronique.

Le musicien peut agir sur trois dimensions : la fréquence, l'amplitude et le timbre. La véritable nouveauté d'un point de vue sonore est que l'action sur l'un de ces paramètres peut se faire de manière indépendante des deux autres. Ainsi, on peut parcourir toute la tessiture de l'instrument (près de 9 octaves sur les modèles les plus évolués) sans altérer (ou très peu) le timbre et à une nuance constante, ce qui est difficilement réalisable avec les instruments acoustiques où ces trois dimensions sont étroitement liées. Le Theremin utilise, pour la gestion de l'amplitude et de la fréquence, deux antennes, la proximité des mains du musicien avec ces dernières permet la variation d'une capacité (le musicien, relié à la masse, est une des plaques du condensateur, l'antenne est l'autre) et détermine ainsi la note et la nuance. Si ce système est efficace et visuellement impressionnant, celui développé par Martenot est beaucoup moins hasardeux et favorise la musicalité et l'expression.



Ondes Martenot



Theremin

L'amplitude est gérée à la main gauche via la touche dite d'expression (terme que l'on retrouvera plus tard dans la norme midi), plus le musicien appuie, plus le son est fort, une pédale d'expression (sans doute la première de l'histoire) permet de compléter le rôle de cette touche ou de la remplacer lorsque les deux mains du musicien sont sur le clavier.

Plusieurs éléments permettent de faire varier la fréquence. On en utilise principalement deux : le clavier et le ruban. Le clavier est semblable à celui qu'on trouve sur un piano ou un synthétiseur, les touches sont plus petites et moins

larges. Il fonctionne comme la plupart des claviers monodiques : la touche enfoncée la plus grave détermine la note. Les modèles existants n'intègrent pas de fonctions de vélocité ou d'aftertouch par contre, une qualité exclusive à ce clavier est qu'il est suspendu et peut osciller latéralement autour d'une position de repos ; lorsque le musicien vibre avec sa main ou son bras, ces mouvements permettent eux aussi de faire varier la fréquence, rendant possible un vibrato au clavier et la réalisation d'intervalles plus petits que le demi ton tempéré. Cette fonctionnalité, sorte de pitch bend ultrasensible intégré au clavier, a été développée par Maurice Martenot en 1937 sous le conseil de Maurice Ravel, elle donne au clavier une faculté d'expression inédite. L'autre mode de contrôle de la fréquence est le ruban : le musicien glisse son index de la main droite dans une bague fixée sur un ruban ou câble qui coulisse parallèlement au clavier, en plaçant cet index en face d'une des notes du clavier, on obtient cette même note au ruban, la variation de fréquence est continue sur les six octaves de largeur de l'instrument permettant des glissandi.

Le musicien peut également choisir le timbre de son instrument à partir des switches et faders présents sur le tiroir (sur lequel repose aussi la touche mentionnée plus haut). A chaque switch correspond un timbre et un certain traitement électrique sur le signal, la combinaison de plusieurs switches permet la création de timbres plus complexes, nous reviendront en détail sur ce système de générateur de timbres. S'il n'est pas très évolué au regard de systèmes plus récents, il permet déjà des changements de timbre (majoritairement de manière discrète) importants et en temps réel.

La troisième innovation apportée par les ondes Martenot est la notion de diffuseur. Les instruments électroniques de l'époque étaient destinés à évoluer dans des formations musicales 'classiques', par exemple un orchestre symphonique, et devaient de ce fait pouvoir fournir un niveau sonore comparable à celui d'un instrument traditionnel. Les hauts parleurs et systèmes d'amplifications faisaient donc partie de l'instrument. Maurice Martenot, ne se contenta pas de créer un HP adapté à son instrument, il créa quatre diffuseurs (haut parleurs spéciaux) qui contribuent de manière primordiale à la signature sonore de l'instrument. Seul le diffuseur principal est semblable à un HP tel qu'on le connaît aujourd'hui ; le diffuseur D2 (résonance) est un HP dynamique dont la membrane est mise en vibration de gros et longs ressorts (environ 2cm de diamètre, sur toute la largeur de la membrane) disposés devant elle et donnant un effet semblable à celui qu'on obtient avec une reverb à ressorts en boîte ; le diffuseur D3 (métallique) est également un HP dynamique dont la membrane est un gong d'un demi mètre de diamètre environ ; enfin, le diffuseur D4 (palme) est une pièce de lutherie en forme de palme avec douze cordes sur chaque face, les cordes sont reliées à une extrémité au moteur du haut parleur dont elles constituent l'équipage mobile, les vibrations acoustiques sont rayonnées par la caisse. Ces diffuseurs permettent la génération de sons nouveaux et l'idée de les intégrer à l'instrument et de les impliquer dans la création du son est intéressante, elle sera partiellement exploitée plus tard avec les amplificateurs pour guitare et

basse électrique qui font eux aussi partie de l'instrument du point de vue de l'ingénieur du son, bien qu'ils n'aient pas une si grande influence sur le son.

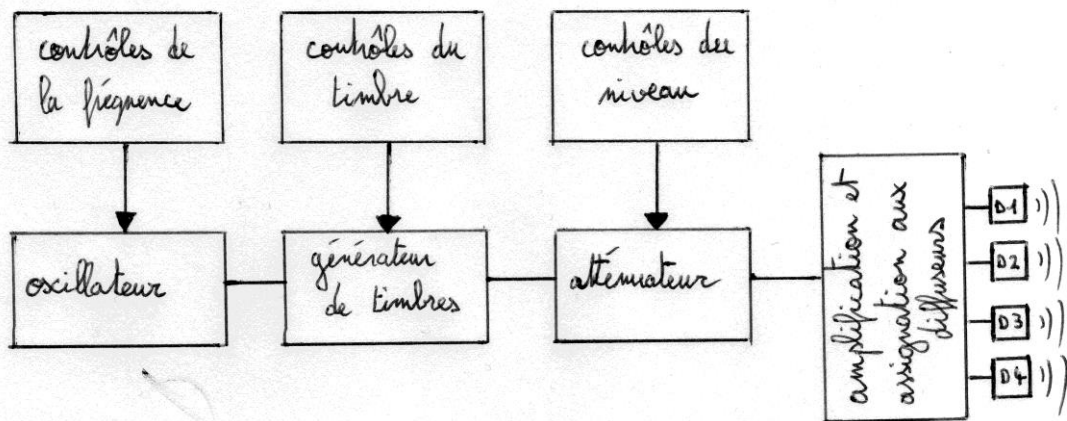
L'onde est un instrument élaboré qui, à l'aube de l'ère des instruments électriques, va dicter certains principes et proposer des idées qui influenceront les inventions postérieures. L'instrument est malheureusement rare, peu fabriqué et donc peu accessible, les exemplaires 'vintage' (dont le nombre peut être estimé à 400) tombent en panne et le parc instrumental aurait bien besoin d'être élargi et renouvelé. Le but de ce mémoire est d'analyser, du point de vue du technicien, les différentes parties qui constituent les ondes Martenot pour en dégager les points forts et les points faibles afin d'établir pour chacune d'entre elles s'il est judicieux, au regard des nouvelles technologies (notamment dans le domaine numérique), de les reproduire et si oui, d'en définir un modèle moderne et intelligent.

1. Présentation de l'instrument et de ses diffuseurs

Cette section a pour but de présenter les Ondes Martenot dans leur globalité, instrument et diffuseurs. On y précisera l'architecture de l'onde selon les modèles, la manière dont les divers éléments sont agencés entre eux et leurs interactions ; leur description précise sera l'objet des deuxièmes et troisièmes parties.

N'ayant pas pu avoir accès aux plans et schémas d'aucun des différents modèles, toutes les affirmations qui suivent sont élaborées à partir d'observations de trois modèles et d'une rencontre avec le fabriquant de l'un d'entre eux (ondéa).

L'instrument, dans son architecture, s'organise autour des trois dimensions sur lesquelles le musicien peut agir, à savoir la fréquence, le timbre et l'amplitude. Les divers éléments capables d'agir sur la fréquence (contrôleurs de fréquence) commanderont électriquement l'oscillateur, le signal sortant de l'oscillateur passera ensuite à travers un circuit traitant sa forme d'onde (contrôleurs de timbres) puis dans un dispositif asservi (par les contrôleurs d'amplitude) chargé de la gestion du niveau électrique du signal. Le musicien peut agir sur un deuxième axe, celui des diffuseurs ; en effet, c'est lui qui avant ou pendant sa performance peut choisir quels diffuseurs il utilisera pour réaliser un son. Dans la musique classique et contemporaine, les indications de timbre et les diffuseurs à utiliser sont notées sur la partition, comme on indiquerait 'pizz' ou 'arco' pour un instrument à cordes par exemple. Le musicien peut donc à l'aide d'interrupteurs et de curseurs choisir d'envoyer un signal vers tel ou tel diffuseur et parfois régler le niveau d'envoi. On a donc un premier schéma de principe, très simple, résumant l'architecture des ondes Martenot.



Pour aller plus loin, il faut s'intéresser au 'centre névralgique' de l'instrument situé dans le tiroir à gauche de l'instrument et contrôlé par la main gauche du musicien. Les trois modèles (hors diffuseurs) étudiés dans ce mémoire sont les suivants :

- Un modèle à lampes créé par Maurice Martenot. (~ 1960)
- Un modèle à transistors créé par Maurice Martenot. (~ 1975)
- Un modèle de l'Ondéa (onde Martenot 'nouvelle génération') créée par la société SEAM (~2005)

Ces trois modèles sont ceux de la classe du CNR de Strasbourg.

Les tiroirs des modèles Martenot (à partir du modèle 7) et Ondéa sont assez similaires et on retrouve sur chacun d'entre eux des éléments génériques avec lesquels les musiciens sont familiers :

- La touche d'expression (qu'on détaillera plus loin)
- Un switch permettant de choisir le mode principal de gestion de la commande de fréquence (ruban ou clavier)
- Les aiguilles et boutons transpositeurs (contrôleurs de fréquence qu'on détaillera plus loin)
- Un potentiomètre gérant le volume global de l'instrument
- Les switches et faders/potentiomètres gérant l'envoi aux diffuseurs
- Les switches et faders gérant le timbre

Ainsi qu'une prise femelle permettant la connexion de la pédale d'expression.

D'autres éléments sont disposés sur le 'corps' de l'instrument :

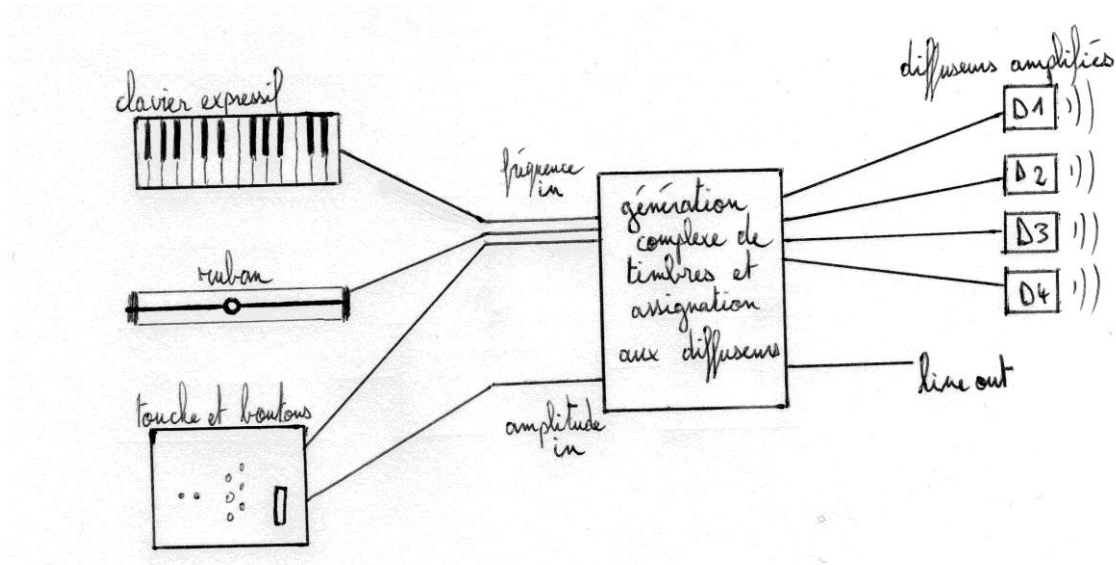
- Les potentiomètres d'accord de la bague et du clavier
- Un switch grave/aigu permettant de transposer la bague et le clavier d'une octave
- Un switch dit 'feutre' qui applique un filtre sur le signal audio, 'post timbre'.
- Arrivée d'alimentation et power switch.

On ne trouve sur les modèles Martenot qu'une seule sortie audio, amplifiée, qui comporte les signaux destinés aux quatre diffuseurs, véhiculés dans un même câble multipaire (câble qui sera branché sur le diffuseur principal qui possède lui-même deux ou trois sorties destinées à connecter les autres diffuseurs). L'Ondéa

dispose en plus d'une sortie ligne. Les quatre diffuseurs (principal, résonance, métallique et palme) sont donc en principe les seules sources acoustiques émanant de l'instrument. Ces diffuseurs ne sont pas des HP standard et leur but n'est pas la fidélité dans la reproduction d'un contenu musical. Ils jouent un rôle dans la création du son et leurs spécifications sont pensées dans cette optique ; on ne recherchera pas une bonne réponse fréquentielle ou impulsionnelle sur la palme par exemple, on cherchera à ce qu'elle « chante » bien.

Les ondes Martenot ont été inventées à une époque où l'audio était un domaine technique hors de portée du grand public, elles ont été pensées comme un instrument classique et de ce fait, le musicien (l'ondiste) n'a que peu accès à la partie technique et électrique de l'appareil ; il censé pouvoir s'installer sur scène, allumer son instrument et jouer sans avoir à se préoccuper de connectique, d'amplification ou de choix des HP. Les choses ont changé par la suite à mesure que les musiciens s'initiaient aux technologies et il serait aujourd'hui peu concevable de commercialiser un synthétiseur démunie de sorties lignes. Une branche de la musique électronique au contraire, celle de la synthèse modulaire, préfère donner l'accès au musicien (qui a alors intérêt à dominer la technologie audio et de traitement du signal) à un maximum de paramètres et de variables, multipliant les entrées, sorties, inserts et contrôles précis du circuit électrique. Dans cet esprit et sans exiger du musicien un savoir technique trop large, on peut concevoir une nouvelle onde Martenot qui serait segmentée en modules ; modules qui une fois interconnectés reconstitueraient un instrument similaire au modèle 'vintage'. L'avantage de cette structure modulaire est de permettre l'utilisation de chaque élément dans un but différent de celui qui auquel il était destiné de manière figée par les constructeurs d'ondes ; on pourrait par exemple utiliser le ruban pour piloter le temps délai d'un périphérique agissant sur le son provenant du clavier, ou utiliser ce dernier pour piloter des instruments virtuels. Il serait aussi possible de rajouter des fonctionnalités à l'instrument, d'altérer par exemple le timbre en temps réel avec un LFO (low frequency oscillator). La maintenance en serait également facilitée puisqu'on pourrait facilement localiser une panne et intervenir sur le module concerné. Cette structure modulaire serait plus viable d'un point de vue commercial puisqu'elle permettrait à des musiciens n'étant intéressés que par une partie de l'onde, typiquement le ruban ou un diffuseur en particulier, d'être satisfaits.

Voici un exemple de ce que pourraient être une telle structure et ses modules.



Il reste à étudier les éléments de l'onde qui constitueraient ces éventuels modules et à les repenser selon les nouvelles technologies et cette idée de structure.

2. Etude des éléments constituant l'onde

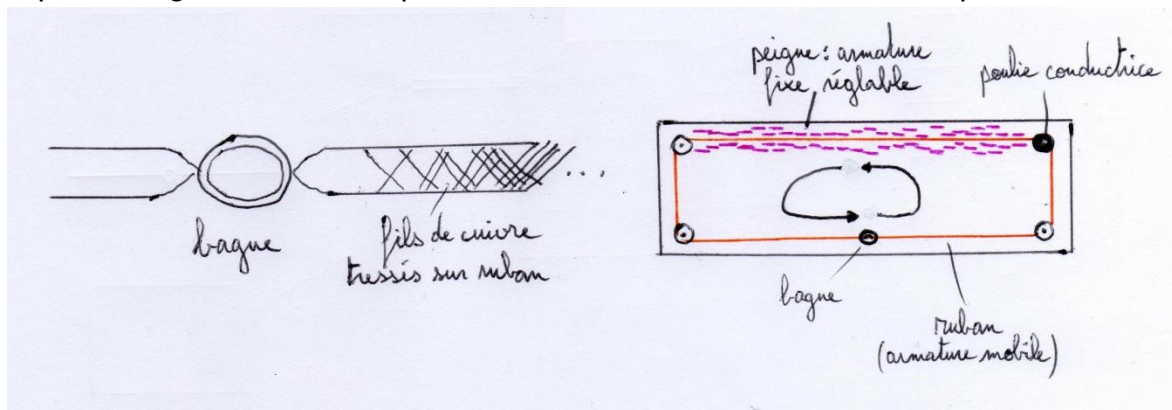
2.1 Le ruban

Le ruban est l'élément des ondes le plus élémentaire d'un point de vue technique mais aussi le plus 'ludique' et efficace pour l'expression du musicien. Il lui permet de faire varier la fréquence de l'oscillateur sur six octaves de manière continue, d'effectuer de longs glissandi, du vibrato, comme sur un instrument à cordes (Maurice Martenot était violoncelliste). Un câble (ou ruban) parcourt l'instrument dans sa largeur, il est disposé le long du clavier et muni d'une bague. Le musicien place son index de la main droite dans cette bague et fait coulisser le câble (qui s'enroule à l'intérieur de l'instrument) ; la position de la bague détermine la fréquence 'parallèlement' au clavier. Ainsi, si la bague est placée en face du La3 du clavier, elle donnera la même note. Des repères visuels et sensoriels sont placés sur la planche de bois sur laquelle repose le doigt pour permettre au musicien de s'y retrouver.

Nous allons étudier et comparer deux rubans qui diffèrent par leur technologie, l'un est celui employé dans le modèle Martenot à lampes, l'autre est commun au modèle Martenot à transistors et à l'Ondéa.

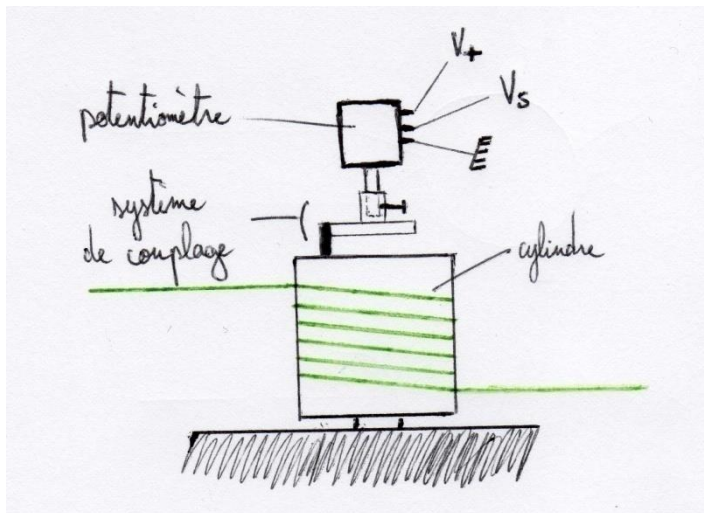
Le premier transforme la position de la bague en une capacité (qui commande l'oscillateur). Le système utilisé est assez déroutant tant il est primitif : le ruban (qui pour le coup est véritablement un ruban et non un fil comme sur les

autres modèles) est raccordé à la bague à chacune de ses extrémités et forme une boucle à l'intérieur de l'instrument. Il est constitué d'une matière textile sur laquelle sont tressés des fils de cuivre souples afin de permettre l'enroulement. Ce tressage est progressif au 'fur et à mesure' du ruban de telle sorte que la surface de matériau conducteur soit de plus en plus grande lorsqu'on s'éloigne de la bague (vers la gauche). Cette surface conductrice constitue une des armatures de la capacité variable. A l'intérieur de l'instrument, les fils de cuivre sont en contact avec une roue en aluminium chargée d'établir la connexion entre l'armature (ruban) et le circuit. L'autre armature est constituée par un couloir formé de deux rangées de « dents » entre lesquelles le ruban coulisse. Ces dents en métal souple peuvent être écartées du ruban afin de « l'accorder » (au moment de la fabrication). Quand le musicien déplace la bague vers la droite, le ruban « avance » dans le couloir et la surface de l'armature qu'il translate s'agrandit, la capacité augmente et la fréquence de l'oscillateur évolue en conséquence.



Cette technique plutôt rudimentaire fonctionne bien puisqu'après près cinquante ans d'utilisation, le ruban de l'onde à lampe du CNR de Strasbourg fonctionne toujours et reste « juste ». Néanmoins, le dispositif reste fragile et si le ruban est sectionné accidentellement, le type de textile tressé n'étant plus fabriqué, il sera irremplaçable. D'autre part, il est assez difficile à mettre en œuvre puisqu'il est nécessaire d'accorder le ruban à la fabrication afin que la variation de capacité en fonction de la position soit linéaire ; si cette fonction, pour les besoins de l'instrument, avait du être différente d'une fonction linéaire, la technique aurait eu un intérêt mais on y préfèrera dans notre cas celle pensée par Maurice Martenot un peu plus tard et utilisant un potentiomètre.

Le système utilisé dans les modèles Martenot les plus récents et dans l'Ondéa est donc basé sur l'utilisation d'un potentiomètre. La bague pilote alors un simple diviseur de tension gérant ainsi la commande de tension de l'oscillateur. On utilise en effet dans ces deux modèles d'instruments des oscillateurs pilotés en tension (VCO, voltage controlled oscillator) à transistors (pas de tubes dans ces modèles). Le « ruban » est remplacé par un câble (fil de pêche épais et solide) qui, à l'intérieur de l'instrument, va s'enrouler autour d'un cylindre qui tourne sur son axe. Ce cylindre est couplé à l'axe du potentiomètre qui tourne alors à mesure que le câble s'enroule.



Les potentiomètres sont de ce type :

Potentiomètres bobinés multitours (10 tours)
 2W puissance max
 la résistance varie entre 50kΩ et 0Ω
 (parfois seulement 10 ou 20kΩ)
 linéarité de +/- 0.25%
 tolérance de +/- 5%.
 (Catalogue Sélectronique)



Ces pièces coûtant 13.50€, elles sont facilement remplaçables en cas de casse ou d'usure, ceci est important car elles sont très sollicitées et nécessitent parfois d'être changées. L'utilisation de multitours est imposée par les dimensions de l'instrument, en effet, une octave sur les ondes Martenot « mesure » 15cm (ce qui est plus petit que sur un piano standard) La bague se déplace sur six octaves donc sur une longueur de :

$$L \text{ (longueur)} = 6 \times 15 = 90\text{cm}$$

Pour un potentiomètre d'un seul tour, il faudrait donc un cylindre d'un périmètre d'au moins 90cm soit environ 29 cm de diamètre qui ne rentrerait tout simplement pas dans l'instrument. Un potentiomètre de dix tours permet de réduire la taille du cylindre : si on considère qu'on n'utilisera que neuf tours afin d'éviter des chocs mécaniques à « l'embutage », on doit donc utiliser un cylindre de :

$$P \text{ (périmètre)} = 90 : 9 = 10\text{cm} \quad \text{soit} \quad D \text{ (diamètre)} = 10 / \pi \sim 3.18\text{cm}$$

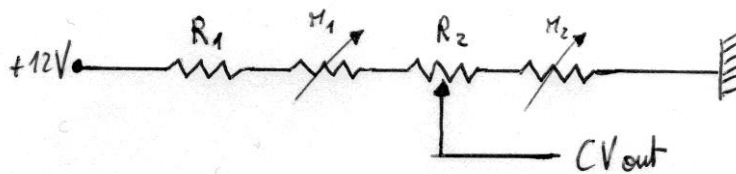
C'est ce type de pièces qu'on trouve dans les modèles Martenot et Ondéa.

Une fois le potentiomètre fixé et couplé au cylindre, on obtient une résistance variant de manière linéaire en fonction de la position de la bague et ce sur les six octaves. La résistance prélevée entre un pôle et le curseur du potard variera de :

$$\Delta R = 50\,000 \times (9/10) = 45\,000\Omega$$

Il reste à concevoir le simple circuit qui permettra la transformation de cette variation de résistance de en variation de tension. Si on considère un VCO standard fonctionnant sur la base d'1V/octave et en prenant une source de tension stable de +12V. La variation de tension qu'il faudra fournir au VCO sera de 6V sur

la longueur des 6 octaves. Considérons le circuit suivant, simple diviseur de tension :



La tension prélevée au curseur sera de (on néglige pour l'instant les trimmers):

$$U_s = 12 * (R_2 * (1 - \beta) / (R_1 + R_2 * \beta))$$

β désignant la position du curseur entre 0 et 1

Puisqu'on a choisi le diamètre du cylindre de manière à ce que le potard ne soit pas embuté, le coefficient β ne variera pas entre 0 et 1 mais entre environ :

$$0 + \mu < \beta < 1 - \mu \quad \text{avec } \mu = 1 * (1/10) / 2 = 0.05$$

(1/10 représente le tour non utilisé)

Ce facteur μ n'est pas prévisible puisqu'il dépend de la manière dont est fixé le potentiomètre lorsqu'on le couple à l'axe du cylindre.

Si on avait utilisé les 10 tours du potentiomètre et donc composé avec une résistance variant entre 0Ω et 50kΩ, il aurait suffi de choisir $R_1 = 50\Omega$. On a, dans notre cas, deux problèmes à régler :

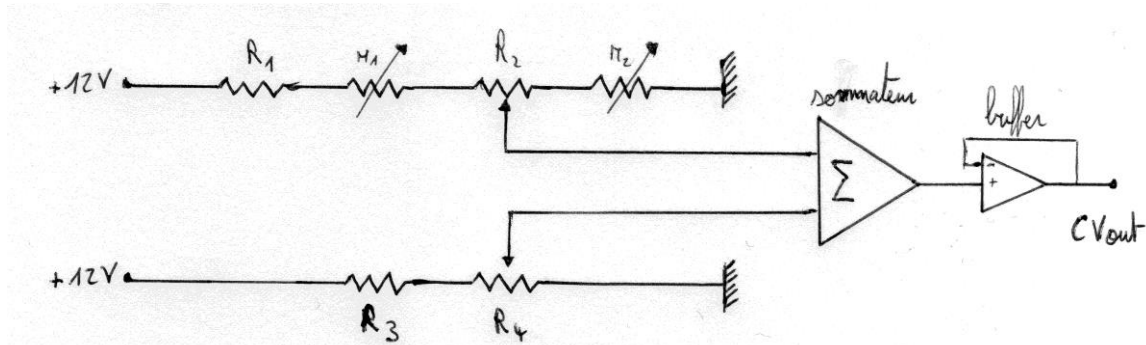
- Il faut d'une part régler R_1 de manière à ce qu'elle s'équilibre avec la course de R_2 et en considérant la perte de tension engendrée par le « morceau de potard » qu'on n'utilise pas.
- Le « morceau de potard » qu'on n'utilise pas engendre une perte de tension au regard des 12V de l'alimentation et la sortie prélevée au curseur du potentiomètre aura un « offset » et variera donc entre :

$$0 + \text{Offset} < U_s < 6 + \text{Offset}$$

Pour palier au premier problème, nous allons utiliser des résistances ajustables (trimmers r_1 et r_2) afin de régler la résistance avant le potentiomètre et d'effectuer un premier réglage sur la perte de tension. Les réglages doivent être effectués de manière à ce que la tension de sortie varie de 6V sur les six octaves. Ces trimmers pourront, une fois leur valeur définie, être remplacés par des résistances fixes ou laissés tels quels pour pouvoir retoucher à l'accord par la suite (peu utile).

Pour palier au second problème, on utilise une deuxième source de tension qui génère un « offset » contrôlable par le musicien, c'est le rôle du potentiomètre d'accord du ruban. Une tension ajustable est sommée à la tension de sortie du premier circuit de manière à placer les 6V de variation de tension « en face » des six octaves sur lesquelles on désire jouer.

On aboutit au circuit suivant :



Le suiveur avant la sortie permet de « bufferiser » le signal de commande de manière à ce qu'il ne soit pas altéré par le circuit d'entrée de l'oscillateur.

La procédure d'accord du ruban se fait de manière très simple grâce à ce dispositif puisqu'il suffit de placer la bague en face d'une des touches du clavier, typiquement la La3, et de faire correspondre les notes créées en alternant la commande de l'oscillateur entre ruban et clavier.

On pourrait imaginer de remplacer ce potentiomètre par un encodeur numérique qui piloterait alors un DCO (digitally controlled oscillator) ou tout autre dispositif numérique, un contrôleur midi par exemple. Dans ce cas, il est important de faire en sorte que le passage d'un code à l'autre ne se traduise pas de manière audible par un saut de fréquence. Pour cela, la résolution du dispositif doit dépasser les limites de l'ouïe ; si on considère cette limite telle que l'on peut distinguer, dans une octave, trois cents intervalles distincts (savarts), il faudra sur les six octaves de l'instrument au moins :

$$300 * 6 = 1800 \text{ codes distincts}$$

Ainsi, dix bits (1024 codes) ne suffiront pas et il faudra au moins onze bits de codage (2048) pour définir avec suffisamment de précision la position de la bague sur les six octaves. Ces valeurs représentent un strict minimum et une résolution bien plus élevée permettra une véritable « fluidité » malgré la quantification. Le système intégré sur le modèle de l'onde numérique code le ruban sur plus de 8000 valeurs.

Une autre idée plus judicieuse serait de conserver la génération analogique et de diviser le signal de commande en sortie pour envoyer l'envoyer d'une part vers une sortie analogique et d'autre part vers un convertisseur ADC qui devra lui aussi avoir une résolution de onze bits minimum.

Concernant les applications midi, on peut imaginer trois types de sortie à un contrôleur à ruban, ces messages ne sont pas forcément destinés à contrôler la fréquence d'un son, tout sorte d'application est possible :

- Une sortie générant des messages de note, on ne bénéficie alors pas de la continuité du ruban qui fait tout son intérêt, cette option paraît peu utile.
- Une sortie générant des messages de contrôle simples, la résolution de ce type de message étant de sept bits, on aura une résolution rapportée au clavier d'environ un quart de ton ce qui reste assez « grossier » mais peut suffire pour des applications secondaires.

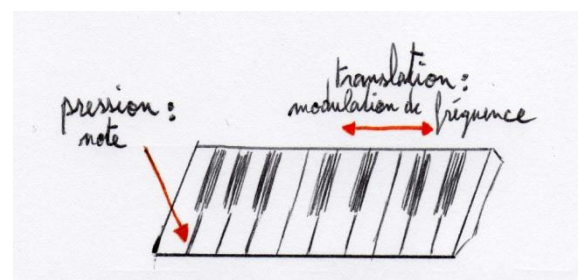
- Une sortie générant des messages de contrôle doubles (MSB/LSB, comme par exemple la paire 7 – 39 : contrôle du volume) ayant donc une résolution de $7 * 2 = 14$ bits. Cette résolution élevée permettrait de transmettre à partir du ruban un message numérique d'une précision élevée (s'il doit piloter un DCO en fréquence, par exemple, la variation entre deux valeurs consécutives engendrerait une variation de fréquence près de mille fois inférieure à ce que l'oreille humaine peut distinguer). Pour diminuer le débit, il serait intéressant d'utiliser les messages de pitch bend, on éviterait ainsi la redondance de l'octet statut des messages de contrôle.

Les messages midi étant très versatiles, une sortie midi de qualité sur un contrôleur à ruban permettrait, conjointement à un traitement informatique (traitement des données avec MAX/MSP par exemple), l'exploitation de champs d'application infinis dans le domaine de l'audio (et pourquoi pas dans la vidéo, la gestion de lumières, la robotique...).

L'enjeu dans la conception du ruban ne réside pas tant dans l'électronique que dans la mécanique et la réalisation des pièces qui le composent (notamment le cylindre, qui doit comporter un guide pour le câble, et les pièces permettant le couplage du cylindre au potentiomètre). Aussi, le prototype sur lequel je travaille depuis quelques temps ne sera présentable que lorsque ces pièces seront toutes réalisées et assemblées, la partie électronique étant achevée.

2.2 Le clavier expressif

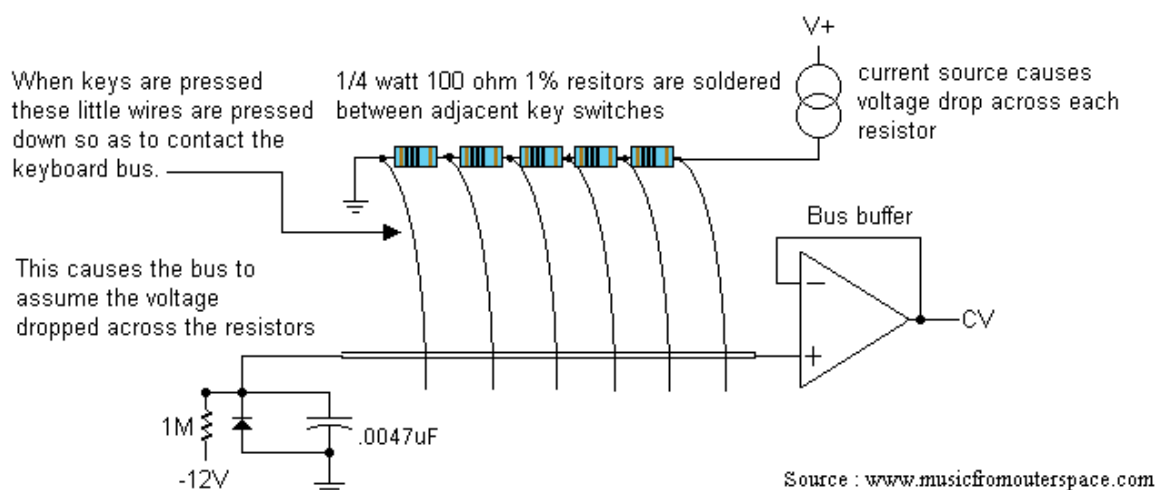
Le clavier est le deuxième élément permettant le contrôle de la fréquence. Il a été développé par Martenot bien après les premiers modèles de l'onde qui n'utilisaient que le ruban. L'idée d'incorporer un clavier dans l'instrument a grandement contribué à son succès, puisqu'il lui donne une apparence familière aux musiciens et éveille la curiosité des pianistes. Lors d'une rencontre entre Maurice Martenot et Maurice Ravel, le compositeur suggère à l'inventeur de donner au clavier la possibilité de « vibrer ». Martenot parvint à concrétiser cette idée créant ainsi un clavier unique en son genre sur lequel le musicien peut exécuter un vibrato (modulation de fréquence) contrôlé, comme sur un violoncelle par exemple. Pour ce faire, il eut l'idée de « suspendre » le clavier (alors dit « clavier expressif ») permettant sa translation latérale sur une longueur d'environ 1 cm de chaque côté. Cette translation s'effectue autour d'une position



de repos, les caractéristiques mécaniques du système définissant sa fréquence propre et son inertie.

Le signal de commande en sortie du clavier est la composante de deux signaux, l'un généré par les touches du clavier, l'autre par un dispositif captant les mouvements latéraux. Ces deux signaux sont sommés.

Le premier de ces signaux est généré par les touches du clavier comme sur un synthétiseur monodique standard : la touche pressée la plus grave est la seule prise en compte et détermine la note. Chaque touche active un interrupteur qui lorsqu'il est fermé permet à un bus de collecter le voltage qu'elle représente. Ces voltages sont issus d'un diviseur de tension formé par les résistances sous-jacentes à chaque touche du clavier. Ces résistances sont de valeur égale (typiquement 100Ω) de manière à ce que la différence de tension entre tous les « demi-tons » soit égale, réalisant ainsi une sortie linéaire par paliers, ce qui est essentiel puisque l'oscillateur est commandé en tension à 1V/octave.



Dans le cas d'une source de voltage stable de 12V, il faudra diviser la tension avant la première touche du clavier. La résistance équivalente formée par l'ensemble des touches est de :

$$R_{eq} = 100 * 12 * 6 = 7200\Omega$$

Pour six octaves, donc six volts de variation de tension, il faudra diviser la tension avant la première touche du clavier par deux en ajoutant une résistance de 7200Ω.

Le bus est « préparé » par le circuit en bas à gauche du schéma et bufferisé par le suiveur à droite. Il est important de conserver cet ordre car l'inverser changerait la priorité des touches et le bus considèrerait alors le voltage déterminé par la touche pressée la plus aigüe, ce qui altèrerait le mode de jeu et rendrait impossible l'exécution de certaines pièces.

Il arrive parfois que des trimmers soient ajoutés aux résistances de 100Ω, en parallèle pour diminuer la résistance de la touche ou en série pour l'augmenter. Cette modification vise à « rectifier » des problèmes de justesse perçus

notamment dans l'aigü et dus soit à une linéarité approximative de l'oscillateur, soit à un phénomène psycho-acoustique de variation de hauteur perçue lorsqu'un son dont la forme d'onde est proche d'une sinusoïde est joué fort (phénomènes de Stevens). Le mieux quand ces problèmes de justesse surviennent est sans doute d'essayer de les corriger dans la façon de jouer plutôt qu'en agissant sur l'instrument, toute modification sur une touche entraînant invariablement le dérèglement de toutes les autres.

La deuxième partie du signal de commande du clavier est générée par le dispositif qui mesure ses translations latérales. Le clavier des ondes Martenot est suspendu, c'est à dire qu'il est monté sur un système de ressorts permettant sa mobilité dans son axe gauche/droite. Qui dit ressort dit raideur et fréquence propre du système ; celui-ci est « accordé » de manière à faciliter le vibrato qui typiquement en musique évolue disons entre 3 et 6 Hz. Il est donc important à la conception de prendre en compte ce facteur et d'accorder le système suivant la formule :

$$\text{Fréquence propre} = F_0 = (m / k)^{1/2}$$

avec m (en kg) la masse du clavier et k (en N/m) la raideur du système.

Le modèle Ondéa permet au musicien d'agir sur la raideur du système via deux curseurs (mécaniques), un de chaque côté du clavier, qui contrôlent le « maintien » de ce dernier. Ainsi, la fréquence propre du clavier est ajustable à tout moment et le musicien peut choisir, par exemple en fonction du mouvement qu'il va jouer, lent ou rapide, de préférer un vibrato lent ou serré. Il garde bien sûr le contrôle complet des translations mais la modification de la raideur du système permet de « faciliter » un certain type d'expression. Cette fonction est très intéressante et mérite d'être exploitée tant par les musiciens que par les éventuels constructeurs.

D'un point de vue électronique, on distingue trois technologies, l'une utilise une capacité variable, l'autre une résistance variable et la dernière un capteur à effet Hall.

Pour la première, une des plaques du condensateur est fixée au corps de l'instrument et la deuxième face à la première, sur un des côtés du clavier. Lorsque le clavier est en mouvement, la distance entre les deux plaques varie et la capacité du condensateur varie en conséquence. Ce système a l'avantage de capter les mouvements sans contact entre la partie fixe et la partie mobile du capteur. Néanmoins, il ne peut capter des écartements trop grands (les modèles dépassent rarement 20mm de plage) et il ne peut restituer les variations trop rapides puisqu'il constitue un filtre coupe bas, des modèles récents permettent cependant largement de traduire des variations de quelques Hz (capaNC600 par exemple (micro-epsilon)).

La deuxième technique consiste à utiliser une sorte de potentiomètre linéaire, la piste en carbone étant fixée au corps de l'instrument et le curseur au clavier. Lorsque le clavier bouge, le curseur se déplace sur la piste en carbone entraînant une variation de résistance proportionnelle directement convertible en une variation de tension via un diviseur. Ce système qui nécessite un contact entre la partie fixe et la partie mobile du capteur est fragile et sujet à l'usure surtout du fait que le clavier de par la structure mécanique de sa suspension peut très légèrement bouger d'avant en arrière (du point de vue du musicien).

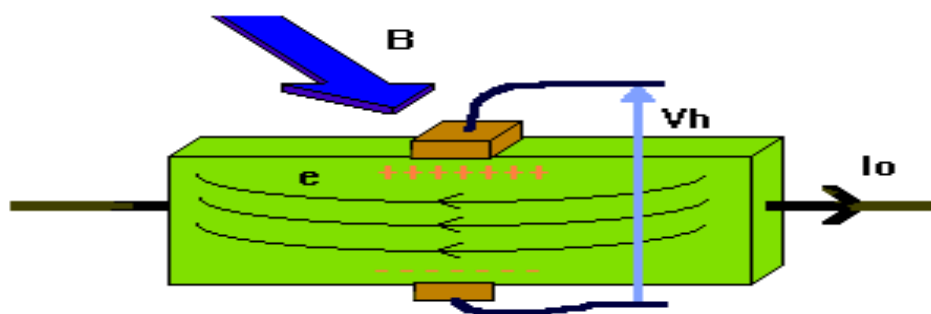
Le troisième système utilise un capteur à effet Hall. L'effet Hall est caractérisé par la génération d'une tension sur les faces opposées d'un barreau de matériau conducteur lorsque celui-ci est traversé par un courant et plongé dans un champ magnétique. Cette tension est définie par la relation :

$$\text{Tension de Hall} = V_h = K_h * I * B$$

Avec I l'intensité dans le barreau en ampères

B la force de champ magnétique en Tesla

K_h la constante de Hall dépendant du matériau et des dimensions du barreau.



Le barreau est solidaire du corps de l'instrument et se déplace devant un aimant qui crée le champ fixé sur le clavier. Ainsi, la force de champ magnétique varie lorsque le barreau se déplace devant l'aimant permettant la variation de la tension de Hall. Des capteurs de position à effet Hall sont disponibles avec une course linéaire ou logarithmique. Ces capteurs sont très peu volumineux et fonctionnent sans contact entre les deux éléments qui le composent. Ils représentent le meilleur choix pour cette tâche parmi les trois décrites ci-dessus.

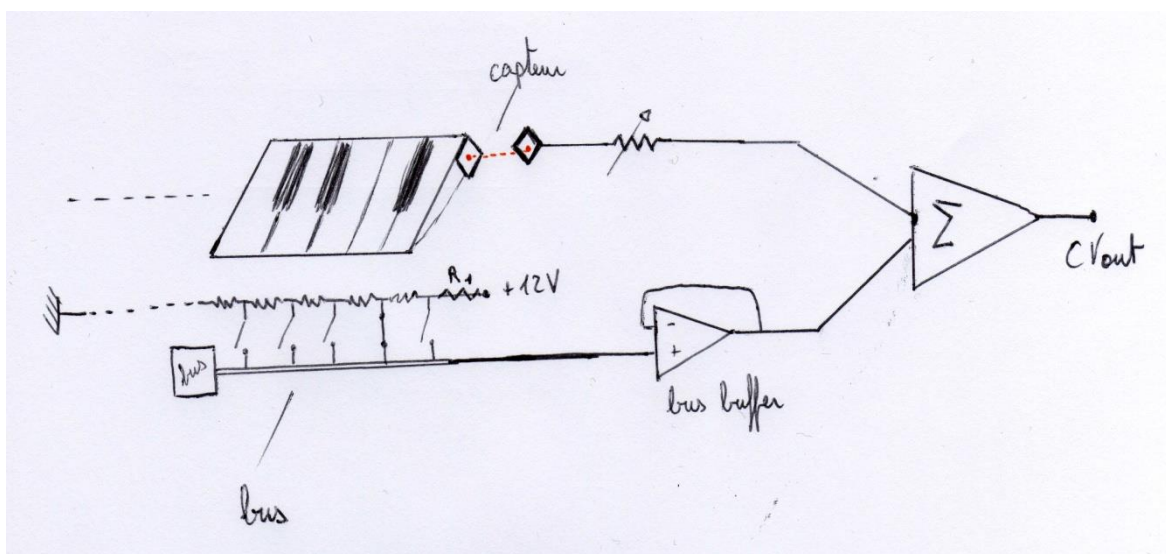
D'autres systèmes peuvent convenir et méritent d'être testés : si un dispositif dynamique (ruban ou bobine) ne peut convenir puisqu'ils sont des capteurs de vitesse et que l'on traite ici des variations de très faible fréquence (voire courant continu), les technologies optiques (capteur de position à infrarouge) et à courant de Foucault sont à considérer.

Une fois les deux composantes du signal de commande générées, il ne reste qu'à les adapter et à les sommer. L'amplitude des variations de tension

engendrées par les translations latérales doivent en principe être infimes : le vibrato en musique a généralement une amplitude totale inférieure au demi-ton. L'équivalent en tension d'un demi-ton étant, avec douze demi-tons par octave :

$$\Delta U = 1 / 12 \sim 83.33 \text{ mV}$$

Cette amplitude électrique peut soit être fixée par le constructeur (c'est le cas dans les modèles Martenot) soit accessible au musicien (c'est le cas dans l'Ondéa où un curseur permet de le régler de manière logarithmique, ce qui autorise un vibrato extrêmement large de plus d'une octave, fantaisiste d'un point de vue musical mais peut être utile pour certains effets). Le schéma suivant résume donc les principes électriques du clavier expressif.



Concernant la « numérisation » du clavier, la norme midi semble tout à fait convenir puisque les deux composantes du signal du clavier correspondent dans leur rôle aux messages midi de note et de pitch bend. Afin de générer les messages de note, il sera nécessaire d'installer un capteur sur chaque touche (typiquement, capteurs à effet hall) puisque le système de bus ne gère pas le relâchement des touches aiguës lorsqu'une touche plus grave est enfoncée. Ce système rend également possible la polyphonie. Des « kits » midi pour clavier et autres contrôleurs sont commercialisés (par la marque Doepfer par exemple) ; il suffirait d'installer ces kits respectivement sur le clavier et sur la sortie en tension du dispositif latéral puis de combiner les messages via un « midi merge » pour procéder à la « midification » du clavier. Même si le clavier des ondes Martenot n'est pas conçu pour cela, on peut imaginer d'intégrer une fonction d'aftertouch global ou polyphonique et utiliser par la suite ces données pour altérer par exemple le timbre du son. Cette numérisation ne représente pas une grande difficulté d'un point de vue technique mais permet d'élargir grandement le champ d'utilisation du clavier expressif.

2.3 La touche d'expression

La touche d'expression (parfois appelée touche de nuances) est à l'onde ce que l'archet est au violoncelle, elle permet la gestion du niveau sonore de l'instrument et donc la génération d'enveloppes, de phrasé et d'effets rythmiques. Cette touche, disposée sur le « tiroir » est contrôlée par l'index de la main gauche du musicien. Elle mesure environ 5cm de long pour 1cm de large et est généralement en plexiglas (sauf sur certains exemplaires de l'Ondéa où on trouve une touche en bois verni, le plexiglas étant en général plus apprécié par les ondistes).

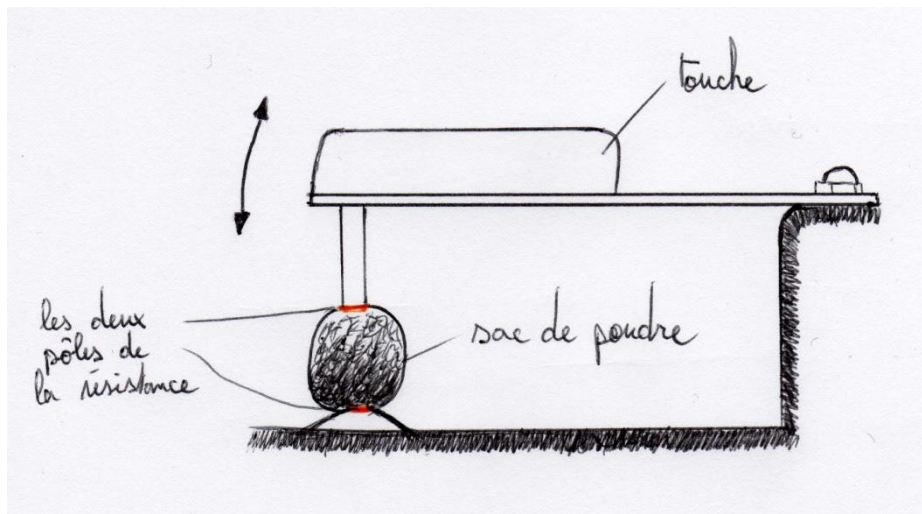
Cette touche est un capteur de pression, plus le musicien appuie dessus, plus le son est fort, s'il relâche la touche, aucun son ne sort de l'instrument (en principe). La touche est maintenue à son extrémité supérieure par une lame de métal, épaisse de quelques millimètres, jouant le rôle d'un ressort ; cette lame permet à la touche d'offrir une résistance à l'enfoncement et de revenir à sa position de repos une fois relâchée. On peut grâce à ce système réaliser les phrasés musicaux les plus communs, du legato au staccato très court. Il est même possible, en « frappant » la touche de manière très sèche (mais doucement quand même), de réaliser un « percuté » c'est à dire un son percussif et en apparence sans composante tonale (le cerveau n'ayant pas le temps d'analyser la fréquence du son). Si, en revanche, le doigt reste enfoncé à un même niveau sur une longue durée (potentiellement infinie), il obtient un son filé sans variations de nuances. Ce système diffère donc des autres « touches » que l'on peut trouver en musique, sur les claviers, et qui fournissent un niveau sonore global fonction de la vélocité à l'enfoncement et un niveau au sein de la note non contrôlable.



L'énergie mécanique du doigt sur la touche doit être transformée en énergie électrique par le biais d'un transducteur ; deux technologies ont été utilisées pour ce faire : le « sac de poudre » et les capteurs à effet Hall.

Le « sac de poudre » est une invention de Maurice Martenot. Le principe est d'utiliser un petit sac (un peu plus d'1cm cube de volume) partiellement rempli de « poudre » composée d'un matériau conducteur et d'un isolant (la recette demeure encore secrète). Lorsqu'on presse le sac, la poudre se comprime et les éléments conducteurs se condensent, la résistance formée par l'amas de poudre diminue, de la même manière que dans un microphone à charbon. Le sac a deux pôles matérialisés par deux électrodes à chaque extrémité. L'une d'entre elles est fixée au corps de l'instrument (sous la touche) et l'autre est solidaire de la touche,

ainsi, quand le musicien appuie sur cette dernière, le sac se comprime et sa résistance diminue. La variation de résistance en fonction de la pression est logarithmique. Le sac de poudre présente un intérêt historique mais serait peu recommandable dans la lutherie moderne de par sa fragilité et sa tendance à l'usure.



On pourrait faire passer le signal audio à travers le sac de poudre puisque c'est une résistance variable, il agirait alors comme un fader en fin de tranche de console analogique, mais son intégrité souffrirait sans doute du « passage par la poudre » et le signal de sortie serait probablement de mauvaise qualité... Au lieu de ça, on utilise dans les ondes un système de VCA (voltage controlled attenuator, à ne pas confondre avec le VCA : voltage controlled amplifier) qui va atténuer le signal audio le traversant en fonction d'une tension de commande. Cette tension est prélevée aux bornes du sac de poudre, traversé d'un courant continu. Plus cette tension sera élevée, plus le signal en sortie du VCA sera fort. Le signal sera pré-amplifié si nécessaire (suivant le type d'oscillateur) avant le VCA. L'amplification de puissance, elle, se situe en aval.

Le VCA peut être également piloté par un capteur à effet Hall, c'est d'ailleurs l'option qu'on préférera, ce type de capteur étant peu encombrant, peu cher et agissant sans contact entre ses deux éléments. L'aimant est alors placé sous la touche et se rapproche du barreau conducteur, qui est fixé sur le corps de l'instrument, à mesure que le musicien la presse. Il faudra veiller à ce que le capteur choisi fournisse une tension en fonction de la distance suivant une courbe logarithmique puisqu'on traite des niveaux électriques en dB.

Le signal de commande provenant de la touche d'expression peut être numérisé, pour cela, le plus simple est de convertir cette tension de sortie en signal numérique par le biais d'un ADC. La résolution devra, cette fois encore, être suffisamment élevée pour restituer la finesse et la fluidité du jeu. Cette résolution, bien qu'on traite des niveaux sonores, n'a aucun rapport avec celle de la technologie audionumérique (16 bits, 24bits), il ne s'agit à ce niveau que du signal de commande du volume et non du volume des échantillons. La résolution de cette commande est de 14 bits dans la norme midi (sept bits pour le contrôleur de

volume et sept autres pour le contrôleur d'expression). On peut considérer cette valeur comme une bonne base.

2.4 Pédale, aiguilles et boutons transpositeurs

Cette partie est consacrée aux contrôleurs secondaires de l'onde, permettant d'agir sur la fréquence et l'amplitude de manière musicale. La pédale d'expression agit sur l'amplitude du son alors que les aiguilles et boutons transpositeurs agissent sur la fréquence.

La pédale d'expression a été conçue pour permettre au musicien d'utiliser ses deux mains sur le clavier dans les passages « virtuoses » qui le nécessitent. Il fallait alors trouver une solution pour remplacer le rôle que jouait la main gauche, sans laquelle aucun son ne sort de l'instrument. Maurice Martenot eut l'idée de permettre la gestion de l'amplitude au pied avec cette pédale. La technologie utilisée était le sac de poudre puis l'effet Hall. La pédale est connectée au tiroir par un câble véhiculant trois signaux (comme dans la plupart des pédales d'expression) :

- une tension fixe en sortie du tiroir qui sert de référence ou d'alimentation dans le cas du capteur à effet Hall
- une masse
- une tension diminuée par la pédale ou générée par le capteur à effet Hall (de la pédale vers le tiroir, c'est la tension de commande)

Cette tension de commande est ensuite sommée à celle provenant de la touche. Cette sommation permet au musicien agile de conserver le plein contrôle du volume pendant l'instant où sa main gauche se déplace de la touche vers le clavier, la transition est alors (plus ou moins selon l'habileté du musicien...) inaudible.

Les deux aiguilles, disposées sur le tiroir à proximité de la touche d'expression, sont des contrôleurs de fréquence continus et de grande amplitude, ils permettent de réaliser des effets, par exemple des chants d'oiseaux (chers à Messiaen).

Là encore, on distingue deux technologies, la première est celle utilisée sur les modèles Martenot et reprend le principe des antennes du theremin en miniature : le doigt du musicien constitue une armature reliée à la terre d'un condensateur dont l'autre armature est l'aiguille, un clou dont seul la tête dépasse et recouvert d'un vernis qui fait office de diélectrique. Si le musicien approche son doigt suffisamment près (quelques millimètres) de l'aiguille et au fur et à mesure qu'il pose et écrase son doigt dessus, il fait varier une capacité, ensuite traduite en tension et qui commande l'oscillateur.

L'autre technologie est utilisée dans l'Ondéa, les aiguilles sont alors des petits « boutons » qui offrent une résistance mécanique à l'enfoncement et qui sont reliés à un capteur à effet Hall dissimulé en dessous.

Dans les deux cas, une aiguille va engendrer des variations de fréquence vers l'aigü, l'autre vers le grave. Ces variations prennent des valeurs très diverses selon les modèles, parfois une octave (donc +1V pour l'aiguille aigüe et -1V pour l'aiguille grave) parfois plus.

Enfin, les boutons transpositeurs sont des interrupteurs fugitifs (dont le nombre varie selon les modèles) et permettant la transposition de la note jouée par l'intervalle musical qui caractérise chacun d'entre eux. Ils ont été créés à la commande d'un poète et musicien indou qui exploite une gamme musicale comprenant des quarts de tons qui ne figurent pas de manière discrète sur le clavier. Ils sont situés sur le tiroir également et les cinq que l'on retrouve le plus souvent sont : (avec leurs tension associée)

- + ¼ de ton $U = 1 / 24 \sim 41.67 \text{ mV}$
- - ¼ de ton $U = - (1 / 24) \sim - 41.67 \text{ mV}$
- + ½ ton $U = 1 / 12 \sim 83.33 \text{ mV}$
- - ½ ton $U = - 1 / 12 \sim - 83.33 \text{ mV}$
- + 3.5 tons $U = 7 / 12 \sim 583.33 \text{ mV}$

Tous ces contrôleurs sont en réalité des diviseurs de la tension stable alimentant l'ensemble du système, ils doivent donc être ajustés avec les diviseurs de tension correspondants. Une fois générés et « bufferisés », ils sont sommés aux autres signaux de commande, soit du VCO (aiguilles et boutons), soit du VCA (pédale).

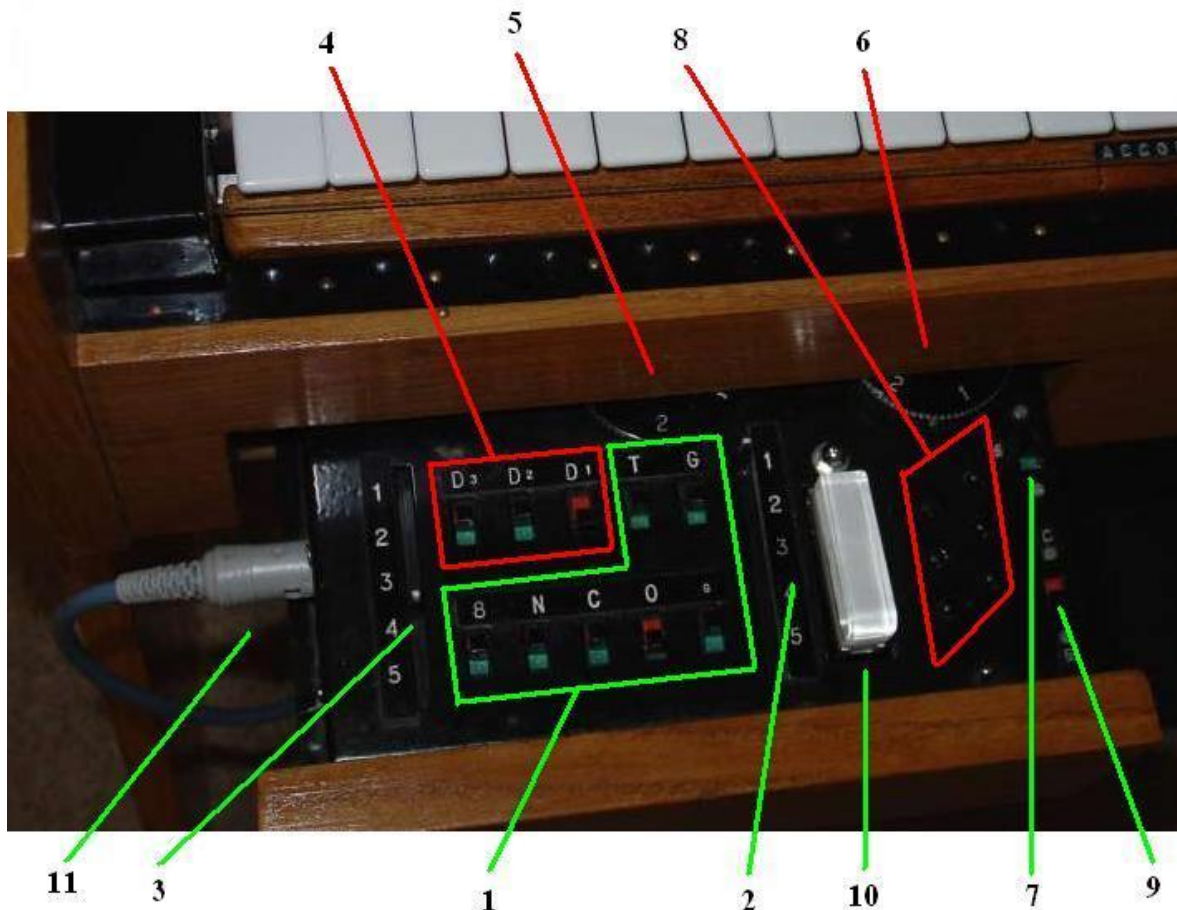
2.5 Tiroir, timbres et synoptique de l'instrument

Cette partie concerne le « centre névralgique » de l'instrument dans lequel est concentrée la majeure partie de l'électronique : le tiroir. Il est situé à gauche de l'instrument et c'est la main gauche du musicien qui le pilote. Ce tableau de bord sur lequel sont disposés, on l'a vu, la touche d'expression, les boutons transpositeurs et les aiguilles, donne au musicien accès aux réglages du timbre de l'instrument, et ce dans deux champs d'action :

- Traitements électriques du signal : modification de la forme d'onde
- Assignation aux diffuseurs : modification du son au moment de sa transduction électro-acoustique.

Maurice Martenot ne faisait pas de la génération de timbres une priorité pour son instrument, c'est d'ailleurs ce qui le différencie des synthétiseurs où le timbre est le principal (voire le seul) élément sur lequel le musicien peut agir, les autres

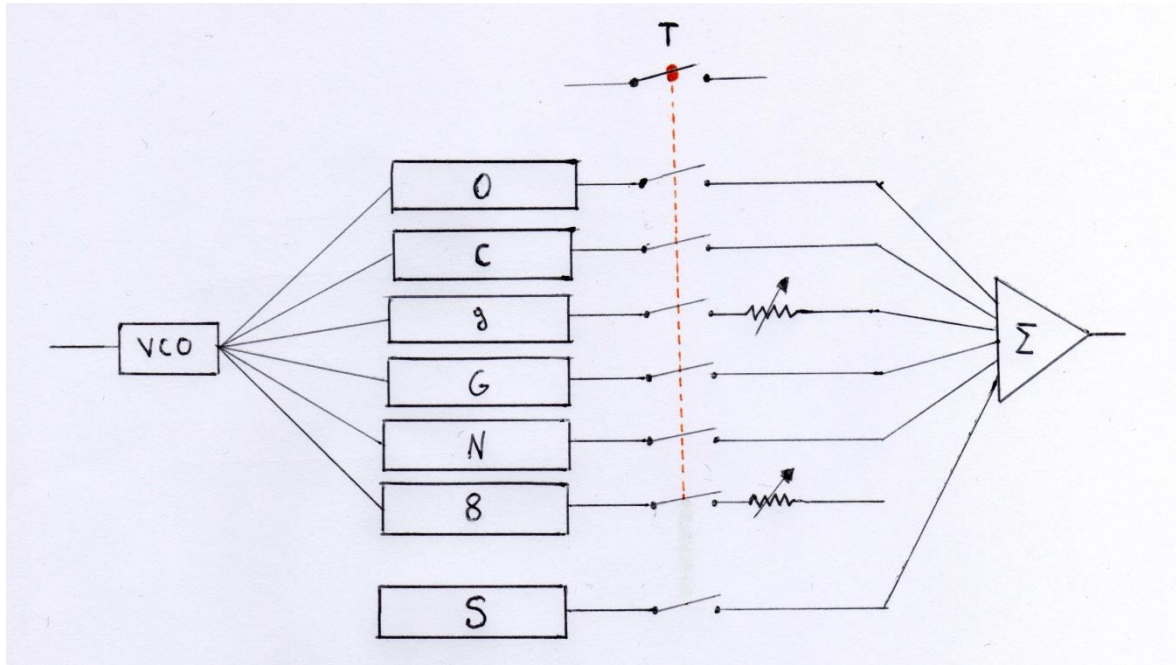
contrôles étant très limités (clavier CV gate, molettes de pitchbend et de modulation...). Selon lui, ils permettent au compositeur de donner au musicien une indication de caractère et de présence. Le musicien, de son côté, peut et doit adapter le timbre de son instrument aux circonstances (acoustique de la pièce, jeu des autres musiciens) et en tenant compte des indications du compositeur. Voici une photographie légendée du tiroir d'un modèle Martenot :



- 1 : switches de sélection des timbres : g O C N 8 G T
- 2 : curseur de réglage du timbre 'g'
- 3 : curseur de réglage du timbre '8'
- 4 : switches de sélection des diffuseurs (seulement trois sur ce modèle)
- 5 : molette de balance entre D1 et D2
- 6 : molette de volume principal de l'instrument (amplification post VCA)
- 7 : switch activant le souffle (bruit rose)
- 8 : boutons transpositeurs
- 9 : switch ruban / clavier
- 10 : touche d'expression
- 11 : connexion de la pédale d'expression

Les points 8 à 11 ayant déjà été mentionnés dans les chapitres précédents, intéressons-nous aux sept premiers éléments.

Chaque timbre représente un traitement du signal de sortie de l'oscillateur différent. En effet, le signal audio est divisé à la sortie du VCO pour être envoyé vers des circuits de waveshaping (modification de la forme d'onde) propres à chaque timbre. Une fois modifiés, les signaux correspondant aux timbres dont l'interrupteur est fermé, sont sommés comme dans le schéma de principe suivant :



Si aucun switch n'est fermé, aucun son ne sort de l'instrument, si un ou plusieurs switches sont fermés, les sons générés par les divers modules de waveshaping correspondants sont sommés et envoyés vers le VCA. Les curseurs 2 et 3 permettent de régler le niveau des timbres 'g' et '8'.

Le timbre 'T' (tutti) est simplement un switch global activant tous les timbres.

Le timbre 'S' (souffle) est un générateur de bruit rose (switch 7). Il est utilisé principalement pour générer des effets (vent, mer) ou pour « salir » un son. Le modèle Ondéa intègre un curseur permettant de régler son niveau.

Les timbres 'g' 'O' 'C' 'N' '8' et 'G' sont générés par des circuits dont la complexité dépasse ma compétence et dont le secret est gardé. Ces circuits ne seront donc pas étudiés ici ; cependant, une étude spectrale de ces timbres est possible et présente un grand intérêt. N'ayant pas eu l'occasion de faire d'analyses précises de ces spectres, on se contentera d'une analyse qualitative mettant en relief les caractéristiques de chacun des timbres.

- Le timbre 'O' (onde) est le plus simple de tous, il est presque dépourvu d'harmoniques et sa forme d'onde est proche d'une sinusoïde. Il est par conséquent (suivant les courbes de Fletcher Munson) très affaibli dans le grave, dans cette tessiture, on préférera ajouter un timbre plus riche en harmoniques pour plus de présence.
- Le timbre 'C' (creux) est riche en harmoniques paires dont la décroissance suit une loi linéaire.

- Le timbre 'g' (petit gambé) est lui constitué de fondamental et d'harmoniques impaires, leur décroissance est proportionnelle au carré du rang, formant ainsi un signal proche de l'onde triangulaire.
- Le timbre 'G' (gambé) est également constitué d'harmoniques impaires mais celles-ci suivent une loi de décroissance linéaire. Sa forme d'onde est proche du carré. En utilisant le timbre 'G' avec le timbre 'C', on obtient un son comprenant des harmoniques de tout ordre dont la loi de décroissance est linéaire : c'est à dire une onde de forme dents de scie.
- Le timbre 'N' (nasillard) est un son très riche en harmoniques et dont le fondamental est très peu présent. C'est une forme d'onde à impulsion (pulse wave), très agressif et destiné à la base à imiter les instruments à vent du moyen orient.
- Le timbre '8' est constitué de l'harmonique de rang deux uniquement. Utilisée à un niveau faible, il apporte une certaine chaleur et à un niveau fort rappelle l'orgue (le curseur n'étant ni plus ni moins qu'une tirette harmonique comme on en trouve sur les orgues liturgiques).

Bien qu'on soit très loin des possibilités de variété de timbre des synthétiseurs modernes, les multiples combinaisons de ces six « sources d'harmoniques » permettent de créer des sons doux et agressifs et de s'adapter à l'environnement musical et acoustique. Si on considère l'onde Martenot dans sa forme « modulaire » il devient possible d'utiliser tout synthétiseur externe (qui est pilotable en tension ou numériquement, en midi par exemple) pour générer des timbres à sa guise ou retrouver les timbres originaux et y apporter des modifications en temps réel. Les possibilités timbrales sont alors infinies.

Le son des ondes Martenot n'est pas réduit à ces timbres puisque le musicien peut également agir au niveau de la transduction électro-acoustique en contrôlant l'envoi vers les différents diffuseurs. Pour cela, il utilise les switches, curseurs et molettes disposés sur le tiroir.

Chacun des switches active ou désactive l'envoi vers le diffuseur correspondant, typiquement de cette manière :

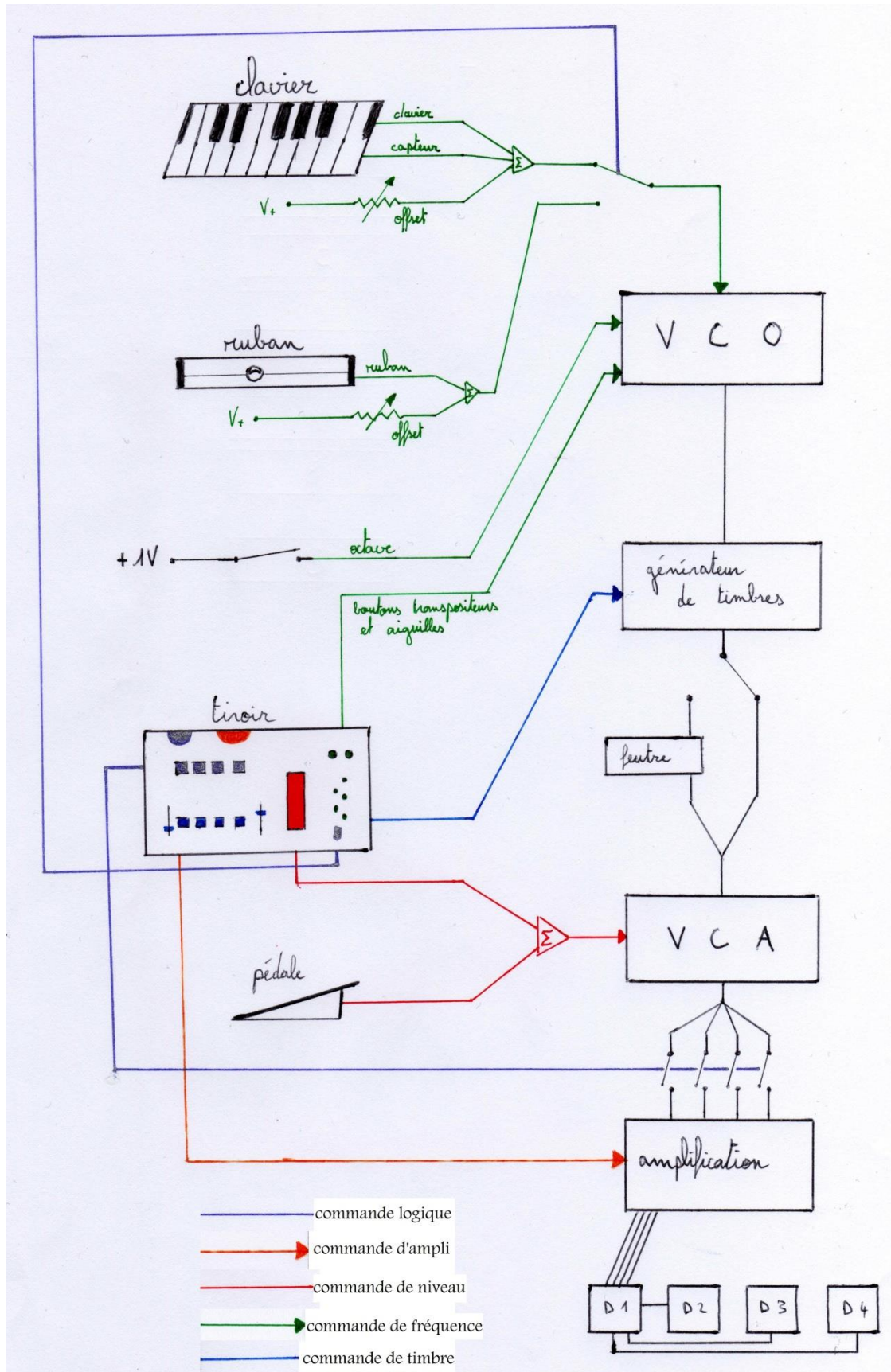
D1 : principal D2 : résonance D3 : métallique D4 : palme

(le switch D4 n'étant présent que dans le cas où on prévoit d'utiliser ce diffuseur, absent sur la photographie ci-dessus)

Deux systèmes différents sont utilisés pour le réglage des niveaux respectifs de chacune des sorties :

- Dans les modèles Martenot, la molette (5) permet le réglage de la balance entre les sorties D1 et D2. Aucun contrôle du niveau n'est possible pour les sorties D3 et D4.
- Dans le modèle Ondéa, un curseur est disposé au dessus de chacun des quatre switches, il permet le réglage individuel de niveau de chaque sortie.

Nous avons passé en revue tous les éléments constituant l'instrument et ce synoptique résume la manière dont ils sont interconnectés.



3. les diffuseurs

3.1 Généralités, connectique, alimentation

Les diffuseurs sont le lien entre l'instrument et l'air audible. Comme nous l'avons déjà précisé, leur rôle n'est pas de restituer avec une acuité « chirurgicale » un contenu sonore complexe, mais de transmettre de manière musicale et originale le signal électrique simple produit par l'instrument de manière à ce qu'il puisse s'intégrer dans des formations musicales « classiques ». Aussi, les caractéristiques techniques que nous avons l'habitude d'analyser pour un moniteur (réponse fréquentielle, impulsionnelle, directivité) ne seraient ici pas d'une grande utilité si ce n'est pour se convaincre de l'impossibilité d'utiliser ces HP modifiés dans un système de monitoring. Les diffuseurs créés par Maurice Martenot sont au nombre de quatre.

Lorsque le musicien est sur scène, avec un orchestre symphonique par exemple, la multiplicité des câbles qui relient les divers éléments de l'instrument entre eux et au secteur peut être encombrante, voire présenter un danger. Aussi, réduire le nombre de ces câbles est important dans la conception de l'instrument. Les diffuseurs étant généralement groupés en un même endroit à côté du musicien, les câbles entre les diffuseurs ne sont gênants. Les câbles d'alimentation et ceux reliant l'instrument aux diffuseurs, eux, le sont. Maurice Martenot, pour palier à cette gêne, a pensé plusieurs systèmes :

- Le premier système consiste à centraliser l'alimentation dans l'instrument, les sorties audio sont donc déjà amplifiées et attaquent directement les HP. D'autre part, ces sorties vers les quatre diffuseurs sont véhiculées par un même câble (4 signaux distincts et une masse). Ce câble est branché au diffuseur D1 qui comporte un système de redistribution : un câble est tiré depuis D1 vers chacun des autres HP. Ce système a l'avantage de diminuer grandement le nombre de câble mais présente plusieurs problèmes : on véhicule quatre signaux et une masse dans le câble, on a donc besoin d'un connecteur multiple (si on voulait véhiculer ces signaux de manière symétrique, on aurait besoin de neuf conducteurs) ; d'autre part, ces signaux sont amplifiés et présentent donc un danger électrique.
- Le deuxième système imaginé nécessite un câble de plus mais ne véhicule que des signaux non amplifiés en puissance entre l'instrument et les diffuseurs. L'amplificateur de puissance est alors situé dans D1 (qui doit donc être connecté au secteur) et les autres diffuseurs sont connectés à D1. Un câble véhicule les quatre signaux à un niveau « ligne » de l'instrument vers D1.

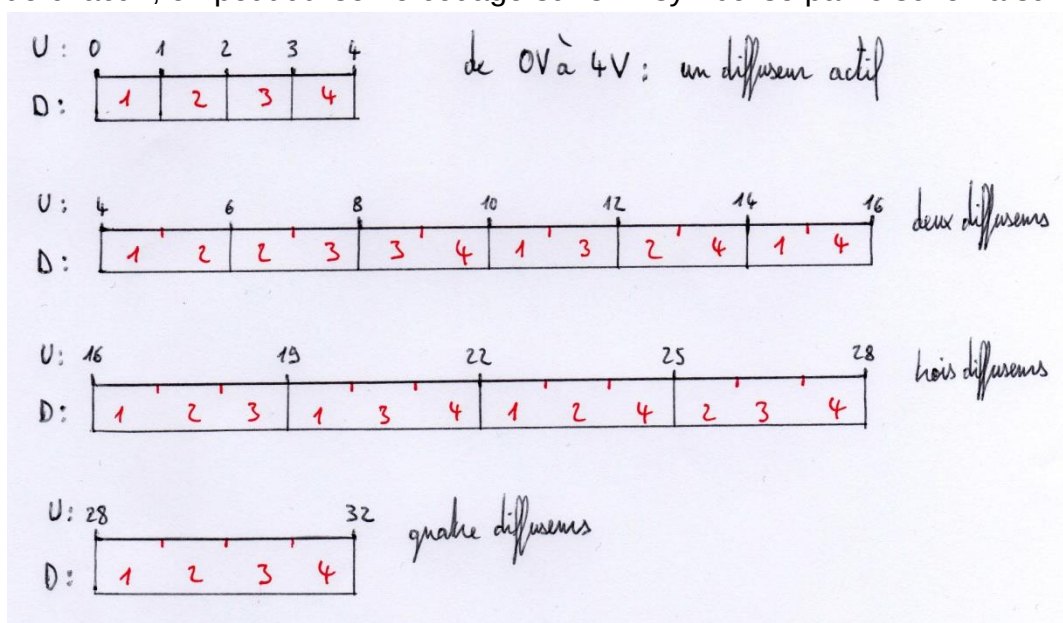
Les câbles utilisés pour connecter l'instrument au diffuseur D1 sont généralement de type DYN 8 broches (Martenot) ou sub-D 9 (Ondéa, Martenot numérique).

Si on étudie les signaux destinés aux quatre diffuseurs, on se rend compte que la seule différence entre chacun d'entre eux est leur niveau. En effet, les quatre signaux sont parfaitement identiques et en phase mais leur niveau est différent.

Aussi, on pourrait parfaitement imaginer de véhiculer ces informations de manière symétrique comme suit :

- Signal sonore phase +
- Signal sonore phase -
- Signal continu codant le niveau de chaque diffuseur

On aurait alors une liaison similaire à celle entre un microphone nécessitant une alimentation fantôme et un pré-ampli. Le signal de commande ne modifie pas l'intégrité du signal audio. Si les niveaux de chaque diffuseur sont binaires (ouvert, fermé), le codage est très simple, si on veut pouvoir gérer le niveau indépendant de chacun, on peut utiliser le codage sur 32V symbolisé par le schéma suivant :



Les chiffres en noir indiquent la tension, ceux en rouge, le numéro du diffuseur dont la tension de commande en amplitude varie dans le pas d'un volt en dessous duquel il est inscrit. La résolution d' 1V est largement suffisante pour définir le niveau d'un diffuseur par pilotage d'un VCA. Ce code donne une idée du genre de système qui pourrait être employé. Il devra être repensé et optimisé.

L'utilisation d'un codage numérique risque de perturber le signal audio et ne pourra être convenablement transmis sur un seul conducteur. Par contre, un signal continu (qui n'est en pas modifié lorsqu'on transporte un signal audio puisqu'on ne change pas, en général, de diffuseur hors des silences) ne l'altérera aucunement. Ce système permettrait une liaison de qualité sur, par exemple, un câble XLR (qui intègre un système de verrou). Il nécessite un dispositif de dé-matçage qui pourrait être intégré au diffuseur D1 qui redistribue alors les signaux aux autres diffuseurs.

3.2 Principal

Le diffuseur principal (ou D1) est un diffuseur simple, semblable à un HP traditionnel. Son rôle est double :

- Il restitue le son de l'instrument de manière neutre.
- Il amplifie le signal provenant de l'instrument pour le HP qu'il contient et pour les autres diffuseurs à qui il « distribue » leur signal respectif.

Il s'agit d'un haut-parleur dynamique à bobine mobile. La membrane est en simple carton sur les modèles Martenot, un matériau fragile (plusieurs membranes déchirées sur les diffuseurs que j'ai pu voir, sans doute à cause de l'ancienneté...) et peu fiable dans la restitution sonore (importante inertie). Le diffuseur principal de l'Ondéa (le seul que la société SEAM ait fabriqué) est constitué d'un HP destiné à la restitution du grave et du médium (boomer diamètre de 25cm environ) et de deux HP destinés à la restitution de l'aigü (tweeter 10cm). Ils sont disposés d'une manière peu conventionnelle (le boomer est à l'horizontale sous une sorte de diffuseur, au sens acoustique du terme ; les tweeters sont placés au dessus de ce diffuseur) destinée à optimiser la directivité pour l'intégration de l'instrument dans un orchestre (notamment à augmenter le niveau émis sur à 90° où est généralement positionné le musicien). Le grave étant peu directif, on peut se demander si cette mesure est vraiment efficace.

D1 doit être un diffuseur fidèle et puissant, tout HP moderne suffisamment puissant peut donc remplir cette tâche. C'est la direction qui sera prise pour le modèle numérique, livré avec un diffuseur D1 en tout point semblable à un HP moderne utilisé en sonorisation.

3.3 Résonance

Le diffuseur D2, résonance (ou encore « espace ») est destiné à reproduire une sensation d'espace, autrement dit d'ajouter de la réverbération au son. Pour cela, de gros ressorts sont disposés devant la membrane d'un HP dynamique à bobine mobile. Ces ressorts, au nombre de six ou sept, sont attachés aux parois supérieures et inférieures de l'enceinte. Ils sont reliés à la membrane de manière solide grâce à deux tiges métalliques fixées d'une part sur des barres perpendiculaires aux ressorts et les maintenant et d'autre part à la membrane qui est pour cela percée en deux points. La membrane met donc en vibration les ressorts lorsqu'elle vibre et subit les oscillations de ces derniers lorsqu'elle ne vibre plus. Ce système crée un effet similaire à celui produit par une réverbération à ressorts avec une réponse en fréquence en cloche dont la fréquence centrale

est déterminée par la fréquence propre du système mécanique masse ressort. S'il est intéressant d'un point de vue historique, il a des inconvénients majeurs :

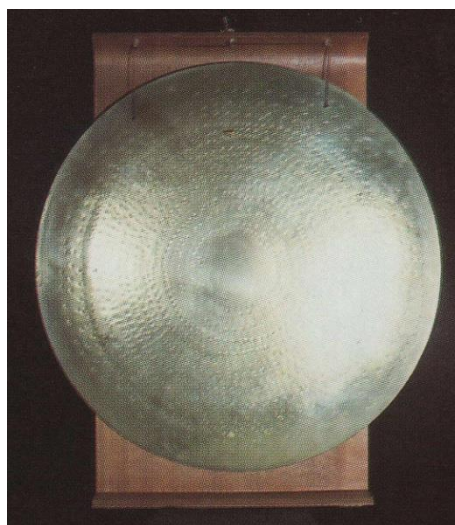
- La membrane (en carton également) est facilement déchirée lorsqu'un signal de niveau trop fort l'excite et que les ressorts « n'arrivent pas à suivre » particulièrement en dessous de la fréquence propre du système mécanique.
- Le diffuseur est volumineux et fragile, la membrane peut se déchirer également quand on le transporte.

Pour ces raisons, on préférera utiliser une réverbération « en boîte », pourquoi pas à ressorts si on est accoutumé à leur sonorité. C'est l'option choisie pour le modèle numérique dont la brochure suggère l'utilisation d'une reverb externe.

Il est fréquent dans les modèles Martenot plus anciens que les diffuseurs D1 et D2 soient intégrés dans la même enceinte (comme sur la photographie de la page de garde du mémoire, diffuseur de droite). Dans ce cas, le principal est dans la partie haute et la résonance dans la partie basse. Sur ces modèles, on remarque également la présence de lames de plastique placées devant la grille du HP et destinées à diffuser (au sens acoustique du terme) le son qui en émane. L'efficacité de ce dispositif est à vérifier et les problèmes engendrés par ces lames lorsqu'elles vieillissent (vibrations, son qui « zing ») sont sans doute plus gênants que les avantages qu'ils peuvent apporter...

3.4 Le métallique

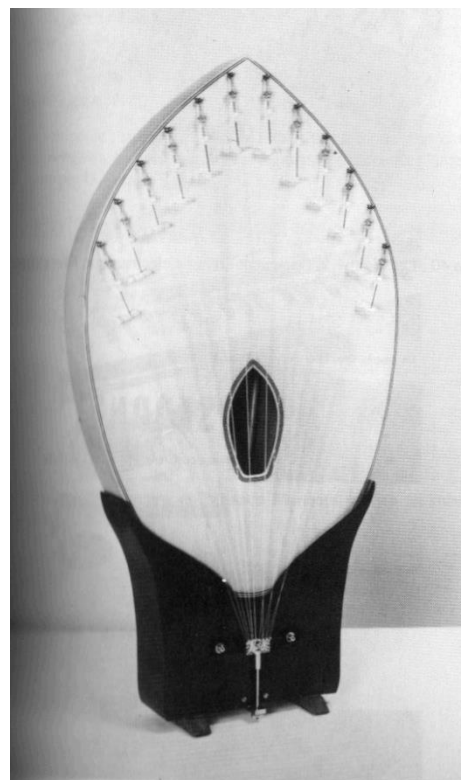
Le métallique est le troisième diffuseur utilisé dans les ondes Martenot, il a été créé par Maurice Martenot dans les années trente et est encore fabriqué aujourd'hui par Jean-Louis Martenot. Il s'agit d'un HP à bobine mobile dont la « membrane » est constituée d'un tam-tam chinois. Il va sans dire que le son produit par ce système est assez peu ordinaire. Le diamètre du tam-tam varie suivant les modèles de 40cm environ à 75cm. Il est suspendu à l'enceinte par une corde qui passe par deux trous percés dans le quart supérieur du tam-tam. La bobine mobile est collée au centre du tam-tam. L'inertie de la membrane étant très grande (elle pèse plusieurs kg), il faut un temps d'excitation assez long avant qu'elle ne commence à vibrer et que le son puisse être perçu. Ces sonorités sont uniques et ce diffuseur est difficilement émule tant son comportement est à la fois aléatoire et subtil. La



seule amélioration qu'on pourrait lui apporter serait de l'auto-alimenter et de le surélever. En effet, ce diffuseur est posé à terre et les réflexions sur le sol peuvent créer des annulations nuisant à l'intégrité du spectre du son.

3.5 La palme

La palme est un diffuseur utilisant des cordes qui mettent en vibration une caisse de résonance. C'est un HP dynamique à bobine mobile, la bobine est solidaire d'un axe métallique qui traverse la caisse de résonance à sa base et sur lequel sont fixés des chevalets (de part et d'autre de la palme). Sur chaque face, douze cordes reposent sur ce chevalet et sont fixées à une extrémité dans le bois de la palme via des chevilles et à l'autre sur un cordier métallique relié à la base de l'instrument. Lorsque la bobine est excitée, l'axe oscille à la manière d'une membrane et entraîne dans son mouvement les deux chevalets, de chaque côté de la palme, ce qui provoque la vibration des cordes. Les cordes sont accordées de la manière suivante : Les deux cordes centrales sont accordées en La2 et La2# (220Hz et 233 Hz). A partir de ces deux notes, on ajoute un ton à mesure qu'on se décale vers les extrémités (jusqu'au Sol# du côté du La# et jusqu'au Sol du côté du La). L'autre face est accordée de manière symétrique selon l'axe plan que forme la palme. Ainsi, les douze demi-tons tempérés sont représentés et à chaque note jouée, les cordes les plus proches fréquemment des harmoniques ou sous-harmoniques de cette note vibreront de manière significative.



Ce système, comme celui du métallique, a une grande inertie et les sons courts peinent à être reproduits. Les cordes continuent de vibrer une fois l'excitation terminée provoquant un trainage très doux et musical.

On peut remarquer que les cordes d'une face vibrent en opposition de phase par rapport à celles de l'autre phase. Il serait intéressant d'analyser le comportement de la caisse par rapport à cette opposition et d'essayer le même dispositif avec un moteur double et les cordes vibrant en phase.

La palme est encore fabriquée par Jean-Louis Martenot. Elle est, tout comme le métallique, unique et irremplaçable.

Conclusions

Quatre-vingt ans après l'invention des Ondes Martenot, le potentiel musical et expressif de l'instrument reste inégalé parmi les dispositifs musicaux électroniques grâce à ses systèmes uniques de clavier expressif, de ruban et de touche d'expression. Si quelques éléments qui le constituent, en particulier dans les anciens modèles, sont aujourd'hui dépassés et remplaçable avantageusement par des technologies plus récentes, ses composants les plus caractéristiques et les plus importants reposent sur des systèmes certes simples mais fiables. La reproduction de ces parties de l'instrument n'est donc pas d'une très grande difficulté. Il est également possible d'ajouter des sorties numériques aux différents contrôleurs grâce à la conversion des signaux analogiques qu'ils génèrent ou à l'implantation de capteurs fournissant déjà un signal numérique (pour le clavier par exemple). Cependant, remplacer les contrôleurs analogiques serait une erreur, d'une part parce qu'ils sont faciles à mettre en œuvre et qu'il serait dommage de s'en priver, d'autre part parce que leur continuité absolue est un avantage dans la génération de sons musicaux.

Une structure modulaire de l'onde permettrait de conserver toutes ses qualités expressives en lui donnant plus de versatilité et d'accessibilité. Une telle structure permettrait également de remplacer ou de compléter le système assez pauvre de génération de timbres par des systèmes plus complexes, qu'ils soient informatiques (softs de synthèse, instruments virtuels) ou solides (synthétiseurs analogiques évolués).

Le système de connexion et d'amplification des diffuseurs est largement améliorable. D'autre part, les diffuseurs D1 et D2 sont tout à fait remplaçable par un haut-parleur moderne puissant et fidèle muni d'une réverbération artificielle à ressorts ou autre. En revanche, les diffuseurs métallique et palme sont uniques, irremplaçables et toujours fabriqués. Ils constituent un élément important (plus important que les timbres) de la signature sonore très particulière de l'instrument.

Fabriquer à nouveau des ondes Martenot permettrait de les rendre accessibles aux nombreuses personnes désirant en jouer et de faire connaître cet instrument dont la musicalité a charmé les grands acteurs de la création musicale savante et populaire, de Messiaen à Radiohead. Les principes techniques basiques de l'instrument méritent d'être réalisés avec pièces et matériaux de qualité et ouvragés de manière précise et intelligente, ce qui nécessite des connaissances que je ne possède pas. J'espère néanmoins que ce travail et sa continuité seront concrétisés pour la pérennité de l'instrument.

Bibliographie :

Maurice Martenot : Luthier de l'électronique (plus édité)
Acoustique et musique (deuxième édition)
Technique de l'Onde électronique type Martenot
Cours SAE AED 2007
Wikipedia.org
Martenot.com
Micro-epsilon.de
Musicfromouterspace.com

Jean Laurendeau
E.Leipp
Jeanne Loriod

Remerciements :

Dans le désordre le plus total :

Jean-Louis Martenot (fils de Maurice Martenot et inventeur du modèle numérique)
Ambro Oliva (société SAEM, créateur de l'Ondéa)
Thomas Bloch (professeur d'ondes au CNR de Strasbourg)
Christine Ott (professeur d'ondes au CNR de Strasbourg)
Jean-Loup Dierstein (électronicien spécialiste des synthétiseurs analogiques)
Les professeurs de la SAE (professeurs à la SAE Paris)

Ecrit par Maxime FRANCOIS en 2007 – francois (dot) maxime (at) gmail (dot) com