

Faculté de philosophie, arts et lettres

Étude historique, analyse technique et classification des premiers électrophones

Auteur : **Augustin WATTIEZ**

Promoteurs : **Anne-Emmanuelle CEULEMANS, David BOL**

Lecteur : **Christophe PIRENNE**

Année académique 2021-2022

Master [60] en histoire de l'art et archéologie, orientation musicologie

Résumé

Les premiers électrophones se développent au même moment que les débuts de la téléphonie au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle. Peu de temps après, l'invention de l'audion facilite la conception de circuits électroniques et offre de nouvelles marges de créativité aux ingénieurs pour élaborer des électrophones plus complexes. Malgré l'apparition des instruments précurseurs susmentionnés entre la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e siècle, l'utilisation des électrophones comme outils de création musicale ne surviendra que progressivement durant la seconde moitié du XX^e siècle.

L'intention première de ce travail est de répondre à la question de recherche suivante : comment expliquer l'intervalle de temps entre l'émergence des premiers électrophones et l'utilisation d'électrophones comme outils de création musicale durant la seconde moitié du XX^e siècle? Une autre motivation est de suggérer des voies d'amélioration pour la classification des électrophones au sein du système Hornbostel-Sachs.

Une étude de cas axée sur le contexte d'émergence et le principe de fonctionnement du premier instrument électrique et de trois électrophones primitifs permet d'émettre des pistes de réponses. Ce travail postule qu'ils sont considérés comme des curiosités intellectuelles plutôt que des instruments de musique. De plus, les contraintes technologiques rencontrées avant l'amplification électrique, autrement dit avant l'invention de l'audion, freinent les inventeurs dans la conception d'instruments conciliant une faible consommation de puissance électrique, une production de sons harmonieux et des dimensions acceptables.

Ce travail étudie par ailleurs les courants musicaux ayant émergé dans la première moitié du XX^e siècle afin de prendre du recul par rapport à l'étude de cas. Tout d'abord, cette analyse montre que les compositeurs du début du XX^e siècle utilisent pour la plupart des moyens de composition similaires aux courants qui les avaient précédés, c'est-à-dire des instruments acoustiques. Ensuite, les timbres des premiers électrophones ne sont pas en adéquation avec l'esthétique musicale de la plupart des courants étudiés. Ce travail fait également l'hypothèse que les circonstances politiques et économiques au début du XX^e siècle ont compliqué l'accès aux premiers électrophones. Finalement, le coût trop élevé des électrophones justifie leur absence presque totale dans les courants de musique dite «populaire».

Les instruments abordés dans l'étude de cas sont classifiés dans le système Hornbostel-Sachs. Sur la base de cette classification, de premières pistes d'amélioration pratiques sont proposées. Ces améliorations prennent la forme d'ajout de sous-classes et la réorganisation des classes principales. Sur la base d'un entretien avec le musicologue Maarten Quanten, ce travail propose aussi des systèmes de classification théoriques plus adaptés à la catégorie des électrophones et d'autres améliorations pratiques.

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à remercier ma promotrice, la professeure Anne-Emmanuelle Ceulemans pour son investissement, sa bienveillance et son expertise précieuse. Les échanges avec Madame Ceulemans ont été un véritable pilier de ce travail. Je la remercie également pour les corrections rigoureuses et détaillées apportées aux versions préliminaires de ce travail.

Je remercie ensuite mon co-promoteur, le professeur David Bol pour son apport aux parties plus techniques de ce travail. Grâce à ses conseils, j'ai pu mieux me concentrer sur les éléments importants à démontrer.

Je remercie également Monsieur Maarten Quanten d'avoir accepté l'organisation d'une réunion pour discuter de la classification des électrophones. Ses divers commentaires sur le système de classification actuel ont été une plus-value non négligeable pour ce travail.

Je profite de cette section pour remercier d'avance le professeur Christophe Pirenne pour sa lecture du travail.

Finalement, je remercie ma famille et mes proches pour leur soutien permanent, particulièrement mes parents pour leurs conseils de rédaction judicieux.

Je dédie ce travail de fin d'études à ma grand-mère, Yolande Honnay, qui me fascina lorsque j'étais âgé de six ans en jouant l'impromptu Op. 90 No. 4 de Franz Schubert. Ses mains qui se déplaçaient magiquement à mes yeux d'enfant sur le clavier m'ont émerveillé et ont fait naître chez moi une passion pour la musique qui ne m'a jamais quitté.

Terminologie propre à ce travail

Dans la littérature, l'appellation «instrument électronique» est communément admise pour désigner un instrument de musique qui utilise de l'électricité. Dans ce travail, nous proposons une terminologie qui a été établie en fonction du niveau d'implication de l'électricité dans le fonctionnement de ce type d'instruments.

Pour cette raison, nous faisons la distinction entre un *instrument électrique*, un *électrophone* et un *instrument électronique*. Nous proposons les définitions suivantes :

- Instrument électrique : instrument de musique dont le principe de fonctionnement repose sur un ou plusieurs phénomène-s physique-s impliquant la présence et le mouvement de charges électriques.
- Électrophone : instrument électrique qui produit des courants alternatifs transmis à un haut-parleur pour être convertis en ondes acoustiques.
- Instrument électronique : électrophone dont le principe de fonctionnement repose sur l'utilisation de tubes à vide ou de semi-conducteurs.

Ces définitions ont été élaborées sur la base d'un article de Hugh Davies intitulé *Electronic instruments* (disponible sur le *Grove Music Online*) et des descriptions fournies dans la version MIMO du système de classification Hornbostel-Sachs.

Nous constatons que ces définitions peuvent être assimilées à une approche ensembliste (voir figure 1). Ainsi, un instrument électronique est nécessairement un électrophone, qui est lui-même un instrument électrique. L'inverse n'est pas forcément vrai. Un instrument électrique n'est pas nécessairement un électrophone si l'électricité n'est utilisée que pour mettre en vibration un objet sonore acoustique. De même, un électrophone peut ne pas être électronique s'il n'emploie pas de tubes à vide ni de semi-conducteurs.

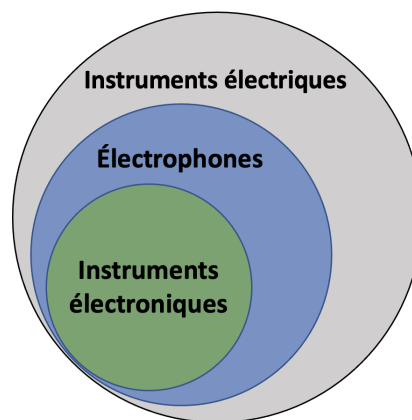


Figure 1: Illustration des définitions proposées avec une approche ensembliste.

Table des matières

1	Introduction	3
2	Étude de cas	6
2.1	Le clavecin électrique - 1759	6
2.1.1	Découverte et contexte historique	6
2.1.2	Notions théoriques	9
2.1.3	Principe de fonctionnement	10
2.2	Le télégraphe musical - 1874	13
2.2.1	Découverte et contexte historique	13
2.2.2	Notions théoriques	16
2.2.3	Principe de fonctionnement	17
2.2.4	Analyses complémentaires	20
2.3	Le telharmonium - 1897	21
2.3.1	Découverte et contexte historique	21
2.3.2	Notions théoriques	26
2.3.3	Principe de fonctionnement	27
2.3.4	Analyses complémentaires	32
2.4	Le thérémine - 1919	33
2.4.1	Découverte et contexte historique	33
2.4.2	Notions théoriques	37
2.4.3	Principe de fonctionnement	39
2.4.4	Analyses complémentaires	45
2.5	Pistes de réponses à la question de recherche	46
3	Étude des courants musicaux de la première moitié du XXe siècle	50
3.1	Considérations générales au sujet du XXe siècle	51
3.2	Courants de musique dite «savante»	51
3.2.1	Impressionnisme musical	51
3.2.2	Atonalité, dodécaphonisme et sérialisme	52
3.2.3	Bruitisme	53
3.2.4	Mouvement néoclassique	53
3.2.5	Musique concrète	54
3.3	Courants de musique dite «populaire»	56
3.3.1	Jazz	56
3.3.2	Blues	57

3.3.3	Musique country	58
3.4	Ligne du temps synoptique	58
3.5	Pistes de réponses complémentaires à la question de recherche	60
4	Classification des cas d'étude dans Hornbostel-Sachs	63
4.1	Classification de Hornbostel-Sachs	64
4.1.1	Des premiers systèmes de classification au système MIMO	64
4.1.2	Instruments électrophoniques ou électrophones	65
4.2	Classification des instruments étudiés comme cas d'étude dans le système MIMO	66
4.2.1	Classification du clavecin électrique	66
4.2.2	Classification du télégraphe musical	66
4.2.3	Classification du telharmonium	67
4.2.4	Classification du thérémine	67
4.2.5	Résumé des classifications	68
4.3	Difficultés rencontrées dans la classification des cas d'étude et suggestions d'amélioration	68
4.3.1	Analyse de la classification du clavecin électrique	68
4.3.2	Analyse de la classification du télégraphe musical	69
4.3.3	Analyse de la classification du telharmonium	70
4.3.4	Analyse de la classification du thérémine	70
4.4	Difficultés de fond rencontrées dans la classification des électrophones	71
4.5	Systèmes alternatifs de classification	72
4.5.1	Système de classification modulaire	72
4.5.2	Proposition d'un système de classification «idéal»	73
4.6	Réorganisation de la catégorie des électrophones dans le système MIMO . . .	74
5	Conclusion	76

Chapitre 1

Introduction

Contexte

La cohésion entre les musiques du XXI^e siècle et l'électricité semble évidente. De nos jours, l'électricité s'imisce à chaque niveau dans le milieu de la musique, du procédé de composition à la diffusion de titres, en passant par l'amplification des instruments et la production musicale. Sur la base de statistiques récentes¹, nous attestons que les électrophones sont devenus des outils de création indispensables pour des artistes appartenant à des courants musicaux dits «populaires». En d'autres mots, l'esthétique musicale de ces courants repose inextricablement sur des sonorités électroniques.

Les premiers électrophones se développent au même moment que les débuts de la téléphonie au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle². Peu de temps après, au début du XX^e siècle, l'invention de l'audion par Lee de Forest³ facilite la conception de circuits électroniques et offre de nouvelles marges de créativité aux ingénieurs pour élaborer des électrophones plus complexes. Ce travail débute avec un constat quelque peu insolite. Malgré l'apparition des instruments précurseurs susmentionnés entre la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e siècle, l'utilisation des électrophones comme outils de création musicale ne surviendra graduellement qu'au cours de la seconde moitié du XX^e siècle⁴.

¹RICHTER Felix, «The World's Favorite Music Genres», dans *Statista* (en ligne), 2018, <https://www.statista.com/chart/15763/most-popular-music-genres-worldwide/> (page consultée le 28 juillet 2022).

²DAVIES Hugh, «Electronic Instruments», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000008694?rskey=DPPimW&result=1> (page consultée le 3 mai 2022).

³FIELDING Raymond E., «Lee de Forest. American inventor», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/biography/Lee-de-Forest> (page consultée le 4 juillet 2022).

⁴Précisons que l'utilisation de matériaux d'enregistrement traités par des procédés électroniques et employés comme outils de composition se développe avant 1950 dans le milieu de la musique dite «savante». Voir par exemple HOLMES Thom, *Electronic and Experimental Music: Technology, Music, and Culture*, 4^e éd., New York, Routledge, 2012, p. 46. L'amplification électrique d'instruments électroacoustiques se développe aussi avant la seconde moitié du XX^e siècle, dès la fin des années 1920. Ce progrès technologique visait notamment à augmenter le volume des cordophones et les rendre plus sonores au sein des formations musicales dans lesquelles ils évoluaient. Voir TEAGLE John, «Antique Guitar Amps 1928-1934. Which Came First - Electric Guitar or Amp?», dans *Vintage Guitar Magazine* (en ligne), <https://www.vintageguitar.com/1804/antique-guitar-amps-1928-1934/> (page consultée le 30 juin 2022).

Nous ne pouvons cependant pas parler d'absence complète des électrophones dans le paysage musical entre 1900 et 1950, mais leur usage est anecdotique au sein des titres et des courants musicaux qui ont marqué le début de ce siècle.

Motivations

La première intention de ce travail est de trouver des pistes de réponses à la question de recherche suivante : comment expliquer l'intervalle de temps entre l'émergence des premiers électrophones et l'utilisation d'électrophones comme outils de création musicale durant la seconde moitié du XXe siècle? La littérature consacrée à ce sujet⁵ énonce généralement les faits et œuvres qui ont marqué l'émergence des électrophones, sans pour autant émettre d'hypothèses tangibles qui répondent à cette question de recherche. Les éléments de réponse se trouvent souvent en filigrane de ces sources.

La seconde motivation de ce travail est de suggérer des voies d'amélioration possibles pour la classification de Hornbostel-Sachs. Pour répondre à la question de recherche, la méthodologie de ce travail comprend, entre autres, une étude technique du premier instrument électrique et des premiers électrophones. Par le prisme de cette étude technique, la classification de ces instruments dans Hornbostel-Sachs illustre des problèmes de conception au sein de la cinquième catégorie des électrophones.

Méthodologie

La méthodologie de ce travail repose sur une approche pluridisciplinaire qui tente de répondre de façon holistique à la question de recherche susmentionnée. Cette approche a été soutenue par la collaboration de la professeure Anne-Emmanuelle Ceulemans (Faculté de philosophie, arts et lettres) et du professeur David Bol (École polytechnique de Louvain).

Dans un premier temps, une étude de cas se penche sur le premier instrument électrique et trois électrophones primitifs. Pour chaque cas, le contexte d'émergence est fourni conjointement à une analyse technique du principe de fonctionnement. Ces instruments ont été sélectionnés consciencieusement sur la base d'un critère jugé pertinent. Nous avons en effet choisi d'étudier les instruments qui ont amorcé une évolution technique dans l'histoire de la musique et dont le principe de fonctionnement repose sur l'électricité. Le clavecin électrique est le premier instrument électrique, le télégraphe musical est le premier électrophone documenté, le telharmonium est le premier synthétiseur et le thérémine est le premier instrument électronique à rencontrer un succès international. Naturellement, restreindre le nombre de cas d'étude à quatre instruments de musique induit un biais méthodologique. Pour limiter ce biais, nous avons tenté de formuler des hypothèses qui s'appliquent à d'autres électrophones primitifs qui ne sont pas abordés dans ce travail. Cette étude de cas permet de formuler des hypothèses d'ordre technique et historique à la question de recherche.

⁵Voir, entre autres, DONHAUSER Peter, *Elektrische Klangmaschinen. Die Pionierzeit in Deutschland und Österreich*, Weimar, Böhlau, 2007.

Dans un second temps, nous analysons les courants musicaux ayant émergé dans la première moitié du XXe siècle. Cette analyse permet de prendre du recul par rapport à l'étude de cas et aide à situer chaque instrument dans un contexte historique, artistique et socioculturel. Il n'est pas envisageable de passer en revue chaque courant musical de la première moitié du XXe siècle. Un biais de recherche est immanquablement induit par les sources consultées. Nous nous sommes appuyés sur un recoupement systématique des sources pour limiter ce biais. Les hypothèses complémentaires formulées à l'issue de ce chapitre pour répondre à la question de recherche se fondent sur des considérations d'ordre esthétique et historique.

La compréhension du fonctionnement des instruments, acquise dans l'étude de cas, permet une classification plus judicieuse de ceux-ci dans le système Hornbostel-Sachs. La démarche de classification est présentée pour chaque instrument. Sur la base des obstacles de classification rencontrés et d'autres problèmes de conception de la catégorie des électrophones, nous proposons des pistes d'amélioration théoriques et pratiques pour la version la plus récente (MIMO) de Hornbostel-Sachs. Ces pistes d'amélioration ont été discutées en collaboration avec le musicologue Maarten Quanten qui a conçu la structure de la catégorie des électrophones sur la demande du projet MIMO.

Structure

À la suite de cette introduction, le chapitre 2 est consacré à l'étude de cas. Nous développons le contexte historique de chaque instrument et fournissons des éléments biographiques au sujet de leur inventeur. Ces considérations d'ordre historique sont accompagnées systématiquement de la description du principe de fonctionnement de l'instrument. Cette étude technique est réalisée sur la base des explications fournies dans les brevets et ouvrages scientifiques écrits par les inventeurs. Comme ces explications sont souvent lacunaires, nous fournissons des rappels de notions d'électricité. Les sections techniques de ce travail sont adaptées pour un lecteur possédant des connaissances élémentaires en électricité et en électronique. Les premières hypothèses qui répondent à la question de recherche se trouvent en fin de chapitre.

Le chapitre 3 étudie les courants musicaux qui ont traversé la première moitié du XXe siècle. Les hypothèses complémentaires qui répondent à la question de recherche se trouvent également en fin de chapitre.

Le chapitre 4 classe les quatre cas d'étude dans le système Hornbostel-Sachs. Ce chapitre propose des voies d'amélioration théoriques et pratiques pour le système de classification actuel. Les suggestions théoriques dénoncent les défauts communément admis de la catégorie des électrophones dans Hornbostel-Sachs et proposent des systèmes de classification alternatifs. Les suggestions pratiques tentent d'améliorer le système existant.

Le chapitre 5 réalise une synthèse des points abordés dans ce travail en proposant des réponses à la question de recherche. Les résultats obtenus dans le chapitre 4, consacré à la classification, sont également discutés dans ce chapitre. Nous concluons ce travail en suggérant de nouvelles perspectives de recherches.

Chapitre 2

Étude de cas

2.1 Le clavecin électrique - 1759

Le clavecin électrique, à l'origine orthographié «clavessin électrique»¹, est le premier instrument de musique suffisamment documenté dont le principe de fonctionnement repose sur des notions d'électricité, plus particulièrement sur l'attraction électrostatique entre deux corps chargés électriquement. D'autres sources considèrent le Denis d'or, instrument hypothétique ayant été inventé entre 1730 et 1762 par Prokop Diviš², comme le premier instrument électrique. Cependant, cette affirmation demeure incertaine en raison d'un manque de documents historiques détaillés et de rapports contemporains contradictoires³.

2.1.1 Découverte et contexte historique

Le clavecin électrique a été inventé en 1759 par le prêtre jésuite et physicien français Jean-Baptiste Delaborde⁴. Ce dernier est né à Nevers en France en 1730. Il commence son noviciat chez les Jésuites en 1745 et enseigne la rhétorique à Amiens vers 1755⁵. Il est

¹Voir DELABORDE Jean-Baptiste, *Le clavessin électrique avec une nouvelle théorie du mécanisme et des phénomènes de l'électricité*, Paris, H.L. Guérin & L.F. Delatour, 1761.

²DAVIES Hugh, «Denis d'or [goldene Dionys]», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000047638> (page consultée le 14 juin 2022).

³Certaines sources mentionnent l'emploi d'électroaimants dans le Denis d'or. Néanmoins, cela est peu probable étant donné que les liens entre électromagnétisme et électricité ne sont compris qu'à partir de 1820, voir SITTER Peer, «Das Denis d'or: Urahn der elektroakustischen Musikinstrumente?», dans *Perspektiven und Methoden einer Systemischen Musikwissenschaft: Bericht über das Kolloquium im Musikwissenschaftlichen Institut der Universität zu Köln 1998*, Frankfurt am Main, Peter Lang, 2003, p. 303-305. Par ailleurs, d'autres sources suggèrent que le Denis D'or était une farce grâce à laquelle l'inventeur pouvait électrocuter l'interprète à souhait, voir SACHS Curt, *Real-Lexikon der Musikinstrumente. zugleich ein Polyglossar fuer das gesamte Instrumentengebiet*, Berlin, J. Bard, 1913, p. 108. De plus, aucune iconographie du Denis D'or ne nous est parvenue, ce qui compromet l'étude technique de cet instrument.

⁴*120 Years of Electronic Music*, «Clavecin électrique or Clavessin électrique. Jean-Baptiste Delaborde, France. 1759.», <https://120years.net/wordpress/clavecin-electrique-1759/> (page consultée le 15 juin 2022).

⁵MERRITT Frédéric, «La Borde [Delaborde], Jean-Baptiste (Thillaie) [Thillais, Thillaès] de», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000015759> (page consultée le 17 juin 2022).

contemporain de la suppression de l'ordre des Jésuites en France⁶ lorsqu'il habite à Rouen vers 1763. Après avoir passé quelques années en Pologne, il est nommé prêtre à Colancelle en France jusqu'à sa mort en 1777⁷. La première source manuscrite qui mentionne le clavecin électrique est un ouvrage écrit par Delaborde lui-même. Cet ouvrage est intitulé *Le clavessin électrique avec une nouvelle théorie du mécanisme et des phénomènes de l'électricité*. Dans ce livre, l'inventeur formalise ses connaissances en électricité et illustre les notions qu'il a découvertes en employant le clavecin électrique comme support pédagogique. Bien que son livre ait été publié en 1761, il explicite dans sa préface que la conception de son instrument remonte à 1759. En effet, le livre commence en reprenant deux lettres adressées aux mémoires de Trévoux⁸ dans lesquelles Delaborde situe la conception du clavecin électrique en 1759.

Nous avançons l'hypothèse que cet inventeur avait déjà réalisé de nombreuses expériences avec l'électricité au moment de la publication de son livre étant donné qu'il compare ses premières observations à celle de Benjamin Franklin. Cela montre par ailleurs que Jean-Baptiste Delaborde est correctement informé des progrès scientifiques de son temps en ce qui concerne l'électrostatique. Il est familier avec la notion de charges positives et négatives, le concept de transfert de charge et d'arrachement de charge⁹. Pour ses expériences, il emploie une bouteille de Leyde¹⁰ comme source d'alimentation et évoque l'hypothèse sur l'électricité de l'abbé Jean-Antoine Nollet¹¹. La méthodologie que Delaborde applique dans ce livre est rigoureuse et didactique. Celui-ci a voulu son ouvrage dans le «style des démonstrations mathématiques»¹².

⁶Pour en découvrir plus à ce sujet, voir LEROY Michel, *Le mythe jésuite. De Béranger à Michelet*, Paris, Presses universitaires de France, 1992.

⁷MERRITT Frederic, «La Borde [Delaborde], Jean-Baptiste (Thillaie) [Thillais, Thillaès] de», dans *Oxford Music Online*, op. cit.

⁸Les mémoires de Trévoux sont un recueil de critiques littéraires, textes scientifiques et religieux ayant existé de 1701 jusqu'à l'expulsion des Jésuites de France en 1762. Elles contiennent 6758 comptes rendus et références de livres. Les sujets les plus fréquemment abordés dans la catégorie «sciences et arts» traitent de mathématiques et de physique. Voir FROESCHLÉ-CHOPARD Marie-Hélène et FROESCHLÉ Michel, «Sciences et arts dans les Mémoires de Trévoux», dans *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 2001, p. 30-49, <https://www.researchgate.net/journal/Revue-dhistoire-Moderne-et-Contemporaine-0048-8003> (page consultée le 16 juin 2022).

⁹Comme Jean-Baptiste Delaborde le mentionne lui-même, il pense être le seul à avoir étudié ces notions d'électricité avant de découvrir que d'autres l'avaient précédé. DELABORDE Jean-Baptiste, *Le clavessin électrique avec une nouvelle théorie du mécanisme et des phénomènes de l'électricité*, op. cit., p. IX.

¹⁰Historiquement, la bouteille de Leyde est l'ancêtre du condensateur. TORLAIS Jean, «Qui a inventé La Bouteille de Leyde?», dans *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, vol. 16/3 (1963), p. 211-19.

¹¹Après avoir collaboré avec Charles Dufay, l'abbé Jean Antoine Nollet publie en 1746 une théorie des affluences et effluences simultanées dans laquelle il considère l'électricité comme un fluide pénétrant dans les corps par des pores. Voir PIRE Bernard, «Nollet Jean Antoine (1700-1770)», dans *Encyclopædia Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/jean-antoine-nollet/> (page consultée le 16 juin 2022).

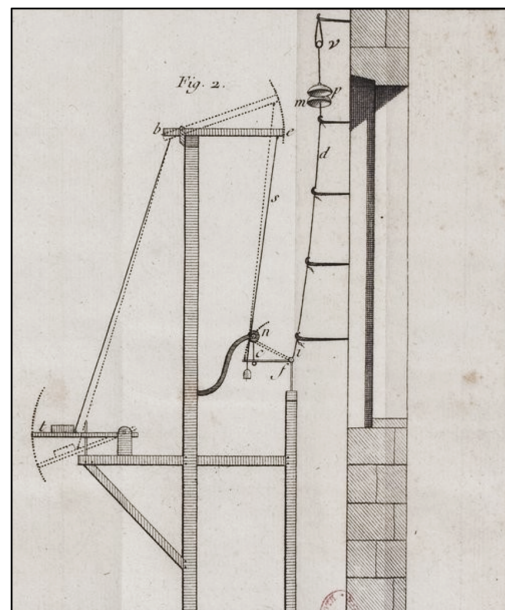
¹²DELABORDE Jean-Baptiste, *Le clavessin électrique avec une nouvelle théorie du mécanisme et des phénomènes de l'électricité*, op. cit., p. V.

Cet inventeur formule des commentaires intéressants au sujet de son instrument. Il mentionne tout d'abord que «la matière électrique en est l'âme comme l'air est celle de l'orgue»¹³. Selon lui, le clavecin électrique sonne comme le trémolo d'un orgue et produit un spectacle remarquable dans le noir. Il constate en effet que les transferts de charges qui surviennent lors du jeu donnent lieu à des étincelles : «Quand on touche le clavecin dans l'obscurité, il est en quelque sorte oculaire et acoustique puisque les yeux y sont également surpris par des étincelles brillantes qui éclatent à chaque son, et qui ressemblent à de petites étoiles errantes»¹⁴. Bien qu'il soit nommé «clavecin» et que le son qu'il produit soit comparable à celui d'un orgue, le clavecin électrique fonctionne plutôt à la façon d'un carillon, comme nous l'expliquerons dans la section 2.1.3. Delaborde souligne lui-même que le nom de son invention pose question d'un point de vue terminologique, mais il est persuadé que son instrument est plus noble qu'un simple carillon.

Un modèle du clavecin électrique est conservé à la Bibliothèque nationale de Paris. Ce modèle est représenté sur la figure 2.1a. Une illustration du clavecin électrique de profil est aussi disponible sur la figure 2.1b. Cette illustration provient de l'ouvrage de Jean-Baptiste Delaborde.



(a) Photographie du modèle du clavecin électrique conservé à la Bibliothèque nationale de Paris.



(b) Illustration de profil du mécanisme associé à une touche du clavier. Le mécanisme de la touche ouvre ou ferme le contact avec la barre *n* (reliée à la terre).

Figure 2.1: Illustrations du clavecin électrique¹⁵.

¹³Ibid., p. 2.

¹⁴Ibid., p. 5.

¹⁵Pour la figure de gauche, voir *120 Years of Electronic Music*, «Clavecin électrique or Clavessin électrique. Jean-Baptiste Delaborde, France. 1759.», op. cit. Pour la figure de droite, voir DELABORDE Jean-Baptiste, *Le clavessin électrique avec une nouvelle théorie du mécanisme et des phénomènes de l'électricité*, op. cit., p. 30.

2.1.2 Notions théoriques

Cette section a pour objectif de formuler les lois de l'électrostatique nécessaires pour une compréhension détaillée du clavecin électrique.

Loi de Coulomb

En électrostatique, la loi énoncée par le physicien français Charles-Augustin de Coulomb en 1785 décrit la force d'attraction ou de répulsion électrique entre deux particules ponctuelles chargées q_1 et q_2 dans un milieu homogène. L'expression scalaire de la force décrite par cette loi s'énonce comme suit :

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad [\text{N}], \quad (2.1)$$

où $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}$ représente la constante de Coulomb, q_1 (resp. q_2) la quantité de charge de la particule 1 (resp. 2) exprimée en Coulomb et r la distance en mètres qui sépare les deux particules.

Considérations théoriques additionnelles

L'équation (2.1) ne permet pas de mettre en évidence la répulsion ou l'attraction entre deux particules chargées. Réécrite sous forme vectorielle, il est possible d'identifier la nature de l'interaction sur la base du signe (positif ou négatif) de cette force¹⁶. De manière générale, deux charges ponctuelles de signes opposés (positif et négatif) s'attirent, tandis que deux charges ponctuelles de mêmes signes (positif et positif / négatif et négatif) se repoussent.

Comme c'est le cas pour des charges ponctuelles, il est envisageable de formuler l'expression de la force qui résulte de l'attraction (ou la répulsion) de deux objets chargés électriquement. Il est alors nécessaire de réécrire la loi de Coulomb sous forme vectorielle dans le cas d'une distribution de charges continue dans l'espace. En intégrant sur tout l'espace (où il y a des charges), une expression vectorielle de la force électrostatique qui s'applique sur les deux objets est obtenue.

Pour clôturer cette brève section abordant des notions fondamentales d'électrostatique, il est aussi pertinent de s'intéresser à la façon dont les corps peuvent acquérir ou perdre des charges électriques. Une charge électrique peut se former de trois façons : par friction, c'est-à-dire par la transmission d'électrons d'une substance à une autre (p. ex. un chiffon frotté sur un tube de PVC), par conduction, c'est-à-dire par le transfert de charges d'un objet électrisé via un contact physique et par induction, c'est-à-dire par la séparation des charges.

¹⁶Pour en savoir plus au sujet de l'électrostatique, voir les deux premiers chapitres de l'ouvrage suivant SÉGUIN Marc (éd.), DESCHENEAU Julie et TARDIF Benjamin, *Physique XXI - Tome B, Electricité et magnétisme*, s.l., De Boeck, 2010.

2.1.3 Principe de fonctionnement

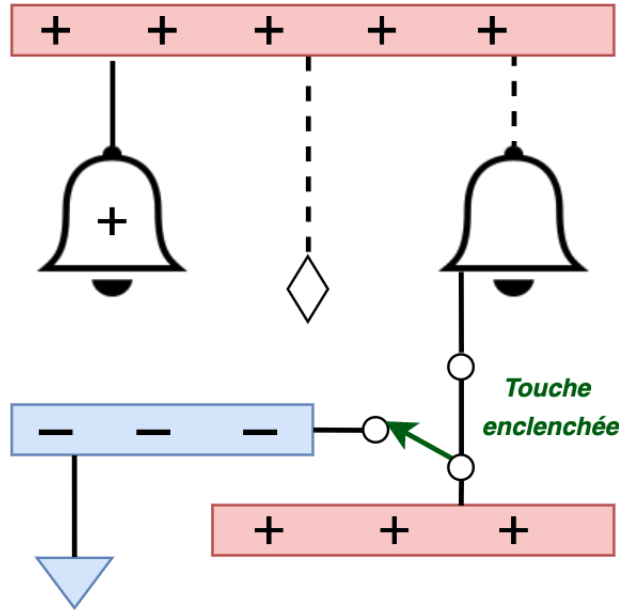


Figure 2.2: Schéma d'un carillon électrostatique composé de deux cloches accordées à une même fréquence et d'un battant. Les traits pleins symbolisent des fils conducteurs tandis que les traits pointillés représentent des fils isolants. La cloche de gauche est toujours chargée positivement alors que la cloche de droite change de polarité si la touche du clavier correspondante est abaissée.

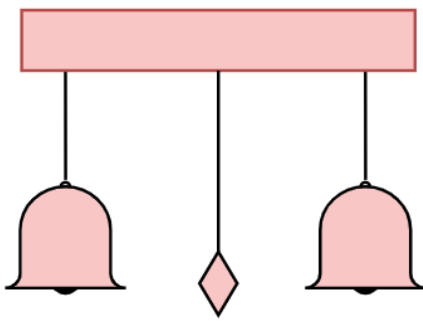
Le clavecin électrique se base sur le principe de fonctionnement d'un carillon électrostatique. Un carillon électrostatique est constitué de deux corps métalliques chargés électriquement situés à une courte distance l'un de l'autre. Initialement, ces deux corps ont une polarité électrique identique (p. ex., tous deux sont chargés positivement). Un battant métallique, relativement plus léger que ces deux corps, est positionné entre eux-ci. Lorsqu'un des deux corps métalliques change de polarité électrique, le battant amorce un mouvement de balancier d'un corps à l'autre en les frappant, rappelant un fonctionnement analogue à celui d'un carillon.

Dans le cas du clavecin électrique, chaque touche est rattachée à son propre carillon électrostatique, représenté schématiquement sur la figure 2.2. Sur ce schéma, nous observons que les corps métalliques susmentionnés sont des cloches, accordées à une même fréquence. À chaque touche du clavier est donc associée une paire de cloches. Cette illustration consiste en une simplification de la figure 2.1b.

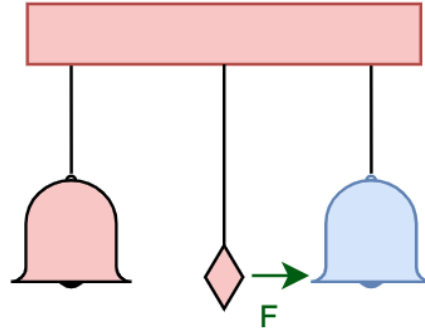
Initialement, les deux cloches sont chargées positivement par des barres métalliques isolées de la terre. Selon la loi de Coulomb, le système est à ce moment-là à l'équilibre étant donné que chaque corps se repousse. Le battant métallique situé au milieu des deux cloches est lui aussi chargé positivement. Cette situation correspond à la figure 2.3a. Lorsque la touche du clavier est abaissée, le contact entre la cloche de droite (voir figure 2.2) et la barre métallique chargée positivement est rompu. Cette cloche se charge alors négativement, car elle est connectée à une barre métallique reliée à la terre.

Conformément aux principes d'électrostatique mentionnés auparavant, le battant est attiré par la cloche chargée négativement. Cette situation est représentée sur la figure 2.3b. La flèche verte désigne la direction de la force électrostatique. Au cours du contact entre les deux corps, un son est produit. Par la même occasion, un transfert de charge par conduction s'opère entre le battant et la cloche chargée négativement. Étant donné que la quantité de charges du battant est négligeable par rapport à celle de la cloche, il se charge négativement.

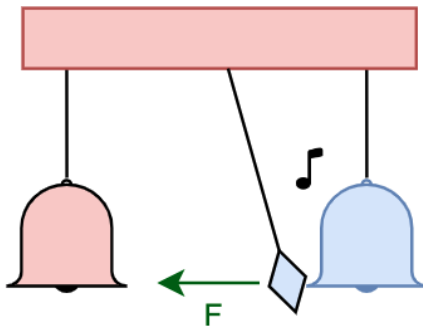
À présent, comme illustrés sur la figure 2.3c, le battant et la cloche de gauche ont des charges opposées. Le battant est par la suite attiré par la cloche de gauche. Lors du contact, un nouveau son est produit et un nouveau transfert de charge a lieu. Le petit battant se charge à nouveau positivement. Cette situation est illustrée sur la figure 2.3d.



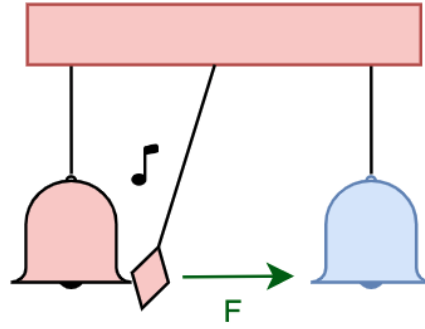
(a) Les deux cloches et le battant sont chargés positivement tant que la touche n'est pas abaissée. Le système est à l'équilibre.



(b) Lorsque la touche est abaissée, la cloche de droite est connectée à la terre. Le battant se déplace vers la droite.



(c) Un transfert de charges par conduction a lieu entre le battant et la cloche de droite. Le battant se charge négativement par rapport à la cloche de gauche.



(d) Le battant est attiré par la cloche de gauche et un transfert de charge s'opère. Le battant redevient chargé positivement.

Figure 2.3: Illustration par étape du principe de fonctionnement du mécanisme associé à chaque touche du clavier du clavecin électrique.

Le mouvement de balancier entre les deux cloches continue tant que la touche du clavier correspondant à ces deux cloches reste abaissée. À l'instant où la touche est relâchée, la cloche de droite est reconnectée à la barre chargée positivement.

Bien que l'exemplaire du clavecin électrique conservé au Musée de Paris ne soit plus fonctionnel, nous faisons l'hypothèse que le son produit par chaque touche devait s'apparenter à un bruit de sonnette/sonnerie électrique. Cette hypothèse est corroborée par l'ouvrage de Delaborde. Il affirme lui-même que, lorsqu'une touche est abaissée, il en résulte «un son ondulé, qui imite à peu près l'effet tremblant fort de l'orgue»¹⁷.

Soulignons que Jean-Baptiste Delaborde a très probablement dû expérimenter progressivement avant d'obtenir un modèle de clavecin électrique fonctionnel. En effet, la loi de Coulomb fut théorisée en 1785, soit huit ans après sa mort. De plus, afin de garantir le fonctionnement correct du clavecin électrique, il est essentiel de garder à l'esprit que l'intervalle entre les cloches ne doit pas être trop important étant donné que la force d'attraction électrique est proportionnelle à l'inverse de la distance au carré. Si l'écart est trop conséquent, la force d'attraction électrostatique ne parvient pas à compenser la force de gravitation exercée sur le battant.

¹⁷DELABORDE Jean-Baptiste, *Le clavessin électrique avec une nouvelle théorie du mécanisme et des phénomènes de l'électricité*, op. cit., p. 4.

2.2 Le télégraphe musical - 1874

Durant la fin du XVIIIe siècle et la première moitié du XIXe siècle, peu de documents indiquent l'apparition de nouveaux instruments électriques¹⁸. À partir de la seconde moitié du XIXe siècle, les premiers électrophones font leur apparition conjointement aux avancées technologiques dans le domaine des techniques télégraphiques et téléphoniques. Le télégraphe musical est le premier instrument suffisamment documenté qui appartient à cette génération d'électrophones.

2.2.1 Découverte et contexte historique

Les recherches qui visaient à développer un premier modèle de téléphone et dont l'aboutissement fut assimilable à un électrophone, débutent en 1851 avec N.H. Edward Farrar¹⁹. Cet inventeur conçoit un mélodéon²⁰ capable de transmettre des signaux électriques via des lignes télégraphiques jusqu'à un récepteur électromagnétique. Plus tard, vers 1860, l'inventeur Philip Reis développe une forme analogue de système de transmission téléphonique²¹. L'émetteur qu'il conçoit est capable de générer des tons musicaux *make-and-break*²² et le récepteur qu'il emploie est une boîte en bois contenant un électroaimant.

Elisha Gray, inventeur américain (1835 - 1901), fait partie des pionniers qui parviennent à développer un modèle fonctionnel de téléphone. Malheureusement pour lui, il dépose en mars 1876 une demande de brevet le même jour qu'Alexander Graham Bell²³, qui le devance de 2 heures au bureau des brevets²⁴. À la suite de cet incident, un procès a lieu entre les deux hommes durant lequel leurs revendications s'opposent. Le brevet fut finalement accordé à Alexander Graham Bell.

¹⁸Durant cette période, nous mentionnons que l'abbé Pierre Bertholon de Saint-Lazare conçoit en 1785 un clavecin magnétique dont le fonctionnement se base sur des aimants permanents. Cependant, cet instrument n'est pas pertinent à étudier dans le cadre de ce travail, car son principe de fonctionnement est simpliste. Voir *120 Years of Electronic Music*, «The Clavecin Magnetique. M. l'Abbé Bertholon. France, 1785», <https://120years.net/wordpress/the-clavecin-magnetique-m-labbe-bertholon-france-1785/> (page consultée le 18 juin 2022).

¹⁹WEIDENAAR Reynold, *Magic Music from the Telharmonium*, Metuchen, The Scarecrow Press, 1995, p. 1.

²⁰Au début du 19e siècle, ce terme est souvent utilisé aux États-Unis pour désigner des harmoniums de petite taille. Voir OWEN Barbara, «Reed Organ», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000043321> (page consultée le 18 juin 2022).

²¹WEIDENAAR Reynold, *Magic Music from the Telharmonium*, op. cit.

²²Ce terme fait allusion à l'ouverture et à la fermeture d'un *switch* électronique à une fréquence audible. Cela génère un signal carré, plus connu en anglais sous le nom de *square wave*.

²³L'invention du premier téléphone est attribuée à Alexander Graham Bell. Voir LAVOISY Olivier, «Invention du téléphone», dans *Encyclopædia Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/invention-du-telephone/> (page consultée le 18 juin 2022).

²⁴MICHIELS Marie, «Alexander Graham Bell est mort il y a 100 ans», dans *rtbf* (en ligne), <https://www.rtbf.be/article/alexander-graham-bell-linventeur-du-telephone-est-mort-il-y-a-100-ans-10948597> (page consultée le 19 juin 2022).

Bien que l'invention du téléphone ne lui soit pas attribuée, Elisha Gray est capable de mettre au point un oscillateur à ton unique durant ses recherches sur un système de communication téléphonique multiplexé²⁵. Le mécanisme qu'il conçoit à ce moment-là émet un son audible à une fréquence fixe. De plus, il est possible de transmettre le signal électrique produit jusqu'à un endroit éloigné au moyen de câbles conducteurs, puis de le convertir en ondes acoustiques via des haut-parleurs rudimentaires.

Le 29 décembre 1874, date à laquelle nous pouvons situer l'apparition du télégraphe musical, Elisha Gray fait une démonstration publique de son instrument à l'église presbytérienne de Highland Park, dans l'Illinois. Pendant cette même année, l'inventeur emporte son instrument avec lui au Royaume-Uni, où il transmet des sons musicaux jusqu'à une distance de 200 miles, soit 320 kilomètres²⁶.

Il formalise le principe de fonctionnement de cette invention pour la première fois dans deux brevets publiés en 1875²⁷. Ces brevets sont les prémices d'un autre brevet publié en 1876 dans lequel le mécanisme est dupliqué pour différentes fréquences. Elisha Gray parvient à reconstituer les sept degrés de l'échelle diatonique (plus l'octave)²⁸. Le modèle breveté en 1876 ne comporte de ce fait que huit touches, les touches noires étant simplement peintes. Cette version du télégraphe musical sera étudiée dans la section 2.2.3 de ce chapitre. Il est important de souligner que différents modèles de télégraphes musicaux ont existé du plus simple à une fréquence, au plus complexe à plusieurs octaves.

Cet inventeur continue la promotion de cette découverte aux États-Unis en 1877, date à laquelle il organise un concert au Steinway Hall de New York. Durant ce concert, le pianiste Frederick Boscovitz joue sur une version à 16 touches du télégraphe musical depuis le bureau de la Western Union à Philadelphie. Le récepteur des signaux électriques du Steinway Hall était constitué de seize tubes de bois résonants reliés par une barre de bois à laquelle était fixé un récepteur électromagnétique. Malgré un son distinctif, les notes les plus aiguës avaient un volume assez faibles et un timbre proche de celui d'un orgue. Cinq autres concerts ont

²⁵Un système de communication multiplexé permet de transmettre différentes conversations téléphoniques par un même fil en employant des signaux électriques porteurs de fréquences distinctes. Ce type de multiplexage est appelé fréquentiel. Sans multiplexage, un câble représenterait la possibilité de ne transmettre qu'une seule conversation téléphonique. Pour en savoir plus sur le multiplexage fréquentiel, voir *Britannica*, «Telecommunication. Multiplexing», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/technology/telecommunication/Multiplexing> (page consultée le 19 juin 2022).

²⁶*120 Years of Electronic Music*, «The Musical Telegraph or Electro-Harmonic Telegraph, Elisha Gray. USA, 1874», <https://120years.net/wordpress/the-musical-telegraphelisha-greyusa1876/> (page consultée le 19 juin 2022).

²⁷Premier brevet (1875) : GRAY Elisha, *Electrical Telegraph for Transmitting Musical Tones*, U.S. Patent Application Ser. No. 166,095, 1875, <https://patentimages.storage.googleapis.com/44/db/59/0c3627a57d1007/US166095.pdf> (page consultée le 19 juin 2022). Second brevet (1875) : GRAY Elisha, *Electrical Telegraph for Transmitting Musical Tones*, U.S. Patent Application Ser. No. 166,096, 1875, <https://patentimages.storage.googleapis.com/df/c4/b0/46c47d0c6aaf59/US166096.pdf> (page consultée le 19 juin 2022).

²⁸GRAY Elisha, *Electro-Harmonic Telegraph*, U.S. Patent Application Ser. No. 173,618, 1876, <https://patentimages.storage.googleapis.com/d8/88/70/9380736fed1748/US173618.pdf> (page consultée le 19 juin 2022).

lieu cette semaine-là, trois au Steinway Hall, un à la Brooklyn Academy of Music et un au Lincoln Hall à Washington²⁹.

À partir de 1880, Elisha Gray est nommé professeur d'électricité au Oberlin College dans l'Ohio. Il y enseignera durant trente ans jusqu'à sa mort en 1901³⁰.



Figure 2.4: Illustration du modèle du télégraphe musical conservé à la Smithsonian Institution. Numéro d'identification : EM.214294. Numéro de catalogue : 214294.

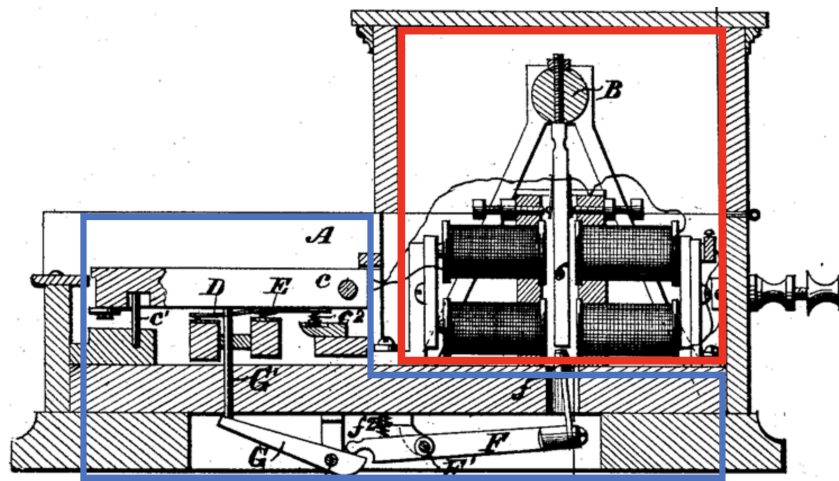


Figure 2.5: Vue de profil du télégraphe musical permettant de mettre en évidence le mécanisme de la touche (encadré bleu) qui met sous tension le circuit électrique oscillant (encadré rouge)³¹.

²⁹ *120 Years of Electronic Music*, «The Musical Telegraph or Electro-Harmonic Telegraph, Elisha Gray. USA, 1874», op. cit.

³⁰ *Britannica*, «Elisha Gray. American inventor», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/biography/Elisha-Gray> (page consultée le 18 juin 2022).

³¹ GRAY Elisha, *Electro-Harmonic Telegraph*, U.S. Patent Application Ser. No. 173,618, op. cit., p. 2.

2.2.2 Notions théoriques

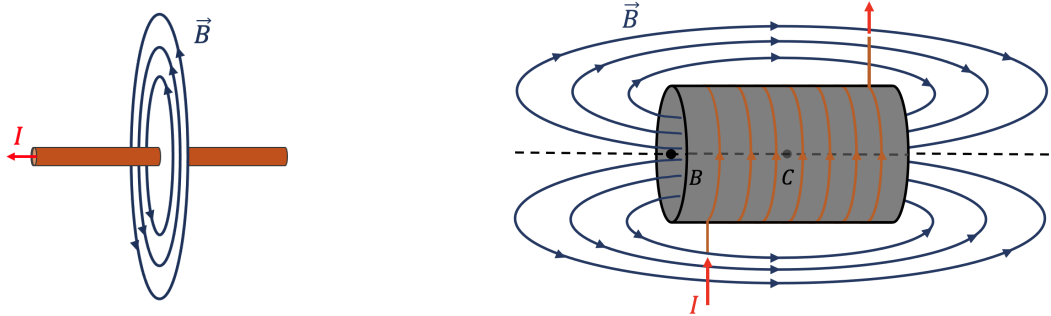
Le télégraphe musical emploie des électroaimants pour faire vibrer une lamelle métallique à sa fréquence de résonance en l'attirant et en la repoussant périodiquement. Cette section fournit deux équations qui décrivent le fonctionnement simplifié de ces électroaimants. Il est tout d'abord fondamental de mentionner qu'un courant électrique continu qui circule dans un fil conducteur génère, autour de ce fil, un champ magnétique constant, tel qu'illustré sur la figure 2.6a. De la même manière, un courant alternatif induit un champ magnétique variable. Le sens des lignes de champ est déterminé par la règle de la main droite³². Si le fil conducteur est enroulé pour lui donner une forme solénoïdale, les lignes de champ s'agencent comme représenté sur la figure 2.6b. En appliquant le théorème d'ampère, nous obtenons l'équation scalaire de l'intensité du champ magnétique (ou champ d'aimantation) exprimé en ampères par mètre au centre C de ce solénoïde :

$$H_C = \frac{N \cdot I}{l} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right], \quad (2.2)$$

avec N le nombre d'enroulements, l la longueur en mètre du solénoïde et I le courant en ampère qui circule dans le fil. Au bord B du solénoïde, toujours selon le théorème d'ampère, nous trouvons :

$$H_B = \frac{N \cdot I}{2l} = \frac{H_C}{2} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]. \quad (2.3)$$

De ces équations, il est important de retenir que le champ magnétique développé au centre ou au bord d'un solénoïde est proportionnel au courant qui le traverse et au nombre d'enroulements qui le constitue. Par ailleurs, lorsque l'on s'éloigne d'un électroaimant, l'intensité du champ magnétique produit décroît. Mentionnons aussi qu'en présence d'un champ magnétique, les électrons des métaux ferromagnétiques s'alignent. Cet alignement produit un champ global suffisamment fort dans le métal pour réagir avec le champ magnétique de l'aimant ou de l'électroaimant. Pour cette raison, les électroaimants attirent les métaux ferromagnétiques.



(a) Illustration des lignes de champ magnétique développées autour d'un fil conducteur traversé par un courant continu d'intensité I . (b) Solénoïde de N enroulements traversés par un courant d'intensité I . Le point C est situé au centre du solénoïde (à l'intérieur), le point B au bord.

Figure 2.6: Illustration de la répartition des lignes du champ magnétique dans le cas d'un fil conducteur et d'un solénoïde. Les équations (2.2) et (2.3) fournissent l'expression analytique du champ magnétique au centre C et sur le bord B du solénoïde en fonction de ses paramètres physiques.

³²En plaçant le pouce de main droite dans la direction du courant, la direction des lignes de champ magnétique est donné par le sens dans lequel les autres doigts se replient.

2.2.3 Principe de fonctionnement

Pour expliquer le fonctionnement de cet instrument, nous nous intéressons au mécanisme associé à une touche, tel qu'illustré sur la figure 2.5, étant donné que chaque touche possède un mécanisme identique. En effet, seules les dimensions de la lamelle métallique (voir explications ci-dessous) varient d'une touche à l'autre.

Il n'est pas pertinent d'étudier le mécanisme de la touche (encadré bleu) sur la figure 2.5, car son seul objectif est de fermer le circuit oscillant (encadré rouge) auquel il est associé. Une illustration plus détaillée de ce type de circuit oscillant est présentée sur la figure 2.7. Cette illustration est issue d'un autre brevet (No 165,728), déposé par Elisha Gray en 1875³³. Précisons que le brevet de 1876 dans lequel Elisha Gray décrit le télégraphe musical complet réutilise le même type de circuit.

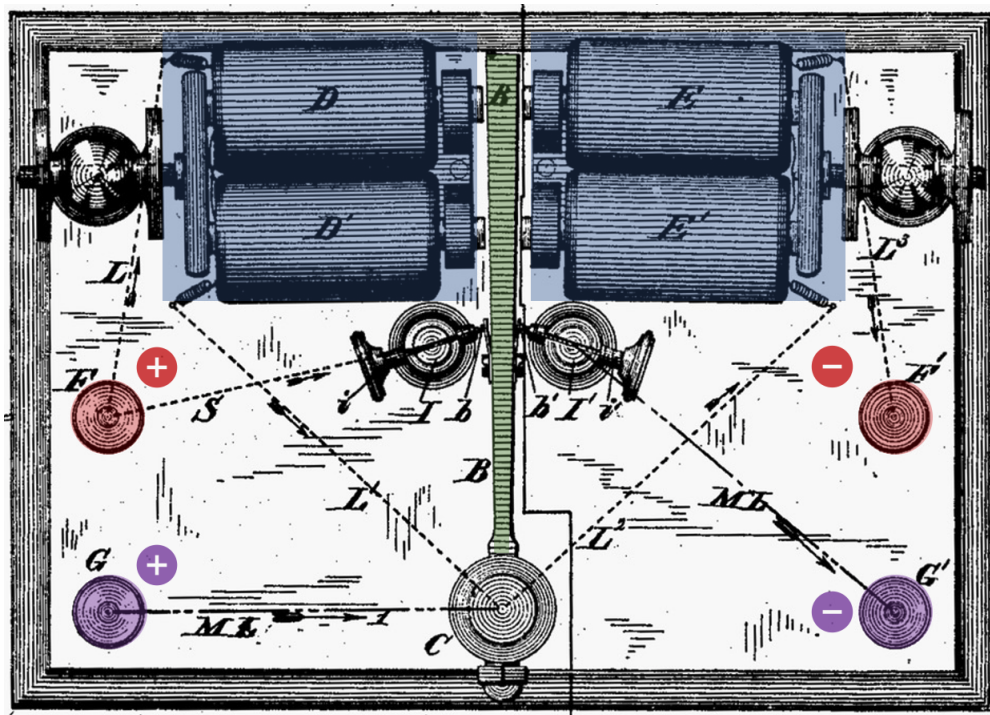


Figure 2.7: Illustration du circuit du télégraphe musical permettant la mise en mouvement de la lamelle métallique située au centre.

Pour décrire efficacement le fonctionnement de ce circuit, il est tout d'abord nécessaire d'identifier ses composants principaux. Sur l'illustration 2.7, ces composants ont été colorés afin de les situer plus aisément. Nous identifions une source de tension (en rouge) entre le pôle positif F et le pôle négatif F' . Cette source de tension est appelée «batterie locale» dans le brevet d'Elisha Gray. Une seconde source de tension (en violet) est formée entre le pôle positif G et le pôle négatif G' . Cette seconde source de tension est appelée «batterie principale».

³³Gray Elisha, *Improvement in Transmitters for Electro-Harmonic Telegraphs*, U.S. Patent Application Ser. No. 165,728, 1875, <https://patentimages.storage.googleapis.com/73/c7/4d/bf4a221201fc53/US165728.pdf> (page consultée le 19 juin 2022).

Les composants DD' et EE' (en bleu) sont des paires d'électroaimants. DD' est capable de développer un champ magnétique plus important que EE' car il possède un nombre plus important d'enroulements³⁴. Au centre de cette architecture (en vert) se trouve une lamelle métallique conductrice ferromagnétique³⁵. Mentionnons que les traits pointillés illustrés sur cette figure sont des fils conducteurs et que b et b' sont des points de contact entre la lamelle métallique centrale et le reste du circuit.

Comme expliqué ci-dessus, abaisser une touche du clavier signifie fermer (mécaniquement) le circuit oscillant représenté sur la figure 2.7. En d'autres mots, cette action met sous tension le circuit électrique local formé entre les pôles F et F' . Le circuit global formé entre les pôles G et G' est lui constamment sous tension lors de l'emploi de l'instrument.

À la suite de cette mise sous tension, un courant électrique circule entre F et F' en suivant le chemin tracé en rouge sur la figure 2.8a. Pour rappel, un courant électrique cherche toujours à emprunter le chemin qui offre le moins de résistance, c'est pourquoi il ne circule pas par l'électroaimant DD' . Un champ magnétique se développe aux bornes de l'électroaimant EE' suite au courant électrique qui le traverse, ce qui a pour conséquence d'attirer la lamelle métallique vers la droite, conformément aux notions théoriques évoquées dans la section 2.2.2.

Au moment où la lamelle métallique s'est suffisamment déplacée vers la droite, le point de contact b est rompu. Le courant ne peut plus emprunter ce chemin et est donc contraint de suivre un nouveau chemin, tel qu'illustré en bleu sur la figure 2.8a. Un même courant électrique circule alors dans les électroaimants DD' et EE' . Comme DD' possède un nombre d'enroulements plus important que EE' , celui-ci développe un champ magnétique plus intense et attire la lamelle métallique vers lui (vers la gauche).

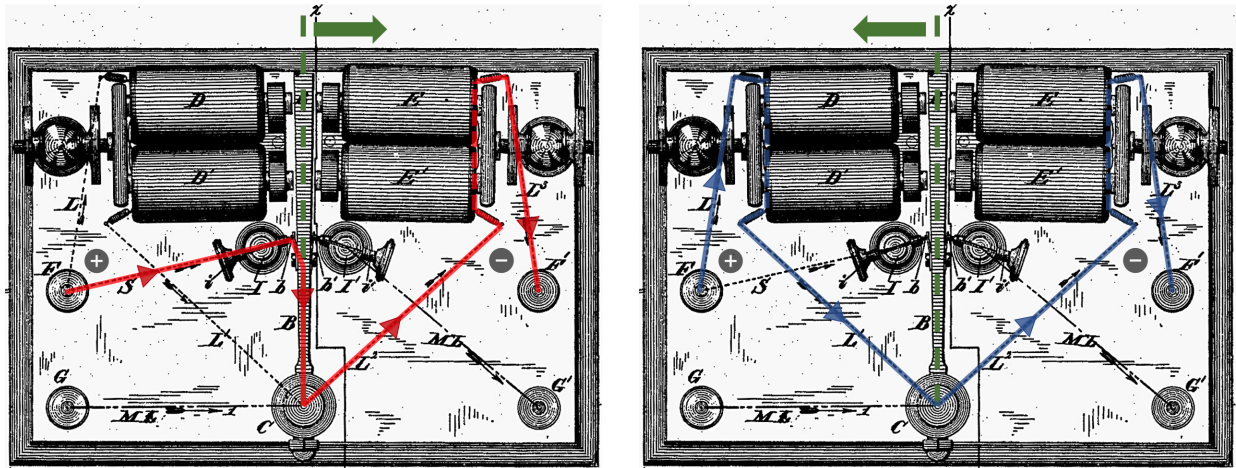
³⁴Cette affirmation est une déduction faite sur la base de l'analyse du brevet d'Elisha Gray. Dans son brevet, il affirme que le «magnétisme» développé par un électroaimant A est supérieur au «magnétisme» développé par un électroaimant B si $R_A > R_B$ pour une même intensité de courant les traversant, avec R_A (resp. R_B) la résistance de l'électroaimant A (resp. B). Or, cela n'est pas tout à fait correct selon nous. En effet, nous avons découvert dans la section 2.2.2, que le champ magnétique (terme scientifiquement plus approprié que le mot «magnétisme» évoqué par Gray) est proportionnel à N , le nombre d'enroulements. Le raisonnement suivant est important à prendre en considération. Si ce nombre d'enroulements est plus élevé, cela signifie que la longueur du fil bobiné est plus longue. De ce fait, étant donné que la résistance d'un fil conducteur est proportionnel à sa longueur par $R = \rho \times \frac{L}{S}$ (avec R la résistance, ρ la résistivité, L la longueur du fil et S la surface de la section de ce même fil), nous pouvons conclure qu'un électroaimant avec un nombre plus important d'enroulements aura une résistance plus élevée. Avec ce commentaire, nous observons que la résistance plus ou moins élevée d'un électroaimant n'est pas la cause d'un champ magnétique plus ou moins intense. Il s'agit d'un paramètre qui est déterminé par le nombre d'enroulement N de l'électroaimant. Le rapport de cause à effet des paramètres dans un électroaimant est donc mal identifié dans le brevet d'Elisha Gray.

³⁵Pour en savoir plus sur les matériaux ferromagnétiques, voir *Iowa State University*, «Magnetism. Ferromagnetic Materials», dans *Iowa State University* (en ligne), <https://www.nde-ed.org/Physics/Magnetism/index.xhtml> (page consultée le 20 juin 2022).

Dès que la lamelle métallique s'est suffisamment déplacée vers la gauche, le point de contact b' est rompu et le point de contact b est rétabli. Cela signifie que le courant peut de nouveau emprunter le chemin illustré en rouge sur la figure 2.8a.

Tant que la touche reste abaissée, la lamelle métallique poursuit son mouvement oscillatoire en se stabilisant à une fréquence de résonance déterminée par ses paramètres physiques. Le circuit global formé entre les pôles G et G' produit un courant alternatif de même fréquence qui peut être transmis via un fil conducteur jusqu'à un haut-parleur. Le point de contact b' sert à ouvrir et fermer le circuit global.

Lors des concerts réalisés par Elisha Gray, le courant alternatif produit était converti acoustiquement avec des haut-parleurs primitifs fonctionnant au moyen d'un corps métallique vibrant sur une caisse de résonance acoustique. Un tel haut-parleur ne bénéficiait pas d'un large volume et ne diffusait pas exactement le même son que celui produit par les lamelles métalliques du télégraphe musical.



(a) Chemin emprunté par le courant électrique lors de la mise sous tension et/ou lorsque le point de contact b est établi. (b) Chemin emprunté par le courant électrique quand le point de contact b est rompu. Dans ce cas, le courant est contraint de passer par DD' .

Figure 2.8: Illustration des deux types de chemins empruntés par le courant électrique dans le circuit oscillant associé à une touche du télégraphe musical. Ce chemin dépend du point de contact b .

2.2.4 Analyses complémentaires

Le télégraphe musical est le premier électrophone bien documenté et opérationnel dont le principe de fonctionnement est analogue aux techniques de transmission télégraphique et téléphonique. L'influence de ce domaine des technologies sur les premiers électrophones se remarque particulièrement vers la fin du XIXe siècle et le début du XXe siècle. Le telharmonium et le thérémine, qui seront étudiés dans les sections suivantes du travail, ont tous deux un lien avec la téléphonie. Le telharmonium était destiné à distribuer de la musique par les lignes téléphoniques tandis que Lev Sergeyevich Termen (Léon Thérémine), inventeur du thérémine, a travaillé comme ingénieur en électricité pour une compagnie téléphonique avant d'inventer son instrument.

Le lien entre téléphonie et musique n'est pas fortuit. En effet, les techniques téléphoniques primitives qui apparaissent vers la fin du XIXe siècle requièrent de générer des signaux électriques alternatifs (p. ex. pour les techniques multiplexées telles que décrites dans la section 2.2.1). La frontière entre téléphonie et musique ne tient qu'à la modulation du signal alternatif à une fréquence audible, à la duplication de ce mécanisme pour différentes fréquences et à la conversion du signal électrique en onde acoustique. Dans le cas du télégraphe musical, Elisha Gray n'avait pas pour intention initiale de concevoir un instrument de musique. L'invention de cet instrument n'est qu'une conséquence indirecte de ses recherches scientifiques.

2.3 Le telharmonium - 1897

Deux idées sont à l'origine de l'invention du telharmonium (ou dynamophone³⁶). La première est de concevoir un instrument idéal à même de générer n'importe quel timbre, de reproduire toute forme d'expressivité et capable de combiner les vertus d'instruments acoustiques existants sans montrer leurs défauts³⁷. La seconde est de transmettre les signaux produits électriquement vers différents foyers ou lieux publics via un réseau téléphonique. Le but de cette distribution est de démocratiser l'accès à la musique et ainsi d'éviter que celle-ci ne demeure le privilège de la classe sociale aisée³⁸.

Dans le contexte des États-Unis de l'époque, rappelons que l'accès à la musique est limité et onéreux. Avant la popularisation des premiers enregistrements, une méthode permettant d'accéder à la musique orchestrale sans dépenser trop d'argent est un souhait pour les différents ménages³⁹.

2.3.1 Découverte et contexte historique

La demande pour le brevet du telharmonium est déposée par l'inventeur et avocat américain Thaddeus Cahill (1867 - 1934) en 1895. L'instrument est breveté en 1897⁴⁰. Cet inventeur, issu d'une famille d'immigrés irlandais, reçoit une éducation poussée à domicile par son père et divers tuteurs privés⁴¹. Au moment de l'octroi du brevet pour le telharmonium, Thaddeus Cahill n'en est pas à son coup d'essai. Depuis ses 18 ans, il invente et dépose des brevets pour des mécanismes de piano, d'orgue, de machine à écrire⁴². Au total, il a conçu trois modèles de telharmonium. Le brevet octroyé en 1897 décrit le premier modèle. Il est assemblé à la main dans son laboratoire à Washington, pèse 6350 kg et est avant tout destiné à

³⁶Les deux appellations sont des synonymes. Afin d'éviter toute confusion, le terme telharmonium est employé tout au long de cette section. La formation du mot «telharmonium» est issue de la combinaison des mots anglais *Telegraphic* et *Harmony*.

³⁷*120 Years of Electronic Music*, «The 'telharmonium' or 'Dynamophone' Thaddeus Cahill, USA 1897», <https://120years.net/wordpress/the-telharmonium-thaddeus-cahill-usa-1897/> (page consultée le 2 juillet 2022).

³⁸WEIDENAR Reynold, *Magic Music from the Telharmonium*, op. cit., p. 7.

³⁹Soulignons que d'autres projets visant à distribuer de la musique via un réseau téléphonique ont vu le jour auparavant. En France, Clément Ader crée en 1881 un système de distribution téléphonique, appelé «Théâtrophone», qui permet à des abonnés d'écouter des opéras et des représentations théâtrales par téléphone. Le *Théâtrophone* a fonctionné jusqu'à ce que la radio le remplace en 1931. De son côté, Tivadar Puskás, inventeur hongrois, conçoit en 1893 un journal téléphonique intitulé *Telefonhírmondó*, qui diffusait de la musique et des informations sur le système téléphonique public de Budapest. Ce système a continué à fonctionner jusqu'à la Seconde Guerre mondiale et la destruction du réseau téléphonique. À Londres en 1895, un service nommé *Electrophone* distribue à des abonnés de la musique de *music-hall* et de la musique légère. Voir *120 Years of Electronic Music*, «The 'telharmonium' or 'Dynamophone' Thaddeus Cahill, USA 1897», op. cit.

⁴⁰Voir CAHILL Thaddeus, *Art Of and Apparatus For Generating and Distributing Music Electrically*, U.S. Patent Application Ser. No. 580,035, 1897, <https://patentimages.storage.googleapis.com/d8/63/b2/7644905570595a/US580035.pdf> (page consultée le 4 juillet 2022).

⁴¹WEIDENAR Reynold, *Magic Music from the Telharmonium*, op. cit., p. 6.

⁴²Ibid., p. XIV.

attirer l'attention du public et d'un mécène⁴³ qui financerait le modèle suivant, plus ambitieux.

En 1902, le deuxième modèle est conçu avec l'aide d'une équipe de cinquante ingénieurs et travailleurs. Lourd de deux cents tonnes, il coûte deux cent mille dollars et a des allures de centrale électrique⁴⁴. En 1906, ce modèle est démonté et transporté en train jusqu'à New York, où il est installé dans le *Telharmonic Hall* construit spécialement pour le recevoir⁴⁵. Au total, plus d'un million de dollars sont dépensés pour la construction et la promotion du deuxième modèle du telharmonium. Une illustration du deuxième modèle du telharmonium est présentée sur la figure 2.9a.

Au début de l'année 1907, la saison d'ouverture du *Telharmonic Hall* fait l'objet d'éloges quotidiens dans les journaux de New York⁴⁶. Cependant, les alternateurs de ce modèle consomment une puissance de quinze mille watts et un courant d'environ un ampère au niveau du récepteur, à la place du faible courant initialement prévu pour les récepteurs téléphoniques de l'époque. En plus de rendre le telharmonium audible, cette puissance interfère avec le système téléphonique de la ville.

Le *Telharmonic Hall* ferme ses portes en 1910 des suites de la panique bancaire américaine de 1907, mais un accord de franchise est signé avec la ville de New York en 1911 pour l'installation de câbles destinés aux services du troisième modèle du telharmonium. En février 1912, le telharmonium reprend son activité en diffusant de la musique dans le *Carnegie Hall*, une salle de concert emblématique de la ville de New York.

Malgré les améliorations et une promotion inlassable pour l'instrument, le telharmonium perd à ce moment son aspect novateur. De plus, il est en retard d'un point de vue technique étant donné que l'emploi de la radiodiffusion est croissant. Finalement, les financements se tarissent à l'approche de la Première Guerre, ce qui amène Thaddeus Cahill à déclarer faillite en 1914⁴⁷.

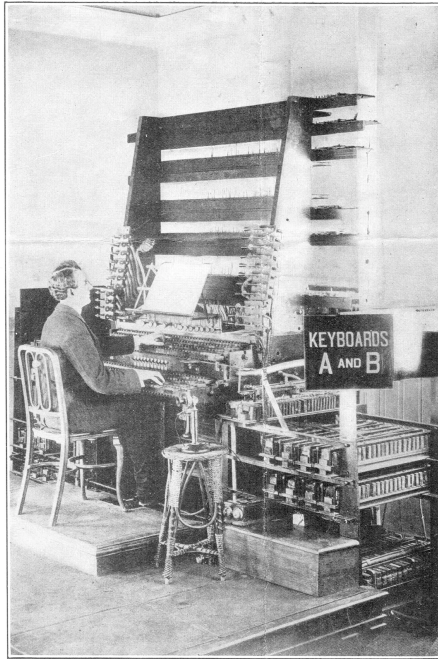
⁴³Les principaux mécènes de Thaddeus Cahill étaient Oscar T. Crosby et Frederick C. Todd. Voir Lettre de Oscar T. Crosby à Frederick C. Todd, 15 décembre 1904. Cette lettre est disponible sur le site suivant : *Telharmonium Historical Documents*, «A Chronological Archive of Letters, Booklets, Programs, Clippings, and Writings on the Telharmonium», <https://magneticmusic.ws/telharmonium%20hist.htm> (page consultée le 3 juillet 2022).

⁴⁴La mention de deux cents tonnes et de deux cent mille dollars apparaît à plusieurs reprises dans des écrits contemporains du telharmonium. Pour information, deux cent mille dollars en 1906 correspondent à 6.5 millions de dollars aujourd'hui. Cela permet de mieux saisir l'investissement colossal de cette construction. Cette conversion a été effectuée avec le site *CPI Inflation Calculator*, voir <https://www.officialdata.org/us/inflation/1906?amount=200000>.

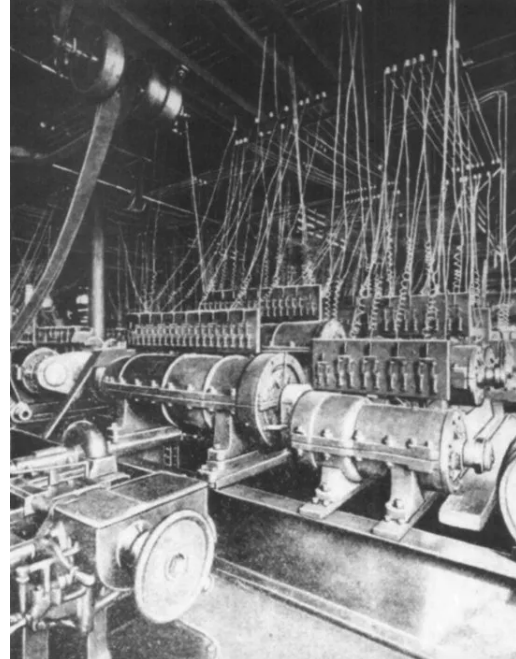
⁴⁵Durant son transfert entre Holyoke et New York, le telharmonium occupe trente wagons chargés. Cette information apparaît pour la première fois dans l'ouvrage de Benjamin F. Miessner *Electronic Music and Instruments*. Voir MIESSNER Benjamin F., «Electronic Music and Instruments», dans *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 24/11 (1936), p. 1427-1463, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1686031> (page consultée le 3 juillet 2022).

⁴⁶WEIDENAAR Reynold, *Magical Music from the Telharmonium*, op. cit., p. XV.

⁴⁷Ibid.



(a) Clavier et panneau de contrôle du deuxième modèle du telharmonium.



(b) Agencement des dynamos du troisième modèle du telharmonium.

Figure 2.9: Illustrations du telharmonium⁴⁸.

Lors de l'invention du telharmonium, Thaddeus Cahill comprend parfaitement les concepts théoriques sur la perception du son énoncés par Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz dans son ouvrage *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music* publié en 1862. Cette bonne compréhension se manifeste particulièrement dans le mécanisme de synthèse additive du telharmonium (présenté dans la section 2.3.3). Durant la seconde moitié du XIXe siècle, cet ouvrage a une incidence retentissante sur la compréhension des sons composés⁴⁹. La quatrième édition de cet ouvrage est publiée en 1877⁵⁰ puis est traduite de l'allemand à anglais en 1885 par Alexander J. Ellis⁵¹. Étant donné que le telharmonium permet de générer et combiner des signaux de fréquences différentes par synthèse additive, il peut être considéré comme le premier synthétiseur musical.

⁴⁸Ces illustrations sont issues de l'ouvrage *Magic Music from the Telharmonium*. Voir WEIDENAAR Reynold, *Magic Music from the Telharmonium*, op. cit., p. 108 & 234.

⁴⁹Les sons composés correspondent à des mouvements périodiques qui peuvent être représentés comme une somme de sons purs. Un son pur se représente sous la forme d'une sinusoïde. Voir CEULEMANS Anne-Emmanuelle, *Technologie de la musique - organologie (partie systématique)*. LMUSI1516, cours de musicologie dispensée à L'UCLouvain en 2017-2018, syllabus p. 8.

⁵⁰Référence complète de l'ouvrage : VON HELMHOLTZ Hermann, *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music. Theory of Music*, 4^e éd., trad. de l'allemand par Alexander John Ellis, New York, Dover Publications, 1885.

⁵¹Alexander John Ellis (1814-1890) était un mathématicien, philologue et phonéticien anglais, qui a également contribué à la musicologie. Pour en apprendre plus sur ce mathématicien, voir STOCK Jonathan P. J., «Alexander J. Ellis and His Place in the History of Ethnomusicology», dans *Ethnomusicology*, vol. 51/2 (2007), p. 306-325, <http://www.jstor.org/stable/20174527> (page consultée le 2 juillet 2022).

Mentionnons également que Hermann von Helmholtz construisit comme outil d'expérimentation le *Helmholtz Sound Synthesizer*⁵², un instrument produisant un son de fréquence fixe composé par addition d'harmoniques successives.

Au vu des paragraphes précédents, nous apercevons que le projet derrière le telharmonium prolonge celui du télégraphe musical d'Elisha Gray décrit dans la section 2.2. Toutefois, le telharmonium se développe à une échelle bien plus importante, car le signal électrique est diffusé à plusieurs récepteurs, contre un seul pour le télégraphe musical. Par ailleurs, le telharmonium est capable de produire des signaux de large amplitude (au moyen de puissantes dynamos électriques), des timbres variables et permet aux interprètes de jouer avec des nuances grâce à un mécanisme contrôlant le volume de chaque note (voir section 2.3.3). Thaddeus Cahill est bien au courant des travaux d'Elisha Gray quand il développe le telharmonium. Il formule par ailleurs des critiques à l'égard du télégraphe musical dans une lettre appuyant la demande de brevet pour le telharmonium⁵³, Cahill critique l'instrument de Gray pour ses nombreux défauts (p. ex. une faible puissance, l'incapacité de façonner le timbre ou bien de contrôler l'expressivité) en soulignant le caractère unique de sa propre invention⁵⁴ :

[Le télégraphe musical est] pratiquement inutile. Aucune personne de goût ou cultivée ne peut être supposée tirer un quelconque plaisir d'une musique rendue dans des tons pauvres et durs, avec une puissance inégale, et absolument sans expression ou variation⁵⁵.

Étant donné qu'aucun enregistrement du telharmonium n'a été réalisé et qu'aucun des trois modèles conçus ne nous est parvenu, seuls les témoignages de contemporains nous permettent de nous faire une idée de la sonorité de cet instrument. Ray Stannard Baker déclara au sujet du telharmonium dans le *McClure's Magazine* :

La première impression que la musique [du telharmonium] produit sur l'auditeur est sa différence singulière par rapport à toute autre musique jamais entendue auparavant : la plénitude, la rondeur, la complétude de ses sons. Et vraiment, elle est différente et plus parfaite : mais curieusement, alors qu'elle possède des

⁵²Dans cet instrument, des diapasons sont mis en vibration par des électroaimants, puis la vibration de chaque diapason est amplifiée au moyen d'un résonateur de Helmholtz (cavité fermée communiquant avec l'air extérieur par un col relativement petit avec pour propriété de résonner sur une gamme de fréquences étroite). En utilisant un obturateur mécanique devant chaque résonateur, les harmoniques peuvent être filtrées. Cet instrument a permis à Hermann von Helmholtz de mieux comprendre la nature de la parole et des voyelles, ces dernières étant diverses combinaisons d'harmoniques résonnantes et formants créées des muscles du conduit vocal *Harvard Brain Tour*, «Helmholtz Sound Synthesizer», <https://braintour.harvard.edu/archives/portfolio-items/helmholtz-sound-synthesizer> (page consultée le 2 juillet 2022). Pour en savoir plus sur les résonateurs de Helmholtz, voir CAMPBELL Murray, «Helmholtz resonator», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000046588?&mediaType=Article> (page consultée le 2 juillet 2022).

⁵³*120 Years of Electronic Music*, «The 'telharmonium' or 'Dynamophone' Thaddeus Cahill, USA 1897», op. cit.

⁵⁴Paradoxalement, la première demande de brevet de Thaddeus Cahill est rejetée parce que le telharmonium est, entre autres, jugé trop similaire à l'invention d'Elisha Gray.

⁵⁵Lettre de Thaddeus Cahill et Ellis Spear (avocat), au bureau des brevets, 7 avril 1896. Traduction de l'anglais avec l'aide du site Deepl.com.

gammes de sons qui lui sont propres, on peut l'amener à imiter de près d'autres instruments de musique : la flûte, le hautbois, le clairon, le cor et le violoncelle, le piano et le violon n'étant pas encore aussi parfaits. Demandez aux interprètes de jouer de la musique de fifre et ils vous joueront du Dixie avec le grincement des tuyaux faussement parfait. En fait [...] l'exécutant sur cette merveilleuse machine peut construire n'importe quelle sorte de tonalité qu'il désire : il peut produire la note parfaite de la flûte ou la note imparfaite du piano [...].

Il est tout aussi possible, en effet, de distinguer l'individualité des musiciens sur cet instrument que sur un piano ou un violon. La machine répond parfaitement à l'habileté et à l'émotion de l'instrumentiste ; il en tire ce qu'il y met, de sorte que la musique est autant une production humaine que si l'instrumentiste jouait sur un piano [...].

La machine actuelle est mieux adaptée à la classe supérieure de musique. Elle ne produit pas avec un grand succès le rattlebang du ragtime, ce qui est peut-être un avantage⁵⁶.

Nous observons un certain parti pris dans cette critique très élogieuse du telharmonium. Cela n'est pas vraiment surprenant. En effet, au cours du XIXe siècle et au début du XXe siècle, il est courant que des entreprises paient des journalistes pour écrire des articles de presse qui semblent être informatifs alors qu'il s'agit en fait de publicités. Nous pouvons faire l'hypothèse que cet instrument avait néanmoins du mal à reproduire les sons accidentels caractéristiques, mais pas forcément désagréables, de certains instruments acoustiques (cassures dans le son, grincements, etc.).

⁵⁶BAKER Ray Stannard, «A Wonderful New Musical Instrument», dans *McClure's Magazine*, New York, 1^{er} août 1906. Traduction de l'anglais avec l'aide du site Deepl.com.

2.3.2 Notions théoriques

Synthèse additive

Selon la loi de Fourier, tout phénomène périodique comme le son produit par un instrument de musique peut être décomposé en une somme de sinusoïdes⁵⁷. Les fréquences respectives de ces sinusoïdes appelées harmoniques sont des multiples entiers de la composante la plus grave, appelée fondamentale. L'amplitude relative de chaque harmonique détermine le contenu spectral d'un son composé, autrement dit d'une part importante de son timbre.

La synthèse additive est une méthode qui permet de générer des sons composés en additionnant des sinusoïdes dont les fréquences respectives correspondent à la série des harmoniques d'une composante fondamentale⁵⁸. Ces sinusoïdes peuvent être générées de différentes façons. Dans le cas du telharmonium, elles sont obtenues en filtrant des signaux carrés formés au moyen de dynamos ouvrant et fermant périodiquement des circuits électriques.

Induction électromagnétique

Michael Faraday découvre l'induction électromagnétique en 1831. Considérons un fil conducteur soumis à un flux de champ magnétique variable, si le circuit dans lequel se trouve ce conducteur est fermé, un courant est induit dans ce circuit suite à la création d'une force électromotrice. L'équation de cette force électromotrice est donnée par :

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad [\text{V}], \quad (2.4)$$

où $d\Phi$ représente la variation du flux magnétique dans le conducteur, dt représente l'intervalle de temps durant lequel la variation de flux magnétique est mesurée et Φ est le flux du champ magnétique à travers le conducteur. Cette expression est connue comme la forme intégrale de la loi de Faraday.

Si la variation du flux magnétique provient d'un électroaimant, nous obtenons également un courant induit dans le conducteur. On parle de couplage magnétique entre deux conducteurs quand la variation du courant dans un fil induit une tension aux extrémités de l'autre fil par induction électromagnétique. La plupart des convertisseurs d'énergie électrique reposent sur ce principe.

Précisons également que modifier la distance qui sépare les deux conducteurs permet de régler l'intensité du courant induit. En effet, si la distance entre les deux conducteurs augmente, le champ magnétique B décroît, ce qui diminue la variation de flux magnétique $d\Phi$, donc la force électromotrice par l'équation (2.4) et par conséquent le courant induit.

⁵⁷Une sinusoïde décrit un son pur en fonction de son intensité et de sa fréquence. L'amplitude d'une sinusoïde détermine l'intensité, c'est-à-dire la puissance par unité de surface transportée par l'onde.

⁵⁸La synthèse soustractive existe aussi. Dans cette méthode, un son composé et riche en harmoniques est généré par un oscillateur. Ce son composé est par exemple de forme carrée, rectangulaire, triangulaire ou à dent de scie. Par effet de filtrage, les harmoniques sont retirées jusqu'à obtenir le son souhaité.

2.3.3 Principe de fonctionnement

Cette section décrit le premier modèle du telharmonium breveté en 1897⁵⁹. Afin de faciliter cette description, il est essentiel de présenter le fonctionnement de cet instrument en trois sections principales : la synthèse additive qui produit les signaux alternatifs, le mécanisme de contrôle du volume de chaque touche et le haut-parleur. La méthodologie employée pour illustrer convenablement le fonctionnement du telharmonium repose sur des schémas colorés et fléchés. Ils permettent une compréhension visuelle des différentes sections susmentionnées. Les illustrations fournies sont issues du brevet de Thaddeus Cahill.

Synthèse additive appliquée dans le telharmonium

Thaddeus Cahill emploie le principe de synthèse additive présenté dans la section 2.3.2 afin d'obtenir le son harmonieux et modulable qu'il recherche. Pour appliquer ce principe en pratique, chaque touche du telharmonium est associée à une roue phonique (angl. *tonewheel*). Chaque roue phonique est composée de six roues dentées. Au sein d'une roue phonique, la roue dentée avec le moins d'alternances correspond à la fréquence fondamentale. Les roues dentées restantes correspondent aux cinq premières harmoniques de cette fréquence fondamentale (les cinq premières fréquences multiples entières de la fréquence fondamentale).

Les alternances de couleurs noires et blanches sur les roues dentées (voir figure 2.10) correspondent à des matériaux distincts. La couleur blanche (resp. noire) représente un conducteur électrique (resp. un isolant électrique). De cette manière, si un circuit électronique est connecté à chaque roue dentée au moyen de brosses de contact, la mise en rotation de la roue phonique ouvre et ferme successivement chacun de ces circuits.

L'ouverture et la fermeture brusque de ces circuits génèrent un signal carré (*square wave* en anglais). Thaddeus Cahill fait ensuite passer chaque signal carré par une succession de bobines couplées magnétiquement. Cette opération vise à filtrer les fréquences indésirables et à obtenir, pour chaque roue dentée, un signal sinusoïdal correspondant⁶⁰. Le courant est induit de bobine en bobine conformément à la théorie développée dans la section 2.3.2. Le dernier couplage inductif permet d'additionner les courants de chaque roue dentée et ainsi obtenir un son composé d'une somme de sinusoïdes.

⁵⁹CAHILL Thaddeus, *Art Of and Apparatus For Generating and Distributing Music Electrically*, U.S. Patent Application Ser. No. 580,035, op. cit.

⁶⁰Ce procédé repose sur le principe d'inductance de fuite. L'inductance de fuite est un composant inductif parasite qui résulte de la liaison magnétique imparfaite d'un enroulement à l'autre au sein d'une bobine. Dans un circuit équivalent, la chute de tension aux bornes de cette inductance de fuite en série est fonction de la fréquence. Pour les composantes harmoniques supérieures, cette chute de tension est plus élevée. Si un signal carré est induit dans une bobine, les composantes harmoniques haute fréquence sont donc plus atténuées. Le signal est pour ainsi dire «lissé». Thaddeus Cahill répète cette opération successivement de bobine en bobine pour obtenir une sinusoïde de plus en plus pure. Précisons aussi que la valeur de chaque bobine doit être adaptée en fonction de la fréquence qu'elle est censée filtrer.

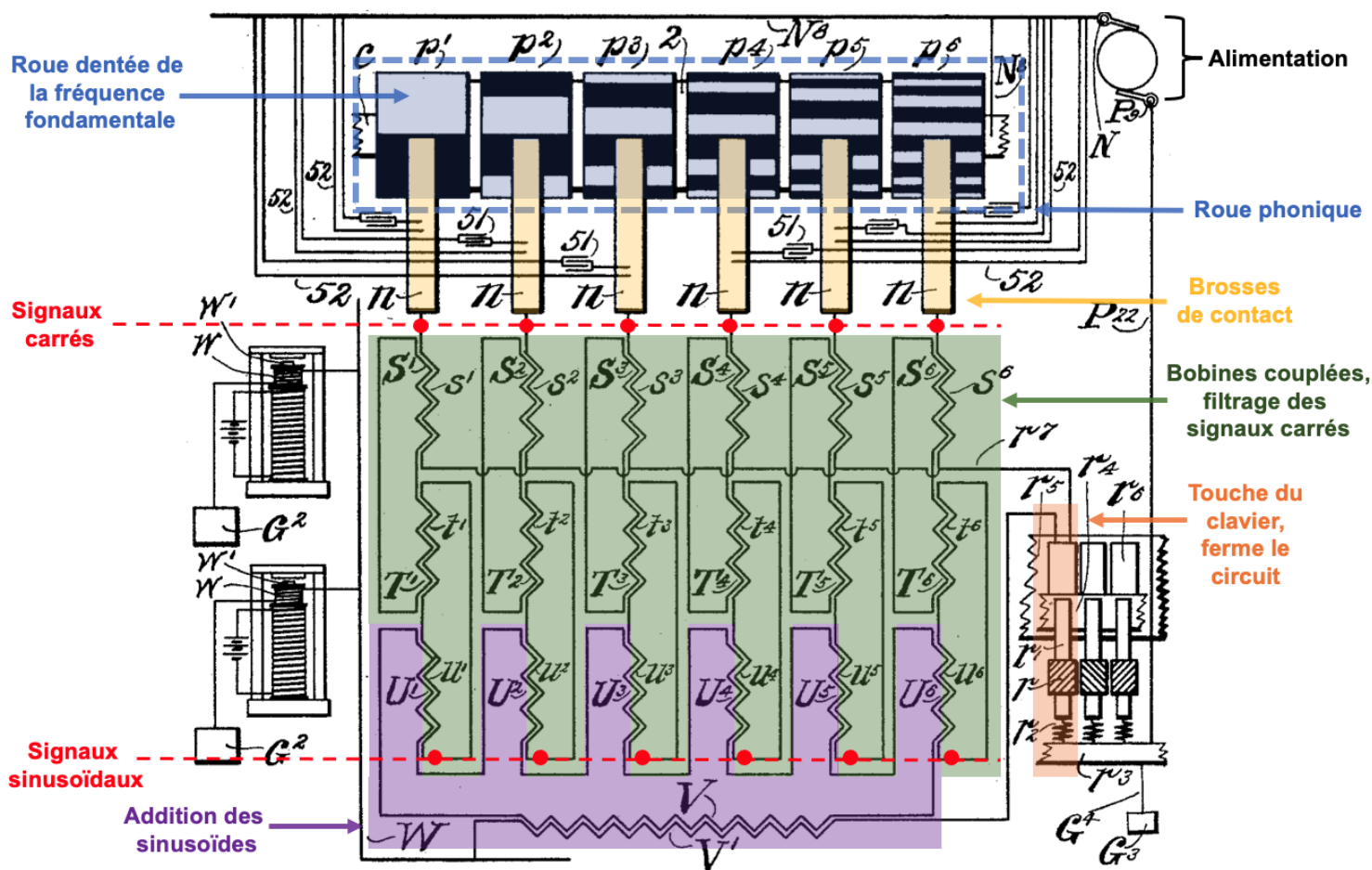


Figure 2.10: Illustration du circuit associé à une roue phonique. La roue phonique (encadré bleu pointillé) est formée de six roues dentées (en bleu). La roue phonique tourne en permanence. Lorsque la touche associée est abaissée (en orange), des signaux carrés sont générés aux points indiqués en passant par les brosses de contact (en jaune). Le courant électrique circule depuis la source de tension (alimentation du circuit) par les conducteurs électriques présents dans les roues dentées. Les signaux carrés sont alors filtrés via une succession de bobines magnétiquement couplées (en vert). Les sinusoïdes résultantes sont additionnées de façon inductive (en mauve) pour former un son composé conformément à la théorie de la synthèse additive. Il est possible de modifier l'amplitude relative de chaque harmonique du son en adaptant les distances entre les différentes bobines u et U . Cela modifie le contenu spectral du son composé.

Comme pour le télégraphe musical, abaisser une touche du clavier a pour conséquence de mettre sous tension les circuits qui lui sont associés et produire la note qui lui correspond.

Le premier modèle du telharmonium est constitué de sept octaves. Afin de simplifier la conception de son instrument, Thaddeus Cahill fixe les roues phoniques produisant une même note, mais à des octaves différentes, autour d'un même axe métallique. De cette manière, il suffit de multiplier par deux le nombre de dents d'une roue phonique à l'autre. En effet, pour une même vitesse de rotation, doubler le nombre de dents double la fréquence du signal produit (cf. définition d'une octave). Pour produire les douze notes de la gamme chromatique, douze axes tournant chacun à des vitesses différentes sont nécessaires. À chaque axe métallique sont associées sept roues phoniques pour les sept octaves (voir figure 2.11).

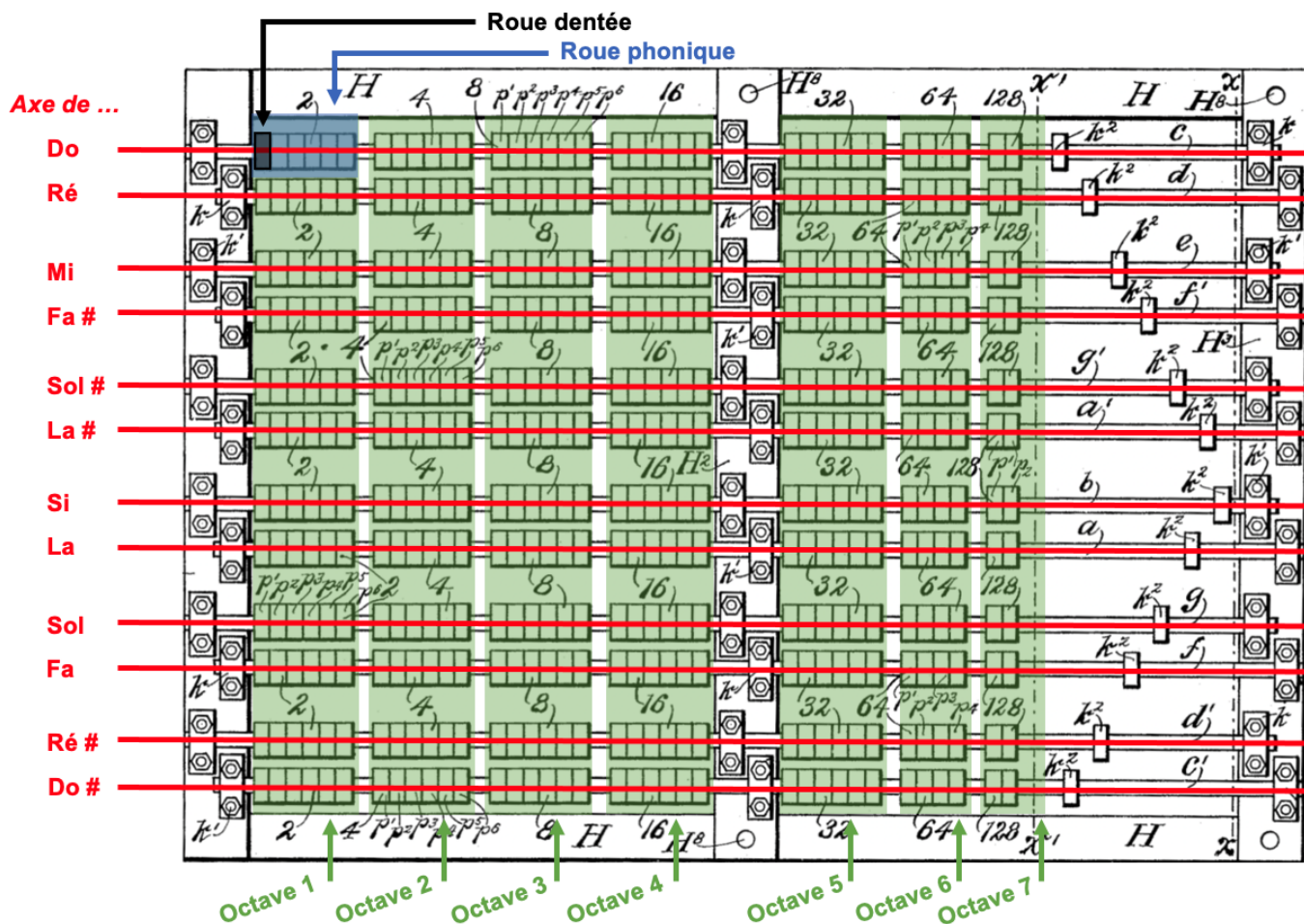


Figure 2.11: Illustration de l'agencement des roues phoniques du telharmonium. Les douze axes rouges correspondent aux douze tons de la gamme chromatique. Chaque axe tourne à une vitesse différente, adaptée pour produire les notes souhaitées. Sept roues phoniques sont fixées par axe. Ces sept roues phoniques produisent une même note à des octaves différentes. Pour rappel, chaque roue phonique (en bleu) est composée de roues dentées (en noir) qui représentent les harmoniques de la note produite. Les notes les plus aiguës (voir octaves 6-7) possèdent moins de roues dentées.

Mécanisme de contrôle du volume

Le telharmonium emploie le couplage magnétique pour moduler le volume de chaque note proportionnellement à la force appliquée par le musicien sur la touche. Le mécanisme associé à une touche est représenté sur la figure 2.12.

Dans cette section, nous proposons une explication simplifiée de ce mécanisme. Lorsque la touche du clavier (en jaune) est abaissée, les mouvements des mécanismes intermédiaires (en vert) provoquent la mise en contact entre un levier (en bleu) et un cylindre qui tourne (en mauve). Ce cylindre tourne selon le sens de la flèche qui lui est adjoint.

Cette mise en contact a pour conséquence de faire pivoter un marteau (en rouge) vers le haut. Ce même marteau frappe une tige métallique (en orange) à laquelle est fixée une bobine V . Ce mouvement rapproche la bobine V de la bobine V' située dans son axe⁶¹. Plus le musicien applique une force importante sur la touche, plus le marteau frappe vigoureusement la tige métallique, donc plus la bobine V sera couplée avec la bobine V' . Comme détaillé dans la section 2.3.2, cela produit un courant induit plus important dans la bobine V' . L'amplitude du courant alternatif dans V' est donc d'autant plus importante que la force appliquée par le musicien est grande. Un courant plus (resp. moins) intense dans V' produit un son plus (resp. moins) intense lorsqu'il est transmis aux haut-parleurs.

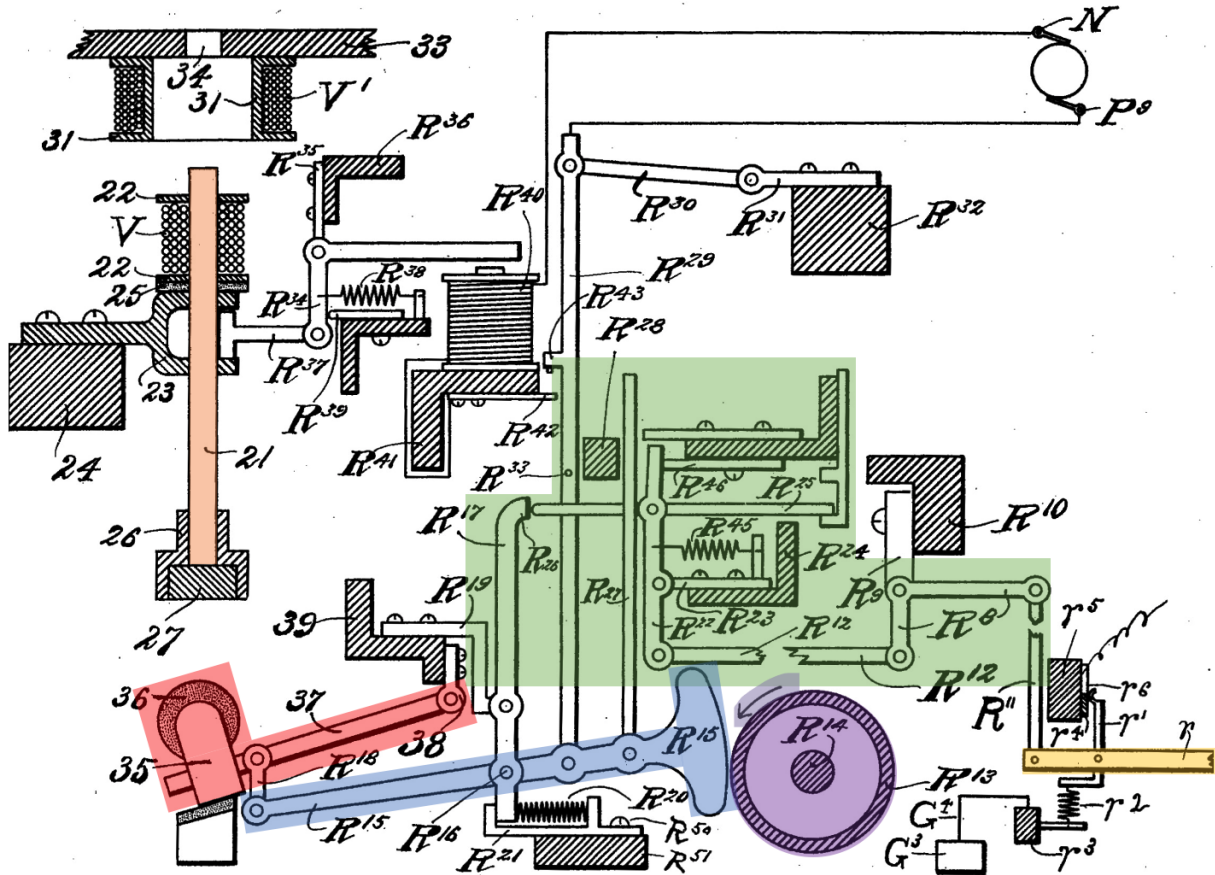


Figure 2.12: Illustration du mécanisme permettant de contrôler le volume du son de chaque note sur la base de la force appliquée par le musicien sur la touche. Les couleurs permettent de focaliser l'attention du lecteur sur les parties principales du mécanisme. Plus la force appliquée sur la touche est importante, plus le marteau augmente le couplage entre les bobines V et V' en les rapprochant. Cela augmente le courant induit dans V' . Par la suite, ce courant est converti en onde acoustique au moyen de haut-parleurs décrits dans la section suivante.

⁶¹Pour rappel, le signal électrique associé à la note circule dans V (voir figure 2.10). Ce signal électrique est composé par une fréquence fondamentale et cinq fréquences harmoniques, tel que décrit dans la section 2.3.3.

Haut-parleur du telharmonium

Dans son brevet déposé en 1897, Thaddeus Cahill précise que le telharmonium peut être sonorisé avec n'importe quel type de haut-parleur. Toutefois, il propose un nouveau modèle de haut-parleur qui repose sur la mise en vibration d'une plaque métallique. Cette mise en vibration est déclenchée par un champ magnétique variable généré par des électroaimants. Selon l'inventeur, cette topologie a l'avantage de proposer un volume plus élevé.

Les électroaimants du haut-parleur (voir W sur la figure 2.13) convertissent les signaux électriques des roues phoniques (représentées sur la figure 2.11) en ondes acoustiques en faisant vibrer la plaque métallique 43 . Des noyaux de fer doux W' sont placés à l'intérieur des électroaimants W pour renforcer leur champ magnétique. Chaque noyau est magnétisé de façon constante par une bobine d'appui W^2 .

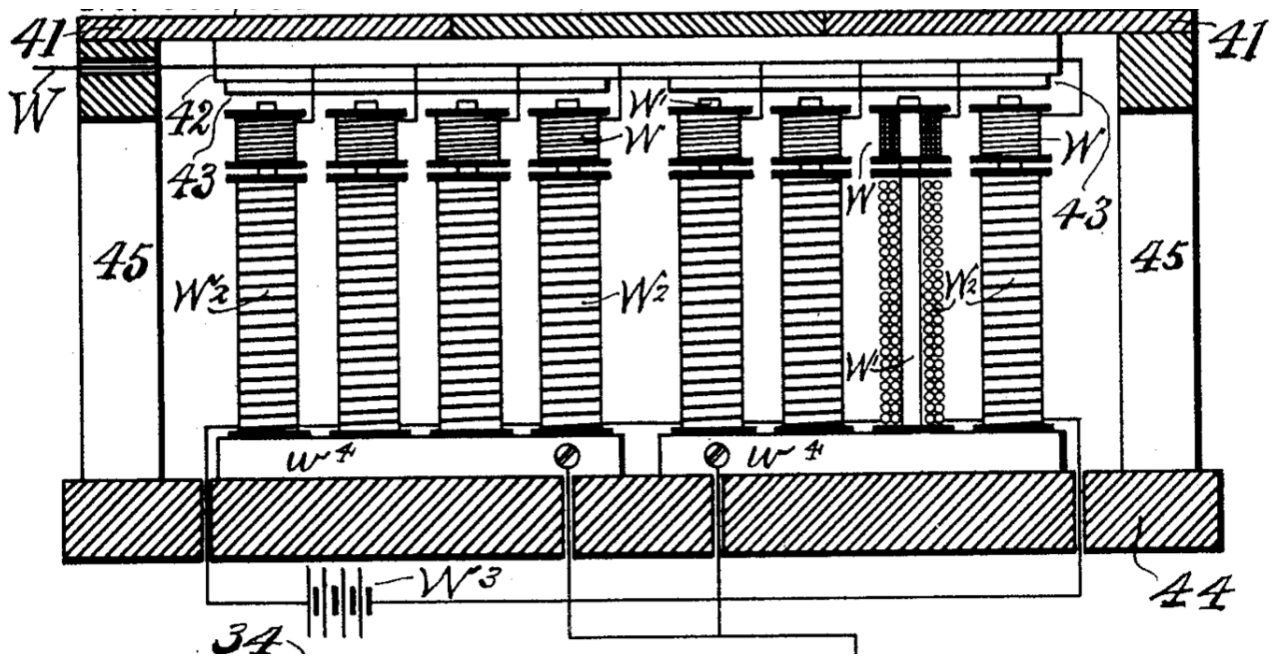


Figure 2.13: Illustration du haut-parleur utilisé dans le premier modèle du telharmonium. Le principe de fonctionnement repose sur la mise en vibration d'une plaque métallique au moyen d'électroaimants traversés par le courant alternatif provenant des roues phoniques. Comme le précise Thaddeus Cahill, ce type de haut-parleur n'est qu'une solution parmi d'autres.

2.3.4 Analyses complémentaires

L'étude menée dans la section 2.3.1 illustre comment l'émergence du telharmonium s'inscrit dans un contexte historique difficile et peu favorable à sa pérennité. Entre sa création en 1897 et la saison d'ouverture au *Telharmonic Hall* en 1907, cet instrument se développe considérablement et attire l'attention du public. Cependant, deux événements majeurs entraîneront la réduction de ses financements à partir de cette même année : la panique bancaire américaine de 1907 et le début de la Première Guerre mondiale en 1914.

Outre le contexte historique défavorable, les limitations techniques rencontrées conduisent Thaddeus Cahill à la faillite. En effet, le manque de moyens d'amplification électrique⁶² contraint Cahill à employer des systèmes énergivores pour assurer la génération de courants suffisamment élevés⁶³. L'utilisation du telharmonium avait donc un coût additionnel aux coûts de construction initiaux non négligeables. Ces coûts élevés n'auraient pas posé problème si les recettes engrangées par l'instrument avaient été fructueuses, mais une autre raison empêcha d'attirer suffisamment de clients : l'interférence entre le telharmonium et le réseau téléphonique.

Au vu des points d'analyses abordés jusqu'à présent dans ce chapitre, nous faisons l'hypothèse que les technologies électriques ne permettaient pas, avant l'apparition de l'audion en 1906, de concevoir des instruments électriques ou des électrophones susceptibles de rencontrer un succès durable outre la curiosité intellectuelle suscitée.

⁶²L'audion, précurseur de la triode, est le premier tube à vide doté d'une grille de contrôle entre la plaque anodique et le filament cathodique. Il est inventé en 1906 par Lee De Forest. Plus de détails au sujet de la triode seront fournis dans la section 2.4.2. Voir FIELDING Raymond E., «Lee de Forest. American Inventor», op. cit.

⁶³Le principe de fonctionnement du telharmonium est analogue à celui de l'orgue Hammond, instrument breveté en 1934. Ce dernier se base aussi sur l'addition de tons générés par des roues dentées. Cependant, à la différence du telharmonium, l'orgue Hammond emploie des moyens d'amplification électrique qui lui ont permis de miniaturiser le système de roues dentées. Cette miniaturisation diminue d'une part le coût de construction et d'autre part la consommation de puissance, car de gros moteurs ne sont plus requis. Voir DAVIES Hugh, «Hammond Organ», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000012289> (page consultée le 3 juillet 2022).

2.4 Le thérémine - 1919

Dans la famille des électrophones, le thérémine est le premier instrument électronique à bénéficier d'une renommée internationale. Son principe de fonctionnement presque magique à première vue séduit la haute société européenne et américaine au début des années 1920.

2.4.1 Découverte et contexte historique

Lev Sergeyevich Termen (américanisé en Léon Thérémine vers l'anglais) est né en 1896 à Saint-Petersbourg dans une Russie encore tsariste. Durant sa jeunesse, il est attiré par les sciences et la musique, il s'intéresse particulièrement à l'astronomie et joue du violoncelle. En jouant de cet instrument, le jeune Léon Thérémine ressent déjà une frustration liée à la frontière physique entre la musique et son propre mouvement⁶⁴. En 1914, il développe sa première passion en intégrant l'université de Saint-Petersbourg en physique et en astronomie⁶⁵. Les compétences qu'il y développe lui font éviter l'enrôlement pour le front lorsque la Russie est impliquée cette même année dans la Première Guerre mondiale. Il étudie également le violoncelle au Conservatoire de musique de Saint-Petersbourg⁶⁶. Léon Thérémine fréquente par la suite une école supérieure d'électronique pour officiers et obtient un diplôme de radio-ingénieur militaire. Durant les trois années suivantes, il travaille dans la conception de stations de radio⁶⁷. En 1919, Abram Fedorovich Ioffe, ami de longue date⁶⁸, lui propose de travailler auprès de lui. Thérémine accepte la proposition sans hésiter. Sous la responsabilité d'Ioffe, Léon Theremin réalise des expériences sur la capacité électrique du corps humain et les milieux diélectriques⁶⁹. Dans le cadre de ses recherches, sa première invention est un *radio watchman*, un système à même de détecter la présence d'un individu sur la base de la présence ou non de charges électriques dans un espace donné⁷⁰.

⁶⁴À ce sujet, il ajoute avoir «réalisé qu'il y avait un fossé entre la musique elle-même et sa production mécanique», il a voulu réunir les deux. Voir GLINSKY Albert, *Theremin. Ether Music and Espionage*, s.l., Université de l'Illinois, 2005, p. 11. Traduction de l'anglais avec l'aide du site Deepl.com.

⁶⁵Idid., p. 13.

⁶⁶Voir NIKITIN Pavel, «Leon Theremin (Lev Termen)», dans *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54/5 (2012), p. 252.

⁶⁷GLINSKY Albert, *Theremin. Ether Music and Espionage*, op. cit. p. 14.

⁶⁸Léon Thérémine rencontre Abram Fedorovich Ioffe le 9 mai 1913 lors de la défense de la thèse de ce dernier. Abram Fedorovich Ioffe (1880-1960) est le fondateur des recherches soviétiques sur les semi-conducteurs et la physique nucléaire, voir MIKEROV Alexander G., «From History of Electrical Engineering V: Electron Discovery and its Properties Estimation», dans *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference*, s.l., IEEE, 2016, p. 3-7, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7448102?reload=true> (page consultée le 6 juillet 2022).

⁶⁹Les milieux diélectriques ne contiennent aucune charge électrique mobile à l'échelle macroscopique. Malgré cela, les diélectriques ne sont pas électriquement inertes puisque leurs constituants peuvent présenter des dipôles électrostatiques à l'échelle atomique, qui interagiront avec un champ électrique externe lorsqu'il sera appliqué. La plupart des diélectriques sont électriquement isolants. Le vide, le verre, le bois, l'eau pure et de nombreux plastiques sont des exemples de milieux diélectriques. Pour en savoir plus, voir VEGA Juan Martinez, *Matériaux diélectriques pour le génie électrique - Volume 1*, s.l., Hermès - Lavoisier, 2007.

⁷⁰Cette variation de quantité de charges électriques est détectée sous la forme d'une variation de capacité dans un circuit oscillant. Lorsque la quantité de charges varie, cela induit une modification de la fréquence de résonance de ce circuit et ferme un *switch* électronique.

C'est dans le cadre de ses activités de recherche pour Abram Fedorovich Ioffe et par expérimentations successives que Léon Thérémine découvre le principe de fonctionnement de l'instrument qui portera plus tard son nom⁷¹. Un extrait de l'ouvrage d'Albert Glinsky *Theremin, Ether Music and Espionage* illustre comment la découverte du principe de fonctionnement du thérémine a eu lieu :

Ioffe lui demanda de concevoir un appareil permettant de mesurer la densité et la constante diélectrique des gaz dans des conditions variables de température et de pression. Lev assembla un circuit et plaça un gaz entre deux plaques d'un condensateur. Il découvrit qu'une augmentation de la température entraînait l'expansion du gaz et une modification de la capacité du circuit. Le changement a été enregistré par les fluctuations de l'aiguille d'un compteur. L'appareil était très sensible, interprétant le moindre mouvement de la main de Lev dans l'air ambiant comme une augmentation de la densité, faisant dévier l'aiguille. Pour mesurer avec plus de précision la subtilité des fluctuations des gaz, il adapta le système en utilisant un oscillateur audionique dans un circuit accordé. Cette disposition - employée par son *radio watchman*, et dans les émetteurs radio en général - filtrait les harmoniques générées par l'oscillateur pour capter une seule fréquence, qu'il rendait dans ce cas audible par une paire d'écouteurs. Lev a ajouté un cadran à condensateur semblable à ceux utilisés par les radios pour accorder une fréquence donnée. Lorsqu'il «accordait» la densité d'un gaz particulier, la hauteur constante de la tonalité de l'oscillateur sifflait dans les écouteurs. La moindre dérive dans les propriétés du gaz modifiait la capacité du circuit et changeait la hauteur de la note sifflée. Lev a de nouveau remarqué que les mouvements de sa main près du circuit étaient interprétés comme des fluctuations de la densité, cette fois-ci enregistrées comme des changements de hauteur. Plus sa main se rapprochait du condensateur, plus la note sifflée devenait aiguë, en retirant la main, la note diminuait. En secouant la main d'un léger mouvement tremblant, on obtient un vibrato subtil. Le violoncelliste endormi était réveillé⁷².

Nous soulignons deux points importants sur la base de cet extrait. Premièrement, la découverte du thérémine est pratiquement accidentelle. Secondement, le principe de fonctionnement du premier thérémine est analogue à celui du *radio watchman* inventé précédemment. Dans le cas du thérémine, le changement de la valeur de capacité induit par le corps humain n'est pas utilisé pour fermer un *switch* (qui enclenche l'alarme), mais pour faire varier de manière continue la fréquence d'un circuit oscillant. Afin d'élargir la tessiture de son instrument et d'offrir plus de sensibilité dans son jeu, Léon Thérémine employa le principe des oscillateurs hétérodynes⁷³ dont le fonctionnement est décrit dans la section 2.4.2. La première version du

⁷¹Précisons que le premier modèle du thérémine est nommé «étherophone».

⁷²GLINSKY Albert, *Theremin. Ether Music and Espionage*, op. cit., p. 23-24. Traduction de l'anglais avec l'aide du site Deepl.com. Cet extrait, bien qu'intéressant d'un point de vue historique, n'est pas rigoureusement scientifique. Le terme «densité» (angl. *density*) ne semble pas approprié pour expliquer exactement le principe de fonctionnement de l'instrument. Plus de détails sont fournis dans la section 2.4.3.

⁷³Le principe des oscillateurs hétérodynes fut développé par Reginald Fessenden en 1901. Voir FORREST D. Pass, «Fessenden, Reginald Aubrey», dans *Dictionnaire biographique du Canada* (en ligne), vol. 16, Université Laval/University of Toronto, 2003, http://www.biographi.ca/fr/bio/fessenden_reginald_aubrey_16F.html (page consultée le 11 juillet 2022).

thérémine n'offre pas la possibilité de contrôler le volume du son. Pour remédier à cela, Léon Thérémine intègre dans un premier temps une pédale permettant au musicien de contrôler le volume. Par la suite, il conçoit un instrument qui ne requiert pas d'intervention physique en incorporant une seconde antenne qui lui permet de contrôler le volume en fonction de la position de l'autre main. La première version du thérémine fut brevetée en Russie en 1922⁷⁴. Une illustration du thérémine est fournie sur la figure 2.14.



Figure 2.14: Illustration de Clara Rockmore jouant du thérémine. Clara Rockmore était une musicienne lituanienne virtuose du violon. Elle doit abandonner tôt la pratique de cet instrument pour des raisons de santé et se tourne alors vers la pratique du thérémine. L'antenne devant la main droite contrôle la hauteur du son tandis que la main gauche contrôle le volume⁷⁵.

La première démonstration publique de l'instrument a lieu le 5 août 1920⁷⁶. Les représentations qui suivent entre 1920 et 1921 rencontrent un tel succès que Léon Thérémine reçoit un appel du chef de gouvernement de l'Union soviétique Vladimir Lénine pour réaliser une présentation de l'instrument au Kremlin. Ce dernier voit dans le thérémine une possibilité d'exhiber les capacités technologiques de la Russie sur la scène internationale⁷⁷. Dès 1922, l'inventeur part en une tournée en Russie et en Europe avec son instrument pour le promouvoir. Les concerts en Europe reçoivent un excellent accueil de la part du public⁷⁸. En décembre 1927, Léon Thérémine quitte la Russie et s'installe à New York. L'instrument fait ses débuts américains

⁷⁴DONHAUSER Peter, *Elektrische Klangmaschinen. Die Pionierzeit in Deutschland und Österreich*, op. cit., p. 25.

⁷⁵Cette photographie a été prise en 1934 par le photographe Renato Toppo et a été utilisée comme prospectus pour un concert au *Town Hall* de New York. Ce concert a eu lieu le 30 octobre 1934. Voir GLINSKY Albert, *Theremin. Ether Music and Espionage*, op. cit., p. 202-203.

⁷⁶MONTAGUE Stephen, «Termen, Lev Sergeyevich», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000045834> (page consultée le 5 juillet 2022).

⁷⁷*Musician Biographies*, «Leon Theremin Biography», <https://musicianguide.com/biographies/1608000933/Leon-Theremin.html> (page consultée le 9 juillet 2022).

⁷⁸MONTAGUE Stephen, «Termen, Lev Sergeyevich», op. cit.

au *Metropolitan Opera House* de New York le 31 janvier 1928⁷⁹. L'inventeur a l'opportunité de le présenter dans de nombreuses salles prestigieuses aux États-Unis, dont le *Lincoln Center* et le *Carnegie Hall* devant un public ébahi. Durant ses années à New York, Léon Theremin se lie d'amitié avec Clara Rockmore, une violoniste lituanienne qui vit aux États-Unis. Grâce à leur collaboration, Clara Rockmore devient la virtuose la plus célèbre du thérémine. En février 1928, il fait breveter son instrument aux États-Unis et un demi-millier d'exemplaires est produit par la *Radio Corporation of America* (RCA)⁸⁰. L'instrument était onéreux, le système du thérémine complet avec haut-parleurs coûtait 230 dollars, soit environ 4000 dollars aujourd'hui⁸¹. Thérémine disparaît mystérieusement un jour de 1938. On apprend plus tard qu'il a été kidnappé par des agents du *Komitet Gosudarstvennoy Bezopasnosti* (KGB) et renvoyé en Union soviétique. En raison de la répression totalitaire des années 1930, de nombreux intellectuels russes ayant des contacts en Occident ont été emprisonnés dans des goulags sibériens.

En mars 1939, il est condamné à huit ans de prison et est envoyé au camp de Magadan, un des nombreux camps de travail du système des goulags de Staline. En 1940, il est contraint de travailler dans un laboratoire de recherche scientifique secret non loin de Moscou. Dans cette unité privilégiée du système pénitentiaire, il développe des projets militaires jusqu'en 1947⁸². L'un des projets sur lesquels il travaille en prison est le *Great Seal bug*, un dispositif d'espionnage placé dans une réplique en bois du Grand Sceau des États-Unis. Cette réplique est offerte à l'ambassadeur des États-Unis en 1945, mais la supercherie ne sera découverte qu'en 1952⁸³. Léon Thérémine reçoit le prix Staline en 1947 pour ses travaux sur les dispositifs d'écoute. Après sa libération, il continue de travailler sur divers projets spéciaux pour le KGB jusqu'en 1966⁸⁴. Il rejoint ensuite le conservatoire de Moscou où il travaille sur des instruments de musique électroniques⁸⁵. En 1967, un journaliste le retrouve en Russie et rédige un article sur lui dans le *New York Times*⁸⁶. Cependant, la musique moderne est considérée comme pernicieuse par l'idéologie soviétique d'après-guerre⁸⁷ et l'inventeur perd son emploi peu de temps après la publication de l'article. À la suite de cet épisode, il travaille comme technicien et assistant de laboratoire au département de physique de l'université d'État de Moscou jusqu'à sa mort en 1993⁸⁸.

⁷⁹Ibid.

⁸⁰Voir NIKITIN Pavel, «Leon Theremin (Lev Termen)», op. cit., p. 253.

⁸¹Cette conversion a été effectuée avec le site *CPI Inflation Calculator*, voir <https://www.officialdata.org/us/inflation/1906?amount=200000>.

⁸²NIKITIN Pavel, «Leon Theremin (Lev Termen)», op. cit.

⁸³Ibid. p. 255.

⁸⁴GALEYEV Bulat M., «Light and Shadows of a Great Life: In Commemoration of the One-Hundredth Anniversary of the Birth of Leon Theremin, Pioneer of Electronic Art», dans *Leonardo Music Journal*, vol. 6 (1996), p. 47.

⁸⁵GLINSKY Albert, *Theremin. Ether Music and Espionage*, op. cit., p. 341.

⁸⁶SCHONBERG Harold C., «Music: Leon Theremin; Inventor of Instrument Bearing His Name Is Interviewed in the Soviet Union», dans *The New York Times*, New York, 26 avril 1967, p. 40.

⁸⁷*120 Years of Electronic Music*, «The 'Theremin' or 'Thereminvox'. Leon (or Lev) Sergeivitch Termen, Russia. 1922», <https://120years.net/wordpress/the-thereminleon-termensoviet-union1922/> (page consultée le 6 juillet 2022).

⁸⁸Ibid.

2.4.2 Notions théoriques

Fonctionnement de l'audion (triode)

L'audion, inventé en 1906 par l'ingénieur Lee de Forest, est le premier dispositif électronique amplificateur. Il s'agit de la première triode, c'est-à-dire un tube à vide contenant trois électrodes : une cathode, une anode et une grille. Une représentation schématique du modèle de triode utilisé par Léon Thérémine est présentée sur la figure 2.15.

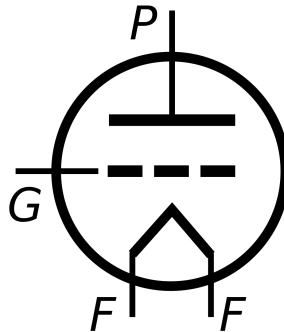


Figure 2.15: Représentation schématique d'une triode telle qu'utilisée par Léon Thérémine. Nous retrouvons un filament chauffé F faisant office de cathode, la grille G et l'anode P (angl. *Plate*) en haut.

La cathode émet des électrons par effet thermoionique (émission d'électrons par un conducteur électrique chauffé). Ces électrons sont attirés par l'anode si la différence de potentiel entre l'anode et la cathode est positive. Dans ce cas, ils circulent dans les espaces entre les fils de la grille. Les électrons ne circulent cependant pas si la différence de potentiel entre l'anode et la cathode est négative.

Il est possible de moduler le passage des électrons en modifiant le potentiel de la grille (relativement à la cathode). Lorsque ce potentiel est négatif, les électrons sont repoussés et le courant anodique est réduit. Si ce potentiel est positif, le courant anodique augmente. Par conséquent, un petit signal alternatif à la grille peut entraîner une variation périodique du courant anodique. Quand une triode fonctionne dans sa région linéaire, la variation de la tension de grille entraîne une variation pratiquement proportionnelle du courant anodique. Le ratio entre courant anodique et tension de grille est connu sous le nom de transconductance. Un gain de tension peut être obtenu en insérant une résistance de charge à l'anode. Lorsque le courant anodique varie, il provoque une variation de tension beaucoup plus importante à travers la résistance de charge que les variations de tension d'entrée à la grille.

Les triodes sont les précurseurs d'autres tubes à vide plus complexes, tels que la tétrode et la pentode. Ces dernières ont été utilisées dans les appareils électroniques grand public (radios, téléviseurs, etc.) jusqu'à dans les années 1970 où elles sont remplacées par les transistors.

Oscillateurs hétérodynes

La production du son du thérémine repose sur un oscillateur hétérodyne, à savoir un oscillateur qui tire parti du phénomène de battement résiduel observé lorsque deux signaux de fréquences presque identiques sont additionnés.

Plus formellement, quand un signal sinusoïdal de fréquence f_1 est additionné à un signal de fréquence $f_2 = f_1 + \Delta f$, un battement résiduel de fréquence $f_{bat} = \Delta f$ est observé⁸⁹. La fréquence porteuse du battement est donnée par $f_{por} = \frac{f_1 + f_2}{2}$. Une illustration du phénomène de battement est présentée sur la figure 2.16.

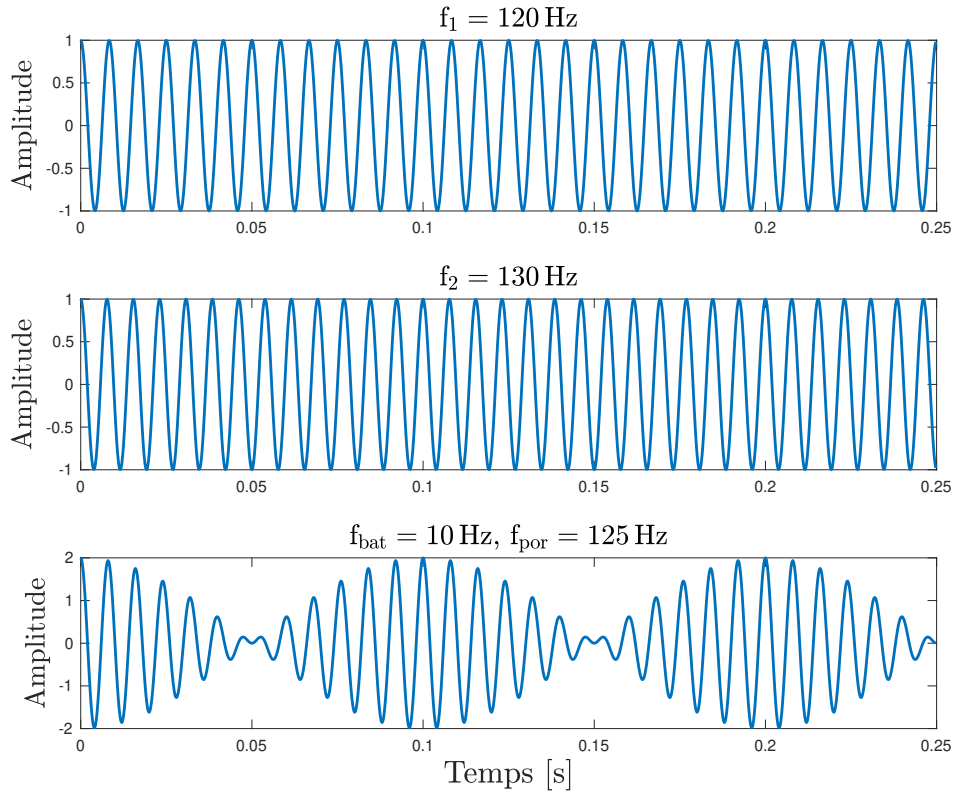


Figure 2.16: Illustration du phénomène de battement. Les signaux à 120 Hz et 130 Hz sont additionnés pour former un battement de 10 Hz. La fréquence porteuse du battement correspond à la moyenne entre les deux fréquences précédentes, c'est-à-dire 125 Hz.

Dans le cas du thérémine l'écart entre les fréquences f_1 et f_2 qui provoque le battement est induit par le mouvement de la main droite du musicien. La section 2.4.3 de ce chapitre fournit plus de détails à ce sujet.

⁸⁹Voir DUBOIS Marc, *Contrôle des ondes de flexion dans les plaques*, Paris, Université Paris-Diderot, 2014, p. 132.

2.4.3 Principe de fonctionnement

Le circuit d'un thérémine peut être conçu de différentes façons. Dans un souci de cohérence avec le contexte historique développé dans la section 2.4.1, le modèle étudié est celui du brevet américain déposé en 1928⁹⁰. Nous avons aussi choisi d'analyser ce brevet, car il fournit suffisamment de détails sur le fonctionnement des différents sous-circuits de cet instrument. Comme le thérémine ne possède pas de mécanismes mobiles, nous pouvons mettre son principe de fonctionnement en évidence via un logiciel de simulation de circuits. Cependant, simuler chaque sous-circuit du thérémine n'est pas dans l'intérêt de ce travail. Il est préférable de concentrer notre attention sur l'oscillateur hétérodyne qui est au cœur de la production du son. À cette fin, la sous-section A décrit dans un premier temps le fonctionnement de cet oscillateur de façon quantitative. La description proposée s'appuie notamment sur les concepts théoriques développés précédemment. Ces concepts seront approfondis en filigrane de la description du circuit. Dans un second temps, la sous-section B décrit l'architecture globale du circuit du thérémine de façon plus qualitative. Cette section permet de mieux comprendre les possibilités techniques qu'offre la triode et de développer des analyses congruentes dans la section 2.4.4.

A. Topologie de l'oscillateur hétérodyne

L'oscillateur hétérodyne conçu par Léon Thérémine en 1928 est illustré sur la figure 2.17.

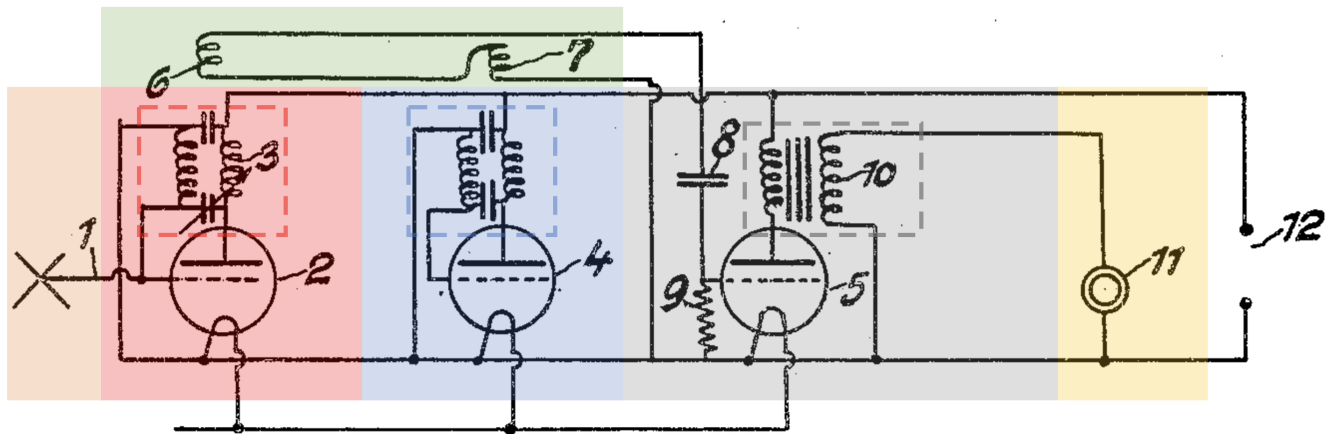


Figure 2.17: Illustration de l'oscillateur hétérodyne proposé par Léon Thérémine dans son brevet américain de 1928. Ce circuit est composé de deux oscillateurs, l'un fixe (en bleu) et l'autre variable (en rouge). La fréquence de l'oscillateur variable change en fonction de la valeur de la capacité au nœud orange. Cette valeur de capacité varie en fonction du mouvement de la main droite de l'interprète. Le courant induit dans la bobine 6 (par couplage magnétique avec le circuit LC de l'oscillateur variable) s'additionne avec le courant induit dans la bobine 7 (par couplage magnétique avec le circuit LC de l'oscillateur fixe). Cette addition donne lieu au battement. Le signal résultant est amplifié (en gris) puis transmis dans un haut-parleur (en jaune) via un transformateur (encadré gris).

⁹⁰Voir THEREMIN Leon S., *Method of and Apparatus for the Generation of Sounds*, U.S. Patent Application Ser. No. 1,661,058A, 1928, <https://patentimages.storage.googleapis.com/06/b7/87/90f175e638a846/US1661058.pdf> (page consultée le 8 juillet 2022).

Un oscillateur hétérodyne est composé de deux oscillateurs à haute fréquence (HF). Ces deux oscillateurs HF possèdent des fréquences de résonance⁹¹ proches l’une de l’autre, mais pas identiques. En additionnant les deux signaux, un phénomène de battement est observé conformément aux notions théoriques développées dans la section 2.4.2. Les deux oscillateurs sont représentés en rouge et en bleu sur la figure 2.17. Ils sont chacun constitués de deux sous-circuits : un circuit oscillant de type LC (encadrés pointillés rouges et bleus) et une triode faisant office de boucle de rétroaction positive. Un circuit LC est composé de condensateurs et d’inductances. Soit un condensateur de valeur C (exprimée en farad) et une inductance de valeur L (exprimée en henry), la fréquence de résonance d’un circuit LC est donnée par la relation :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}] . \quad (2.5)$$

Les boucles de rétroaction positive maintiennent les oscillateurs HF à leur fréquence de résonance en accord avec le critère de Barkhausen⁹². Les valeurs de capacité et d’inductance sont les mêmes pour les deux circuits oscillants. Il en résulte deux fréquences de résonance identiques en théorie. Cependant, l’oscillateur HF rouge possède un nœud de son circuit connecté à l’antenne du thérémine (en orange) qui contrôle la hauteur du son. Un condensateur est alors formé entre cette antenne et la main droite de l’interprète, car le joueur est virtuellement relié à la terre. Lorsque le musicien approche ou éloigne sa main de l’antenne, il modifie la quantité de charges que ce condensateur peut stocker, ce qui fait varier la fréquence du courant alternatif produit par l’oscillateur HF variable. En effet, selon l’équation 2.5, si la valeur de capacité varie, cela signifie que la fréquence de résonance varie également.

La section du circuit colorée en vert additionne les deux courants électriques alternatifs provenant des oscillateurs HF. Une inductance du circuit LC en rouge est couplée à l’inductance 6 et une inductance du circuit LC en bleu est couplée à l’inductance 7. Par induction électromagnétique, le courant de l’oscillateur variable est induit dans la bobine 6 et le courant de l’oscillateur fixe est induit dans la bobine 7. Comme ces deux courants circulent dans un même fil conducteur, ils s’additionnent. Cette addition provoque un battement, car l’oscillateur HF variable a une fréquence de résonance altérée par les mouvements du musicien.

La partie illustrée en gris représente un montage amplificateur. Le signal provenant des bobines couplées passe par cet étage d’amplification avant d’être transmis au haut-parleur (en jaune) via un transformateur représenté par le symbole 11 (voir aussi encadré gris). Sur cette figure, le symbole 12 représente la tension d’alimentation.

⁹¹La fréquence de résonance en électronique est atteinte lorsqu’un circuit présente une réponse oscillatoire maximale à une fréquence spécifique. Ceci est observé pour un circuit composé d’une inductance et d’une capacité. Voir *Cadence, PCB Design & Analysis*, «What is Resonant Frequency?», <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2021-what-is-resonant-frequency> (page consultée le 7 juillet 2022).

⁹²En électronique, le critère de stabilité de Barkhausen détermine quand les circuits électroniques linéaires oscillent. Cette théorie a été proposée en 1921 par le physicien allemand Heinrich Georg Barkhausen (1881-1956). Voir WARDKIEN Paramote et KITTIPUTE Kunanon, «Discussion on The Physic of The Barkhausen Criteria Based on The Second Order Differential Equation», dans *7th International Electrical Engineering Congress*, 2019, p. 1-4, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8938934> (page consultée le 7 juillet 2022).

Plus la main du musicien se rapproche, plus la capacité au nœud orange s'accroît. Cela a pour conséquence d'éloigner la fréquence de l'oscillateur HF variable de la fréquence de l'oscillateur fixe. De ce fait, la fréquence du battement augmente et le son produit est plus aigu.

Une version simplifiée du circuit de la figure 2.17, sans l'étage d'amplification, est illustrée sur la figure 2.18. Ce schématique du circuit a été simulé avec logiciel LTspice.

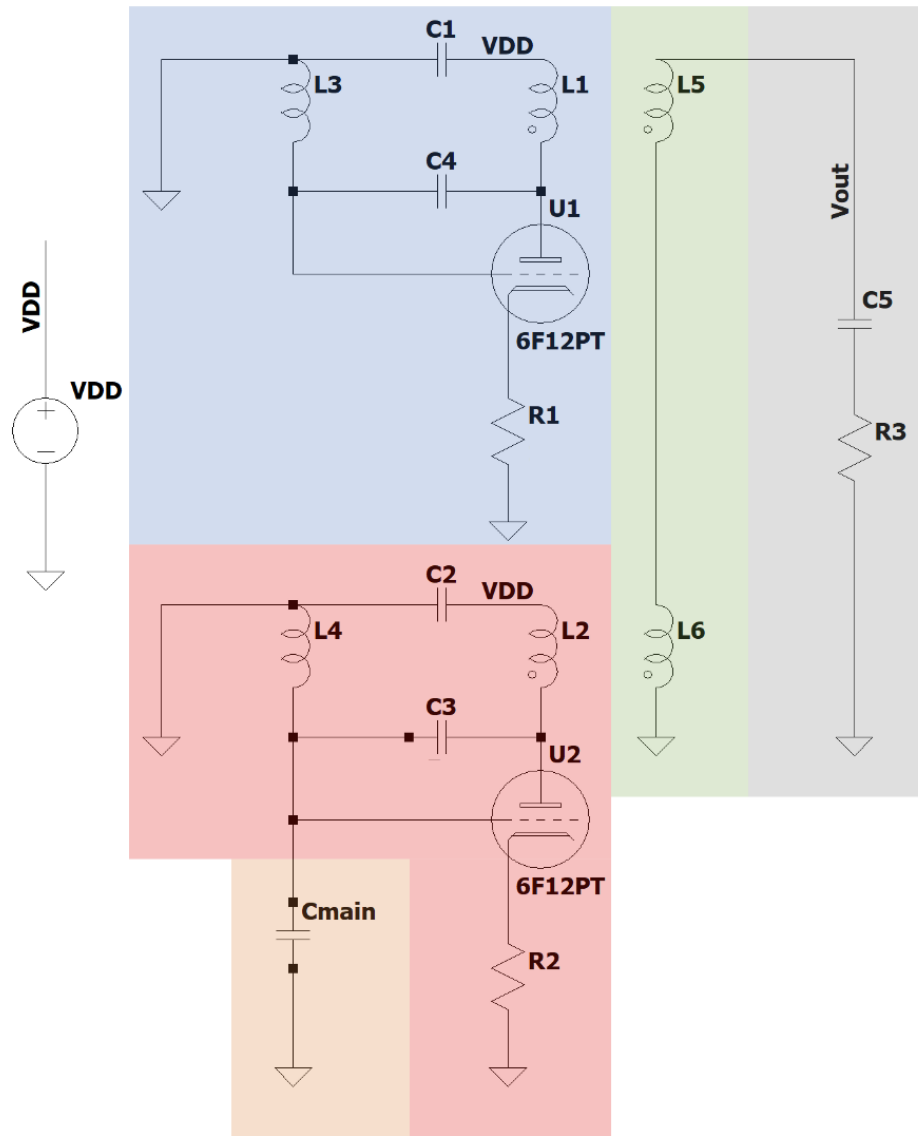


Figure 2.18: Schématique du circuit présenté sur la figure 2.17.
L'étage d'amplification n'est pas repris sur ce schématique.

Sur la figure 2.18, nous reconnaissons les différents sous-circuits de l'oscillateur hétérodyne présenté sur la figure 2.17. Dans un souci de cohérence, le code couleur est identique entre ces deux figures.

Le dimensionnement des composants des circuits LC est réalisé pour obtenir une fréquence de résonance proche de 500 kHz⁹³. Comme la variation de capacité induite par les mouvements de la main du musicien est de l'ordre de $C_{main} \approx 10^{-2} pF$ ⁹⁴, les capacités des circuits LC doivent être choisies pour qu'une telle variation produise des battements de fréquences audibles. Ces critères sont satisfaits pour $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 20 mH$ et $C_3 = C_4 = 5 pF$. Pour ces valeurs, $f_{res} = 503292 Hz \approx 500 kHz$.

Nous constatons que C_1 et C_2 n'ont aucun impact sur la fréquence de résonance. Ces capacités peuvent même être retirées du circuit sans altérer son fonctionnement. Cela fait sens quand nous observons que C_1 et C_2 sont chacune connectées entre VDD et la masse. La tension à leur borne est donc constante. Cela signifie qu'elles agissent comme une impédance infinie, donc un circuit ouvert. Les valeurs des inductances L_5 et L_6 sont choisies suffisamment faibles en comparaison des inductances des circuits LC⁹⁵.

Comme Léon Thérémine ne renseigne pas le modèle de triode utilisé, nous avons arbitrairement choisi le modèle *6F12PT*. Celui-ci émule le comportement d'une triode au moyen d'équations symboliques. Ce modèle tient compte des capacités parasites entre les différents nœuds de la triode⁹⁶. Dans cette triode, la cathode et le filament sont séparés. Pour rappel, sur la figure 2.15, le filament fait office de cathode. De plus, le filament n'est pas représenté sur U_1 et U_2 , c'est pourquoi elles ne comportent que trois connexions. Précisons que R_1 (resp. R_2) détermine le gain de U_1 (resp. U_2).

VDD représente la tension d'alimentation. La valeur de cette source de tension n'est pas renseignée dans le brevet américain de Léon Thérémine. Une valeur typique pour VDD est 110 V, comme indiqué dans le brevet russe du thérémine⁹⁷.

La figure 2.19 illustre la tension de sortie V_{out} pour deux valeurs de C_{main} . Pour rappel, plus la main du musicien se rapproche de l'antenne qui contrôle la hauteur du son, plus la valeur de la capacité C_{main} augmente, plus la fréquence des battements est élevée. Ce phénomène est bien vérifié sur la figure 2.19.

⁹³Dans son brevet, Léon Thérémine précise que les oscillateurs HF étaient accordés pour ne pas interférer avec les ondes radio.

⁹⁴THEREMIN Leon S., *Method of and apparatus for the generation of sounds*, op. cit., p. 3.

⁹⁵Les simulations montrent que des valeurs trop élevées pour L_5 et L_6 induisent un déphasage constant entre l'oscillateur fixe et l'oscillateur variable, ce qui annule le principe de battement.

⁹⁶Ces capacités parasites sont de l'ordre du pF, c'est-à-dire non négligeables en comparaison de C_3 et C_4 . Pour considérer ces capacités négligeables, il faudrait choisir une valeur de capacité plus élevée pour C_3 et C_4 , par exemple 100 pF. Toutefois, cela a pour conséquence de diminuer la sensibilité de la fréquence du thérémine au mouvement de la main de l'interprète, car la variation de la capacité C_{main} devient de plus en plus négligeable par rapport à la valeur de C_3 . Bien que ce compromis ne soit pas discuté dans le brevet de Léon Thérémine, ce dernier a certainement dû en tenir compte à un moment ou un autre dans la conception de son instrument.

⁹⁷DONHAUSER Peter, *Elektrische Klangmaschinen. Die Pionierzeit in Deutschland und Österreich*, op. cit.

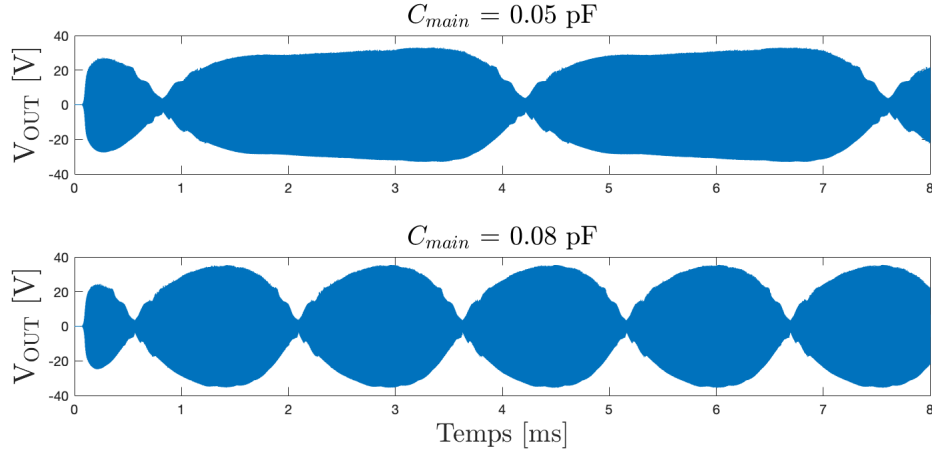


Figure 2.19: Simulation transitoire du circuit illustré sur la figure 2.18 pour différentes valeurs de C_{main} . Plus cette capacité est élevée, plus la fréquence des battement augmente. Dans le cas $C_{main} = 0,05 \text{ pF}$, $f_{bat} = 295 \text{ Hz}$. Quand $C_{main} = 0,07 \text{ pF}$, $f_{bat} = 660 \text{ Hz}$.

B. Architecture du circuit global du thérémine - 1928

Cette section propose une description qualitative de la topologie complète du thérémine présentée dans le brevet américain de 1928. Une illustration de la topologie complète du thérémine est proposée sur la figure 2.20.

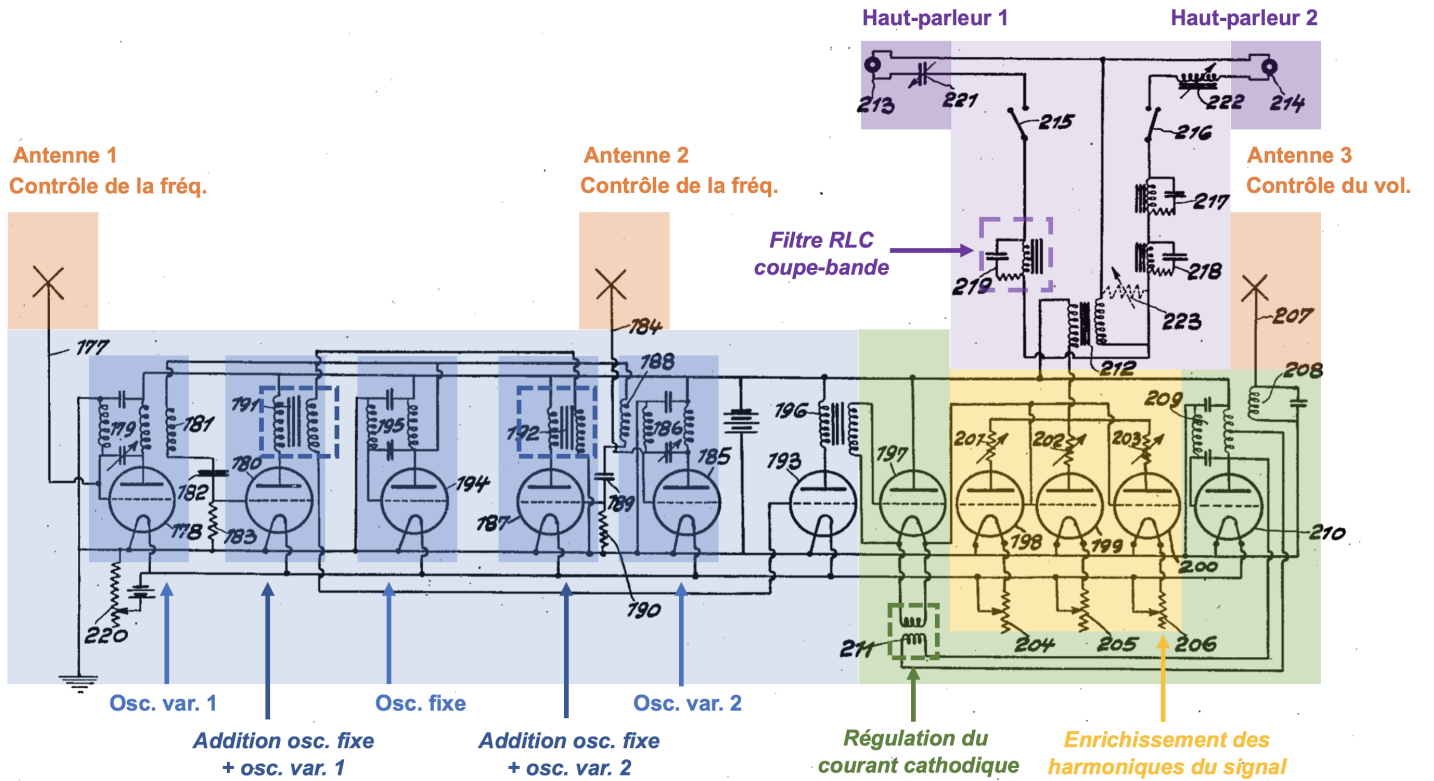


Figure 2.20: Architecture du circuit du thérémine dans le brevet américain de 1928.

Nous identifions trois antennes (en orange). Les deux qui se trouvent sur la gauche contrôlent la fréquence et celle qui se trouve sur la droite contrôle le volume. Il n'est pas habituel de trouver trois antennes. En effet, le thérémine comprend conventionnellement une seule antenne pour contrôler la fréquence du son. Nous faisons l'hypothèse que l'ajout d'une antenne permet d'obtenir un brevet plus complet et ainsi de se prémunir contre les inventeurs peu scrupuleux qui déposeraient un nouveau brevet en ajoutant simplement une antenne à la topologie classique du thérémine. Ce modèle de thérémine est donc capable de produire simultanément deux tons de fréquences distinctes.

Les deux antennes situées à gauche sont reliées à la section (en bleu) responsable de produire les deux fréquences de battements. Cette section est composée d'un oscillateur HF fixe (noté *osc. fixe*) et de deux oscillateurs HF variables (notés *osc. var.*). Cette configuration est analogue au circuit présenté sur la figure 2.18 à deux exceptions près. Premièrement, comparé à la figure 2.18, le circuit est dédoublé. Il y a deux oscillateurs variables pour produire deux battements de fréquences distinctes. Deuxièmement, le signal électrique qui provient de l'oscillateur fixe n'est pas induit dans une inductance. Le nœud de ce signal est directement connecté aux inductances (181 et 188 sur la figure 2.20) qui sont couplées aux circuits LC des oscillateurs variables. D'une part, le signal de l'oscillateur HF fixe est additionné au signal du premier oscillateur HF variable (voir *addition osc. fixe + osc. var 1*), ce qui résulte en un premier battement de fréquence $f_{bat,1} = f_{osc.var,1} - f_{osc.fixe}$. D'autre part, le signal de l'oscillateur HF fixe est additionné au signal du second oscillateur HF variable (voir *addition osc. fixe + osc. var 2*), ce qui résulte en un second battement de fréquence $f_{bat,2} = f_{osc.var,2} - f_{osc.fixe}$. Le premier et le second battement sont additionnés inductivement par les transformateurs encadrés en pointillés bleus et puis transmis vers le sous-circuit contrôlant le volume (en vert), par le biais de la triode 193.

Le signal électrique composé de l'addition des deux battements arrive à la grille de la triode 197. Le courant cathodique dans la triode 197, qui détermine la quantité de courant transmise à la section suivante du circuit (en jaune), et donc l'intensité du courant qui traverse les haut-parleurs, est régulé par induction (voir encadré vert). Cette régulation du courant cathodique est réalisée à partir du circuit HF formé par la triode 210 et le circuit LC 208. Les mouvements de la main gauche de l'interprète éloignent ou rapprochent la fréquence de résonance du circuit LC 208 de celle du circuit LC 209. Plus l'interprète éloigne sa main de l'antenne qui contrôle le volume, plus les deux fréquences de résonance sont proches, plus le courant cathodique dans la triode 197 est élevé. Cela signifie qu'une plus grande quantité de courant est transmise dans la suite du circuit.

La partie jaune du circuit est une mise en parallèle de trois amplificateurs. Ces amplificateurs ont pour fonction d'enrichir le timbre du son et le rendre plus chaleureux par l'ajout d'harmoniques. La partie du circuit colorée en mauve est constituée des haut-parleurs et de filtres RLC. Les haut-parleurs convertissent le signal électrique alternatif qu'ils reçoivent en ondes acoustiques. Les filtres RLC sont coupe-bande et permettent d'éliminer les fréquences propres (parasites) des haut-parleurs.

2.4.4 Analyses complémentaires

De nombreux moteurs de recherche renseignent le thérémine comme le premier instrument de musique électronique. Cette affirmation n'est pas tout à fait correcte étant donné que Lee De Forest (voir section 2.4.2) inventa lui aussi un instrument de musique électronique reposant sur le principe de l'hétérodynage en employant des audions⁹⁸. Sur le plan technique, cet instrument parfois appelé *The Audion Piano* peut être considéré comme le précurseur du thérémine. Bien qu'il ne soit pas le premier instrument électronique, le thérémine est le premier à rencontrer un véritable succès.

La section 2.4.3 montre que l'invention de l'audion (première triode) amorce un basculement technologique à partir des années 1910. En effet, pour une même fonctionnalité, la triode permet une conception plus directe et plus rapide. Cette affirmation se vérifie aisément si nous comparons les méthodes de génération de signaux alternatifs dans le telharmonium et dans le thérémine. Le premier utilise de lourdes roues phoniques mécaniques mises en marche par un moteur énergivore tandis que le second repose sur trois triodes et quelques composants de circuit passifs⁹⁹. Cette remarque s'applique aussi à la conception des filtres fréquentiels. Nous constatons que la triode donne la possibilité aux inventeurs de se passer de parties mécaniques pour la conception de leurs instruments. Cette possibilité présente un double bénéfice. Cela permet premièrement de concevoir des architectures de circuits plus compactes et donc plus facilement transportables. Secondement, les instruments sont moins soumis aux contraintes (angl. *stress*) qu'impliquent ces parties mécaniques.

L'émergence de la triode marque le début d'une approche plus systématique de la conception de circuits électroniques. Autrement dit, les différentes parties d'un circuit s'organisent autour d'éléments actifs centraux (les triodes) pour réaliser diverses fonctionnalités. Ces fonctionnalités concernent par exemple la génération de signaux, le traitement de ces mêmes signaux ou leur amplification. Cette approche est un premier pas vers les principes de modularité et de régularité qui sont au cœur de la conception de circuits digitaux¹⁰⁰.

Nous soulignons également que le thérémine a eu une grande influence sur l'ingénieur Robert Moog dans la conception du synthétiseur qui portera son nom. Ce dernier mentionne l'impact considérable de Léon Theremin sur sa propre carrière et affirme être devenu un créateur d'instruments de musique électroniques en raison de sa fascination pour le thérémine¹⁰¹. Robert Moog découvre et monte son propre thérémine en 1949 à partir d'un kit de hobby.

⁹⁸DE FOREST Lee, *Father of Radio*, Chicago, Wilcox & Follett Co., 1950, p. 331-332.

⁹⁹Un composant qui augmente la puissance d'un signal est appelé composant actif. Lorsqu'un composant ne permet pas l'amplification d'un signal, il est considéré comme passif (p. ex. résistance, inductance, capacité).

¹⁰⁰La modularité signifie que les différents modules du circuit ont des fonctions et des interfaces bien définies, de sorte qu'ils se connectent facilement entre eux sans effets secondaires imprévus. La régularité vise à uniformiser le plus possible les différents modules. Les modules sont réutilisés de nombreuses fois, ce qui réduit le nombre de modules distincts à concevoir. Voir HARRIS Sarah L. et HARRIS David Money, *Digital Design and Computer Architecture. ARM Edition*, s.l., Morgan Kaufmann Publishers, 2015, p. 6.

¹⁰¹GLINSKY Albert, *Theremin. Ether Music and Espionage*, op. cit., p. X-XII.

2.5 Pistes de réponses à la question de recherche

Cette section rassemble les différents points d’analyse et commentaires énoncés en filigrane du chapitre 2 qui répondent à la question de recherche suivante : comment expliquer l’intervalle de temps entre l’émergence des premiers électrophones et l’utilisation d’électrophones comme outils de création musicale durant la seconde moitié du XXe siècle?

Sur la base des sections 2.1.3, 2.2.3, 2.3.3 et 2.4.3 de ce chapitre (études techniques), nous observons que les premiers électrophones se développent parallèlement aux progrès technologiques qui leur sont contemporains. Deux avancées techniques ont un impact considérable sur l’évolution de ces électrophones. La première est l’émergence de la téléphonie vers la fin du XIXe siècle¹⁰² et la seconde est l’invention de l’audion (ancêtre du tube à vide) par Lee De Forest au début du XXe siècle.

Lorsque nous examinons le principe de fonctionnement du thérémine, nous comprenons pourquoi l’utilisation d’électrophones comme outils de création musicale est difficilement concevable sur le plan technique avant l’invention de l’audion. Avant l’apparition de ce dispositif amplificateur, les inventeurs s’appuient sur l’interruption d’un courant continu à l’aide de pièces mécaniques mobiles pour générer un signal électrique alternatif. Le volume des électrophones est par conséquent limité intrinsèquement par la quantité de courant obtenue lors de la production de ce signal. Pour cette raison, les sons produits ont la plupart du temps un faible volume. Cela se vérifie dans cet extrait du *New York Times* (juillet 1874) au sujet du télégraphe musical :

Nous pouvons décrire la musique du téléphone¹⁰³, comme celle que nous avons entendue hier soir, en la comparant au son que l’on produirait sur un orgue lentement et avec un seul doigt. Les notes les plus aiguës étaient plutôt faibles. Le silence le plus total a prévalu et, à la fin, les applaudissements ont été longs et enthousiastes¹⁰⁴.

Pour produire des signaux d’une amplitude suffisante, cette technique d’interruption du signal requiert des courants continus de haute amplitude et des parties mécaniques mobiles imposantes, ce qui est énergivore. C’est le cas du telharmonium qui fonctionne au moyen de larges roues phoniques. De plus, l’interruption de courants continus donne inévitablement lieu à des signaux alternatifs carrés dont la sonorité est plutôt dure et perçante. Pour les adoucir, les inventeurs sont contraints de recourir à du filtrage fréquentiel.

¹⁰²L’émergence des téléphonies et les brevets qui y sont associés influencent les topologies des premiers électrophones, car les inventeurs ne doivent apporter que peu de modifications à leur brevet pour adapter une technologie téléphonique en électrophone. Cette observation ne contribue pas réellement à répondre à la question de recherche.

¹⁰³La «musique du téléphone» comme l’appelle le journaliste désigne la musique jouée par le télégraphe musical et écoutée au moyen d’un système téléphonique.

¹⁰⁴*The New York Times Archives*, «Music by Telegraph», dans *The New York Times* (en ligne), New York, 10 juillet 1874. <https://www.nytimes.com/1874/07/10/archives/telegraphy-new-inventions-in-the-science-of-electrical-transmission.html> (page consultée le 4 août 2022).

Avant l'apparition du tube à vide, les inventeurs ne bénéficient pas de moyens techniques suffisants pour parvenir à un équilibre satisfaisant entre la production harmonieuse de sons et les contraintes techniques associées au manque d'amplification électrique¹⁰⁵. Le tube à vide permet un meilleur contrôle du son en réalisant diverses fonctions au sein d'un électrophone (génération de signaux électriques, traitement du signal, modulation, etc.). L'invention de l'audion permet aussi la conception d'électrophones plus compacts (donc plus facilement transportables) et consommant moins d'énergie électrique.

Au regard des sections 2.1.1, 2.2.1, 2.3.1 et 2.4.1 de ce chapitre (contextes historiques), nous constatons que les premiers électrophones ne passent pas inaperçus lors de leur création. Ils suscitent de l'intérêt lorsqu'ils sont exposés pour la première fois lors de démonstrations publiques. Les électrophones, en particulier ceux qui précèdent le thérémine, sont avant tout appréciés pour leur technicité. Ils sont considérés comme des curiosités intellectuelles plutôt que des instruments de musique. Nous émettons l'hypothèse que cela est lié notamment à leur timbre. En effet, des sources dans ce chapitre montrent que la presse et les inventeurs eux-mêmes comparent fréquemment le timbre d'électrophones aux timbres d'instruments acoustiques. Cette comparaison n'est pas fortuite, car certains inventeurs ont parfois pour objectif initial de reproduire les timbres d'instruments acoustiques voire les supplanter¹⁰⁶. Ce statut d'instrument essayant de «reproduire les sonorités des instruments acoustiques» n'a pas aidé les premiers électrophones à s'imposer comme des outils de création musicale à part entière.

A titre d'exemple, Edgard Varèse découvre le telharmonium en 1915 lors d'un voyage à New York et explique avoir été déçu par l'instrument. Cette citation appuie l'hypothèse développée ci-avant.

Busoni¹⁰⁷ était très intéressé par les instruments électriques dont nous commençons à entendre parler et je me souviens en particulier d'un instrument dont il avait entendu parler dans un magazine américain, le dynamophone, inventé par le Dr Thaddeus Cahill, dont j'ai vu plus tard la démonstration à New York et qui m'a déçu¹⁰⁸.

¹⁰⁵Ces contraintes ne se traduisaient pas systématiquement par la génération de signaux trop faibles. Rappelons que le telharmonium a généré des signaux de trop forte intensité qui ont interféré avec le réseau téléphonique de la ville de New York.

¹⁰⁶L'exemple le plus parlant est le telharmonium et son inventeur Thaddeus Cahill qui, inspiré par les théories de Hermann von Helmholtz, souhaite créer un instrument parfait à même de produire n'importe quel timbre d'instruments acoustiques.

¹⁰⁷Le manifeste rédigé par Ferruccio Busoni en 1907 intitulé *Esquisse d'une nouvelle esthétique de la musique* a inspiré ses élèves, dont le compositeur Edgard Varèse et toute une nouvelle génération de concepteurs d'instruments et de musiciens microtonaux. Voir BEAUMONT Antony, «Busoni, Ferruccio (Dante Michelangelo Benvenuto)» dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000004438> (page consultée le 18 juin 2022).

¹⁰⁸VARÈSE Louise, *Varèse: A Looking-Glass Diary, Vol. 1*, s.l., W. W. Norton Co Inc, 1972, p. 50. Traduction de l'anglais avec l'aide du site Deepl.com.

Il n'existe même aucune source à notre connaissance qui mentionne la composition d'œuvres originales écrites pour le clavecin électrique, le télégraphe musical ou le telharmonium. Ce constat corrobore l'hypothèse avancée précédemment. Cela signifie que les électrophones antérieurs au thérémine sont utilisés pour jouer de la musique qui est préexistante à leur invention comme des œuvres baroques ou classiques ou bien des titres musicaux populaires de leur temps. Ils reproduisent des titres, mais ne sont pas utilisés pour en composer des nouveaux. Cet aspect est accentué par les inventeurs eux-mêmes. Ces derniers voient le réarrangement ou la réinterprétation d'une musique plus ancienne au moyen d'électrophones comme une forme de progrès musical. Jean-Baptiste Delaborde, Elisha Gray et Thaddeus Cahill ne mentionnent jamais que leur invention pourrait être utilisée comme un outil de composition.

Nous devons cependant nuancer la réflexion précédente et bien préciser qu'elle ne concerne pas le thérémine et la génération d'électrophones qui émerge après ce dernier¹⁰⁹. En effet, des œuvres originales ont été composées pour le thérémine. Nous pouvons citer par exemple *First Airphonic Suite* composée en 1929 par Joseph Schillinger ou bien la *Fantasia, H.301* composée en 1944 par Bohuslav Martinů. Parmi la génération d'électrophones ayant succédé au thérémine, nous retrouvons des électrophones pour lesquels d'autres œuvres originales ont été écrites, par exemple les ondes Martenot (inventées par Maurice Martenot et présentées au public en 1928) et le trautionium (inventé par Friedrich Trautwein en 1930). Darius Milhaud compose sa *Suite pour ondes musicales Martenot et piano* en 1933 et Olivier Messiaen compose la *Fête des belles eaux* pour six ondes Martenot en 1937. Paul Hindemith compose sept pièces en trio pour trois trautioniums intitulées *Des Kleinen Elektromusikers Lieblinge* en 1930.

Les instruments susmentionnés possèdent des timbres insolites en comparaison avec les instruments acoustiques conventionnels. Pour cette raison, nous avançons l'hypothèse qu'ils ont mieux réussi à s'imposer comme outils de création musicale auprès des compositeurs. Cette remarque pourrait s'avérer pertinente, car elle semblerait contredire la présence d'un intervalle de temps, comme évoqué dans la question de recherche, entre l'émergence des premiers électrophones et l'utilisation d'électrophones comme outils de création musicale. Toutefois, comme expliqué dans le chapitre introductif, les compositions réalisées entre 1900 et 1950 pour électrophones sont épisodiques, voire anecdotiques, au sein des carrières de leur compositeur. Elles sont relativement peu nombreuses et demeurent circonscrites à la musique dite «savante».

¹⁰⁹Nous pouvons réellement parler d'une nouvelle génération d'électrophones à partir du thérémine. Cette nouvelle génération comprend tous les électrophones qui sont conçus au moyen de tubes à vide. L'auteur Thom Holmes fait une distinction similaire au sein des électrophones dans le chapitre *Earliest Experiments* de son ouvrage *Electronic and Experimental Music: Technology, Music, and Culture*. Thom Holmes situe la première génération d'électrophones employant du *direct current* entre 1900 et 1919. Il situe la deuxième génération employant des *vacuum tubes* entre 1920 et 1959. Voir HOLMES Thom, *Electronic and Experimental Music: Technology, Music, and Culture*, op. cit.

Dans cette dernière section du chapitre 2, nous avons évoqué des hypothèses qui nous permettent de répondre à la question de recherche de ce travail, à savoir les difficultés techniques rencontrées avant l'invention du tube à vide et le statut de curiosité intellectuelle. Toutefois, ce chapitre ne nous permet pas de comprendre pourquoi, hormis les quelques compositions originales mentionnées plus haut, les électrophones n'ont pas rencontré plus de succès à partir du tournant technologique initié par l'audion en 1906. Pour compléter les hypothèses mentionnées dans cette section et répondre de façon holistique à la question de recherche, il est pertinent de situer les premiers électrophones dans leur contexte historique et artistique. Cela fait l'objet du chapitre 3 qui analyse les courants musicaux de la première moitié du XXe siècle qui ont vu émerger les premiers électrophones.

Chapitre 3

Étude des courants musicaux de la première moitié du XXe siècle

Ce chapitre a pour objectif d'explorer les principales lignes de force des courants musicaux qui ont traversé la première moitié du XXe siècle en Europe et aux États-Unis. Cette période correspond pour ainsi dire à l'intervalle de temps entre l'émergence des premiers électrophones et l'utilisation d'électrophones comme outils de création musicale. En fin de chapitre, nous proposons des pistes de réponses complémentaires à la question de recherche sur la base de l'étude des caractéristiques communes entre les courants abordés.

Tendre vers l'exhaustivité n'est pas dans l'intérêt de ce chapitre. La méthodologie de recherche consiste plutôt à identifier des caractéristiques pertinentes qui nous aident à étudier la question de recherche sous différents angles. Il n'est pas concevable de couvrir une période historique si riche en l'espace d'un chapitre sans l'apparition indubitable d'un biais méthodologique, en particulier un biais de confirmation¹. Afin de limiter ce biais, nous avons utilisé un ouvrage de référence comme base pour la rédaction² et avons croisé chaque information tirée de cet ouvrage avec des sources externes. Le choix des courants présentés est inévitablement influencé par les sources consultées.

Nous avons bien conscience qu'étudier la musique par courants n'est pas une approche universelle, car de nombreux compositeurs semblent difficilement assimilables à un courant bien défini. De plus, certains courants ne rencontrent pas de consensus dans la communauté des musicologues. Cependant, ce type d'approche présente un compromis intégrant d'une part l'étude des compositeurs phares qui ont vécu durant la période d'intérêt et, d'autre part, l'analyse de repères temporels qui formalisent l'histoire de la musique.

¹Le biais de confirmation survient quand l'esprit humain cherche des informations qui confirment ses connaissances et ignore ce qui les remet en question. Voir *ifcen*, «Les biais cognitifs - le biais de confirmation», <https://ifcen.com/2021/07/06/le-biais-de-confirmation/> (page consultée le 12 juin 2022).

²Il s'agit d'une monographie de Jean-Yves Bras. Voir BRAS Jean-Yves, *Les courants musicaux du XXème siècle ou la musique dans tous ses états*, Paris, Papillon, 2003.

3.1 Considérations générales au sujet du XXe siècle

En comparaison des siècles précédents, le XXe se caractérise par une diversité musicale considérable et un goût pour l'expérimentation. Les créateurs sont soucieux de trouver et de circonscrire leur identité non seulement par rapport à leurs pairs, mais également à travers l'étendue de leur production, approfondissant d'une œuvre à l'autre un art toujours remis en question³.

Le début du XXe siècle ne signe pas la fin brusque des genres et des périodes qui ont parcouru le XIXe, particulièrement empreint du romantisme, dont la pleine maturité fut atteinte avec des compositeurs comme Frédéric Chopin, Robert Schumann, Hector Berlioz et Franz Liszt. Ce n'est que progressivement que la création au XXe siècle ne s'inscrit plus dans la volonté de satisfaire les idées du beau et de l'émotion propres au romantisme⁴.

3.2 Courants de musique dite «savante»

Des changements de la syntaxe musicale opèrent comme une césure naturelle et progressive entre la période romantique et le début du XXe siècle⁵. La période romantique se prolongera jusqu'à la première décennie du XXe siècle, moment où l'on peut estimer qu'elle cède définitivement sa place au «modernisme»⁶.

3.2.1 Impressionnisme musical

En 1894, Claude Debussy⁷ marque le début stylistique du XXe siècle en musique avec son *Prélude à l'après-midi d'un faune*⁸. Dans cette œuvre, Debussy tente de saisir l'impression générale des différents éléments de la nature qui se dégagent du poème homonyme de Stéphane Mallarmé *L'après-midi d'un faune*. Pour cela, il met un point d'honneur sur le timbre des instruments et privilégie une orchestration plutôt intime⁹. Le *Prélude à l'après-midi d'un*

³Ibid., p. 5.

⁴Ibid.

⁵SAMSON Jim, «Romanticism», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000023751> (page consultée le 17 juin 2022).

⁶Le modernisme désigne habituellement la musique écrite traditionnelle établie dans la première moitié du XXe siècle. Elle a été précédée par la musique du romantisme et a été suivie par la musique dite «contemporaine». Voir *Hisour Art Culture Histoire*, «Musique du modernisme», <https://www.hisour.com/fr/modernism-music-35882/#> (page consultée le 21 juin 2022).

⁷Si Claude Debussy est souvent considéré comme la figure de proue de l'impressionnisme, d'autres compositeurs avaient auparavant développé un style apparenté à l'esthétique de ce courant. En effet, certaines compositions de Franz Liszt évoquent déjà l'esthétique impressionniste/symboliste dans leur arrangement. Voir HOI-NING LEE Thomas, *Evocations of Nature in the Piano Music of Franz Liszt and the Seeds of Impressionism*, thèse de doctorat, Université de Washington, 2016.

⁸BRAS Jean-Yves, *Les courants musicaux du XXe siècle ou la musique dans tous ses états*, op. cit., p. 18.

⁹LOYER Aurélie, «Prélude à l'après-midi d'un faune. Claude Debussy», dans *Philharmonie de Paris à la demande* (en ligne), <https://pad.philharmoniedeparis.fr/0764467-prelude-a-l-apres-midi-d-un-faune-de-claude-debussy.aspx> (page consultée le 22 juin 2022).

faune signe le début de ce que l'on qualifie habituellement d'impressionnisme musical¹⁰. La forme musicale impressionniste se caractérise par l'utilisation d'harmonies qui ne respectent plus aussi strictement les règles de la tonalité que précédemment. Ces harmonies donnent aux œuvres un pouvoir plus suggestif¹¹.

L'association entre impressionnisme et innovation en musique est limitée aux compositeurs qui ont été influencés par Debussy ou qui lui étaient artistiquement proches, par exemple Maurice Ravel. Néanmoins, soulignons que Debussy et Ravel employaient des styles de compositions tout de même différents. Les catégoriser comme impressionnistes est une facilité historique, car ils étaient contemporains et vivaient tous deux à Paris¹².

3.2.2 Atonalité, dodécaphonisme et sérialisme

Durant les années de la Seconde école de Vienne, une véritable révolution s'opère sur le plan de la tonalité et de la modalité. Cette révolution marque le début des compositions dites «atonales»¹³, avec pour chef de file Arnold Schönberg¹⁴. Ces compositions suspendent les fonctions tonales qui régissaient la musique occidentale depuis Jean-Sébastien Bach : tonique, hiérarchie des degrés, harmonie, dissonance, cadences, etc. En 1923, en écrivant la valse qui constitue la dernière de ses *Cinq Pièces pour piano* opus 23, Arnold Schönberg utilise systématiquement les douze sons de l'échelle chromatique. Le système qu'il imagine à cette occasion est nommé par la suite dodécaphonique¹⁵.

Les compositeurs Alban Berg et Anton Webern, tous deux élèves de Schönberg, contribueront au développement des courants issus de l'atonalité. Anton Webern, par exemple, suivra les traces de Schönberg en étendant le sérialisme aux hauteurs et aux durées, prolongeant l'atonalité et le dodécaphonisme dans le courant dit du sérialisme intégral. Anton Webern sera considéré comme la référence des compositeurs de la génération suivante, connue sous le nom d'école de Darmstadt¹⁶.

¹⁰ *Impression, soleil levant*, un tableau de Monet réalisé en 1873, est à l'origine de la première utilisation du terme «impressionnisme». Voir SCHLESSER Thomas, «Impression, Soleil Levant: enquête sur un chef-oeuvre», dans *Beaux Arts Magazine*, no. 363 (2014), p. 100-105.

¹¹ *Britannica*, «Impressionism. Art», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/Impressionism-art> (page consultée le 22 juin 2022).

¹² Voir SHIBATANI Naomi, *Contrasting Debussy and Ravel: A Stylistic Analysis of Selected Piano Works and Ondine*, thèse de doctorat, Rice University, 2008, p. 3-11.

¹³ Soulignons que le mot «atonalité» ne s'applique à aucun genre musical bien déterminé. Il englobe plutôt tous les styles musicaux dans lesquels les règles du système tonal classique ne sont plus employées. Voir GARRIGUES Juliette, PHILIPPOT Michel, «Atonalité», dans *Encyclopædia Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/atonalite/> (page consultée le 22 juin 2022).

¹⁴ *Grove Music Online*, «Second Viennese School», <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000053872> (page consultée le 23 juin 2022).

¹⁵ NEIGHBOUR Oliver, «Schoenberg [Schönberg], Arnold (Franz Walter)», dans *Oxford Music Online*, <https://doi.org/10.1093/gmo/9781561592630.article.25024> (page consultée le 22 juin 2022).

¹⁶ Voir CHORIER Jean-Paul, «Le dodécaphonisme sériel», dans *Introduction à la musique classique*, <https://classic-intro.net/introductionalamusique/vingtieme4-2.html> (page consultée le 18 juin 2022).

3.2.3 Bruitisme

Le bruitisme voit le jour en Italie en 1913 avec le manifeste de Luigi Russolo intitulé *L'arte dei rumori* (l'art des bruits)¹⁷. Ce courant musical est influencé par le courant futuriste fondé par l'écrivain Filippo Tommaso Marinetti en 1909¹⁸. Dans son manifeste, Luigi Russolo explique que l'oreille humaine s'est habituée aux sons des environnements urbains et industriels, et que ces environnements acoustiques exigent une approche nouvelle concernant les instruments de musique et le processus de composition¹⁹ :

Chaque son porte en soi un noyau de sensations déjà connues et usées qui prédispose l'auditeur à l'ennui, malgré les efforts des musiciens novateurs. Nous avons tous aimé et goûté les harmonies des grands maîtres. Beethoven et Wagner ont délicieusement secoué notre cœur durant bien des années. Nous en sommes rassasiés. C'est pourquoi nous prenons infiniment plus de plaisir à combiner idéalement des bruits de tramways, d'autos, de voitures et de foules criardes qu'à écouter encore, par exemple, l'Héroïque ou la Pastorale²⁰.

Pour Russolo, les sons dits «purs»²¹ ne sont qu'une possibilité de composition infime parmi toutes les sonorités envisageables. Selon lui, les compositeurs devraient s'affranchir des sons dits «purs» pour apprendre à composer avec des bruits. Il s'agit du premier courant musical ayant recours à des objets sonores qui n'étaient pas conventionnels. Divers compositeurs s'essayeront au bruitisme²².

3.2.4 Mouvement néoclassique

Dans l'entre-deux-guerres, en opposition à la musique moins formelle des périodes romantiques et impressionnistes²³, émerge le néoclassicisme, un mouvement musical inspiré des éléments traditionnels de la musique classique comme la retenue émotionnelle, l'ordre et la clarté²⁴. L'emploi de ce terme recouvre un ensemble d'approches musicales qui renouent avec les procédés d'écriture plus anciens.

¹⁷BROWN Barclay, «The Noise Instruments of Luigi Russolo», dans *Perspectives of New Music*, vol. 20/(1-2) (1981), p. 31-48.

¹⁸LISTA Giovanni, «Filippo Tommaso Marinetti ou la guerre comme œuvre d'art totale», dans *Inflexions*, vol. 44/2 (2020), p. 111-119, <https://www.cairn.info/revue-inflexions-2020-2-page-111.htm> (page consultée le 17 juin 2022).

¹⁹SOLOMOS Makis, «Bruits 'entonnés' et sons 'convenables' : Russolo et Schaeffer ou la domestication des bruits», dans *Filigiane. Musique, esthétique, sciences, société*, n°7 (2008), p. 133-157, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00770151/document> (page consultée le 19 juin 2022).

²⁰RUSSOLO Luigi, *L'Arte dei rumori*, Milan, Edizioni futuriste di Poesia, 1916, p. 10-11. Traduction fournie par : *L'art en théorie*, «Art des bruits - Luigi Russolo», <https://theoria.art-zoo.com/fr/art-des-bruits-luigi-russolo/> (page consultée le 19 juin 2022).

²¹Ibid.

²²Nous pouvons mentionner par exemple *Parade* d'Erik Satie (1917) ou encore *Fonderies d'acier* d'Alexandre Mossolov (1924). BRAS Jean-Yves, *Les courants musicaux du XXe siècle ou la musique dans tous ses états*, op. cit., p. 135.

²³GOUBAULT Christian, *Vocabulaire de la musique à l'aube du XXe siècle*, Paris, Minerve, 2000, p. 131-133.

²⁴*Spiegato*, «Qu'est-ce que la musique néoclassique ?», <https://spiegato.com/fr/quest-ce-que-la-musique-neoclassique> (page consultée le 20 juin 2022).

Aujourd'hui, par facilité, nous qualifions de «néoclassiques» divers compositeurs qui ont eu la volonté, à un moment donné, de revenir à des pratiques musicales plus conventionnelles tout en incorporant des éléments de composition novateurs comme des chromatismes, des dissonances ou bien des rythmes variés. Parmi les compositeurs néoclassiques, nous retrouvons, entre autres, Sergueï Prokofiev, Igor Stravinsky ou encore Paul Hindemith²⁵. Cependant, tous ces compositeurs n'avaient pas des objectifs similaires. Cela explique pourquoi cette appellation demeure ambiguë et sa définition imprécise²⁶. Le qualificatif «néoclassique» n'est en effet pas suffisant pour cerner entièrement l'identité artistique des compositeurs susmentionnés, mais désigne plutôt une phase de composition qu'ils ont traversée.

Le groupe des six, qui se construit autour de Jean Cocteau, composé de Darius Milhaud, Francis Poulenc, Arthur Honegger, Georges Auric, Louis Durey et Germaine Tailleferre, est cité comme un exemple d'ensemble de compositeurs néoclassiques. La création de ce groupe remonte en 1916 à Paris et il prend fin en 1923²⁷. Le groupe s'inscrit bien dans une conception néoclassique de la musique et se positionne à l'encontre de l'impressionnisme et du romantisme wagnérien.

3.2.5 Musique concrète

En 1948, dans un studio de la Radiodiffusion Télévision française (RTF), Pierre Schaeffer emploie pour la première fois des matériaux sonores enregistrés comme instruments de composition et établit les bases de la musique concrète²⁸. Aux premiers temps de la musique concrète, le disque est le principal outil de composition. Après, le travail de montage sera rendu plus souple avec la démocratisation de la bande magnétique dans les années 1950²⁹. En 1950, Pierre Schaeffer écrit dans la revue *Polyphonie* :

On peut en effet comparer exactement les deux démarches musicales, l'abstraite et la concrète. Nous appliquons, nous l'avons dit, le qualificatif d'abstrait à la musique habituelle, du fait qu'elle est d'abord conçue par l'esprit, puis notée théoriquement, enfin réalisée dans une exécution instrumentale. Nous avons appelé notre musique «concrète» parce qu'elle est constituée à partir d'éléments préexistants, empruntés à n'importe quel matériau sonore, qu'il soit bruit ou son musical, puis composée expérimentalement par une construction directe, aboutissant à réaliser une volonté de composition sans le secours, devenu impossible, d'une notation musicale ordinaire³⁰.

²⁵WHITTALL Arnold, «Neo-classicism», dans *Oxford Music Online*, <https://doi-org.proxy.bib.ucl.ac.be:2443/10.1093/gmo/9781561592630.article.19723> (page consultée le 24 juin 2022).

²⁶Voir GOUBAULT Christian, *Vocabulaire de la musique à l'aube du XXe siècle*, op. cit.

²⁷GRIFFITHS Paul, «Les Six», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemus/ic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000025911> (page consultée le 16 juin 2022).

²⁸BRAS Jean-Yves, *Les courants musicaux du XXe siècle ou la musique dans tous ses états*, op. cit., p. 50.

²⁹Ibid., p. 56-57.

³⁰SCHAEFFER Pierre, «Introduction à la musique concrète», dans *Polyphonie : Revue musicale trimestrielle. La musique mécanisée*, 1950, pp. 30-52.

Pierre Henry, disciple d'Olivier Messiaen, rejoint Schaeffer après une première œuvre qu'ils composent ensemble en 1950. Cette dernière est intitulée *Bidule en ut*³¹.

Presque au même moment (1951), un studio de «musique électronique»³² est fondé à Cologne sous l'autorité de Herbert Eimert. Les compositeurs de musique électronique, à la différence des compositeurs de musique concrète, manipulent le son en studio en modifiant ses paramètres (fréquence, amplitude, durée) en faisant varier la vitesse de la bande magnétique, par effet de filtrage ou via des chambres d'écho. Ce style de musique appelle à une composition sur partition tandis que la musique concrète travaille plutôt le phénomène sonore³³. Bien que la musique concrète et la musique électronique soient nées séparément, Karlheinz Stockhausen, avec *Gesang der Jünglinge*, les réconcilie sous la forme d'une musique dite «électroacoustique» qui sera leur prolongement dans les années 1960. Mentionnons que la musique électroacoustique a bien trouvé sa place au cinéma, particulièrement dans des courts métrages ou la publicité. Pierre Henry fut sans doute le plus demandé, composant en 1952 la première musique concrète destinée au septième art (*Astrologie* de Jean Grémillon)³⁴.

En 1966, Pierre Schaeffer écrit son manifeste intitulé *Traité des objets musicaux* afin de formaliser les bases de la musique concrète³⁵. Cet ouvrage s'inscrit dans la continuité du manifeste de Luigi Russolo en ce qui concerne l'effort d'appriivoiser le bruit. Cependant, Schaeffer n'a jamais reconnu l'influence de Russolo sur son œuvre³⁶.



Figure 3.1: Illustration de Pierre Henry et Pierre Schaeffer manipulant divers matériaux sonores dans le cadre du groupe de recherches musicales (GRM) fondé en 1951³⁷.

³¹PALOMBINI Carlos, «Pierre Schaeffer, 1953: Towards an Experimental Music», dans *Music & Letters*, vol. 74/4 (1993), p. 543.

³²Dans ce contexte, précisons qu'il ne faut pas comprendre ce terme avec acception moderne.

³³BRAS Jean-Yves, *Les courants musicaux du XXe siècle ou la musique dans tous ses états*, op. cit., p.138.

³⁴Ibid., p.192.

³⁵Voir SCHAEFFER Pierre, *Traité des objets musicaux : essai interdisciplines*, Paris, Seuil, 1977.

³⁶MAKIS Solomos, «Bruits 'entonnés' et sons 'convenables' : Russolo et Schaeffer ou la domestication des bruits», op. cit.

³⁷120 Years of Electronic Music, «The Groupe de Recherches Musicales Pierre Schaeffer, Pierre Henry & Jacques Poullin, France 1951», <https://120years.net/wordpress/the-grm-group-and-rtf-electronic-music-studio-pierre-schaeffer-jacques-poullin-france-1951/> (page consultée le 18 juin 2022).

3.3 Courants de musique dite «populaire»

Les courants étudiés précédemment appartiennent à la musique dite «savante». Cette section s'intéresse aux courants³⁸ de musique dite «populaire» ayant marqué le début du XXe siècle.

3.3.1 Jazz

Le jazz émerge aux États-Unis vers le début du XXe siècle. La forme primitive du jazz, qui naît à La Nouvelle-Orléans, prend racine dans les musiques traditionnelles des Afro-Américains (descendants des anciens esclaves) et les musiques folkloriques américaines³⁹. L'héritage afro-américain se manifeste dans le jazz par des formes musicales en *call and response* propres au *field hollers*⁴⁰ et des progressions harmoniques issues du blues. Sur le plan organologique, les premiers groupes de jazz consistent en une simplification des formations de fanfares, omniprésentes dans la vie musicale à La Nouvelle-Orléans⁴¹.

L'évolution stylistique du jazz s'effectue parallèlement aux flux migratoires des communautés afro-américaines du sud vers le nord des États-Unis au XXe siècle⁴², principalement vers New York et Chicago. Ces deux villes sont indissociables de l'histoire du jazz et ont vu défiler les plus grands noms du genre. Le premier enregistrement de jazz est réalisé par l'Original Dixieland Jazz Band en 1917. Un basculement stylistique se manifeste à partir de 1930. Il donne naissance au swing, un nouveau sous-genre plus balançant et décontracté qui survient conjointement au krach boursier de 1929 et à l'abolition de la prohibition⁴³. Dans les années 1940, le jazz évolue en sous-genres bien distincts : bebop, cool jazz, etc⁴⁴.

³⁸ Précisons que l'appellation «genres musicaux» semble également appropriée pour les «courants» abordés dans cette section.

³⁹ JACKSON Travis A. et TUCKER Mark, «Jazz», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000045011> (page consultée le 10 juin 2022).

⁴⁰ La musique des *field hollers* était un type de musique vocale chantée par les esclaves afro-américains aux États-Unis pour accompagner le travail dans les champs. Cette musique avait une fonction utile, car elle servait à communiquer et rythmer la cadence de travail. Les *field hollers* sont aussi une des racines du blues. Voir JACKSON Gale P., «Rosy, Possum, Morning Star: African American Women's Work and Play Songs», dans *Journal of Black Studies*, vol. 46/8 (2015), p. 779.

⁴¹ L'emploi des instruments de fanfare dans le jazz se justifie par leur accessibilité aux États-Unis après la guerre de Sécession. Durant ce conflit, chaque régiment possède sa propre fanfare. Une fois le conflit terminé, une grande quantité d'instruments de la famille des vents et des cuivres a été disponible. Voir LEWIS William Dukes, *Marching to the Beat of a Different Drum: Performance Traditions of Historically Black College and University Marching Bands*, thèse de doctorat, University of North Carolina at Chapel Hill, 2003.

⁴² Dans l'histoire des États-Unis, la grande migration désigne la migration généralisée des communautés rurales afro-américaines au XXe siècle vers les grandes villes du nord et de l'ouest du pays. De 1916 à 1970, on estime que six millions d'Afro-Américains du sud ont déménagé dans les zones urbaines du nord et de l'ouest. Voir *Britannica*, «Great Migration. African-American history», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/event/Great-Migration> (page consultée le 10 juin 2022).

⁴³ JACKSON Travis A. et TUCKER Mark, «Jazz», op. cit.

⁴⁴ *Britannica*, «Bebop. Jazz», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/bebop> (page consultée le 18 juin 2022).

3.3.2 Blues

Un peu avant le début du XXe siècle, dans le sud des États-Unis, un autre genre ancré dans les musiques de cultures afro-américaines voit le jour, le blues. Ce terme apparaît pour la première fois dans le journal de Charlotte Forten⁴⁵. Le mot a une connotation triste et cafardeuse. Il désigne un état d'esprit propre aux communautés afro-américaines qui sont victimes de l'oppression et de la ségrégation totale de la société américaine postesclavage. De nombreuses chansons de blues abordent aussi des problèmes d'amour. Ces thématiques mélancoliques demeurent comme les caractéristiques principales du genre blues à travers les âges. Les premiers chanteurs et chanteuses de blues débute leur carrière en tant que musicien·ne·s itinérant·es. C'est notamment le cas de Ma Reiney, chanteuse phare du genre dit «classic blues»⁴⁶. En 1912, le blues bénéficie d'une reconnaissance plus officielle avec le titre *Memphis Blues*, écrit par William Christopher Handy. À la suite de ce morceau, de nombreuses chansons de Tin Pan Alley⁴⁷ avec le mot «blues» dans leur intitulé font leur apparition⁴⁸. La structure du blues sera décrite par W.C. Handy dans son ouvrage *Father of the Blues* :

La forme à douze mesures, trois lignes, de la première et de la dernière phrase, avec sa structure harmonique de base de trois accords (tonique, sous-dominante, septième dominante) était celle déjà utilisée par les débardeurs noirs, les joueurs de piano des honkytonk, les vagabonds et autres membres de leur classe défavorisée mais inébranlable, du Missouri au Golfe, et était devenue un moyen commun par lequel ces individus pouvaient exprimer leurs sentiments personnels dans une sorte de soliloque musical. [...] Et les tierces et septièmes bémolisées de transition dans ma mélodie, par lesquelles je tentais de suggérer les liaisons typiques de la voix noire, étaient ce que l'on appelle depuis lors des 'blue notes'⁴⁹.

La forme du blues ne progresse pas significativement entre son apparition et la diffusion à grande échelle qu'il connaît dans les années 1930. Le blues et le rhythm and blues⁵⁰ sont deux genres à l'origine d'un courant musical qui marquera la seconde moitié du XXe siècle, le rock and roll. Outre la place centrale qu'occupe la voix dans le blues, les instruments phares du genre sont la guitare et l'harmonica. Le choix de ces instruments est justifié par leur coût peu élevé et l'aspect pratique de leur transport pour les musiciens itinérants.

⁴⁵FORTEN Charlotte L., *A Free Negro in the Slave Era*, éd. par Ray Allen Billington, New York, W. W. Norton & Company, 1981.

⁴⁶KOECHLIN Stéphane, *Le blues*, Paris, Flammarion, 2000, p. 9-14.

⁴⁷À la fin du XIXe siècle et au début du XXe siècle, Tin Pan Alley était l'emplacement physique des éditeurs de musique et des auteurs-compositeurs de la ville de New York qui dominaient la musique populaire aux États-Unis. *Britannica*, «Tin Pan Alley. Musical history», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/Tin-Pan-Alley-musical-history> (page consultée le 10 juin 2022).

⁴⁸*Britannica*, «Blues. Music», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/blues-music> (page consultée le 10 juin 2022).

⁴⁹HANDY William Christopher, *Father of the Blues: An Autobiography*, éd. par Arna Bontemps, New York, The Macmillan Company, 1941, p. 99. Traduction de l'anglais avec l'aide du site Deepl.com.

⁵⁰Mentionnons que l'appellation «rhythm and blues» change parfois de sens à travers le XXe siècle. Dans ce travail, le rhythm and blues désigne l'évolution du genre blues en plusieurs types de musiques populaires afro-américaines d'après-guerre et certaines musiques de rock blanches qui en sont dérivées. Voir *Britannica*, «Rhythm and blues music», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/rhythm-and-blues> (page consultée le 18 juin 2022).

3.3.3 Musique country

La country se développe à partir des musiques propres à la classe ouvrière américaine. Elle est influencée par les ballades traditionnelles, les airs de violon irlandais et le blues afro-américain. Les premiers enregistrements de musique country remontent à 1922. Par la suite, cette musique est devenue notamment connue sous le nom de hillbilly, avec des qualificatifs tels que «old-time», «old familiar tunes» et «hill and range music»⁵¹. Les thèmes prédominants sont un idéalisme rural imaginé, une célébration de l'identité de la classe ouvrière et une philosophie majoritairement chrétienne, socialement conservatrice et patriotique. Les musiciens de country se distinguent souvent par leur groupe à cordes traditionnel (violons, guitares acoustiques et banjos), leur accent du sud ou du Texas et leur timbre nasillard⁵².

3.4 Ligne du temps synoptique

La ligne du temps illustrée sur la figure 3.2 permet de visualiser les différents courants musicaux identifiés précédemment. La légende située en haut à gauche de la ligne du temps fournit des explications sur l'organisation du diagramme fléché. Ces flèches illustrent les interactions et les influences entre les courants musicaux.

Un graphe indiquant le nombre (cumulé) d'électrophones conçus au cours du temps est adjoint à la ligne du temps. Ce graphe renseigne aussi les dates de création du telharmonium et du thérémine, instruments introduits en détail dans le chapitre précédent.

L'objectif de la figure 3.2 est de rassembler sur un même graphique différents repères temporels énoncés en filigrane des chapitres 2 et 3.

⁵¹NEAL Jocelyn R., «Country music», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-1002224075> (page consultée le 11 juin 2022).

⁵²Ibid.

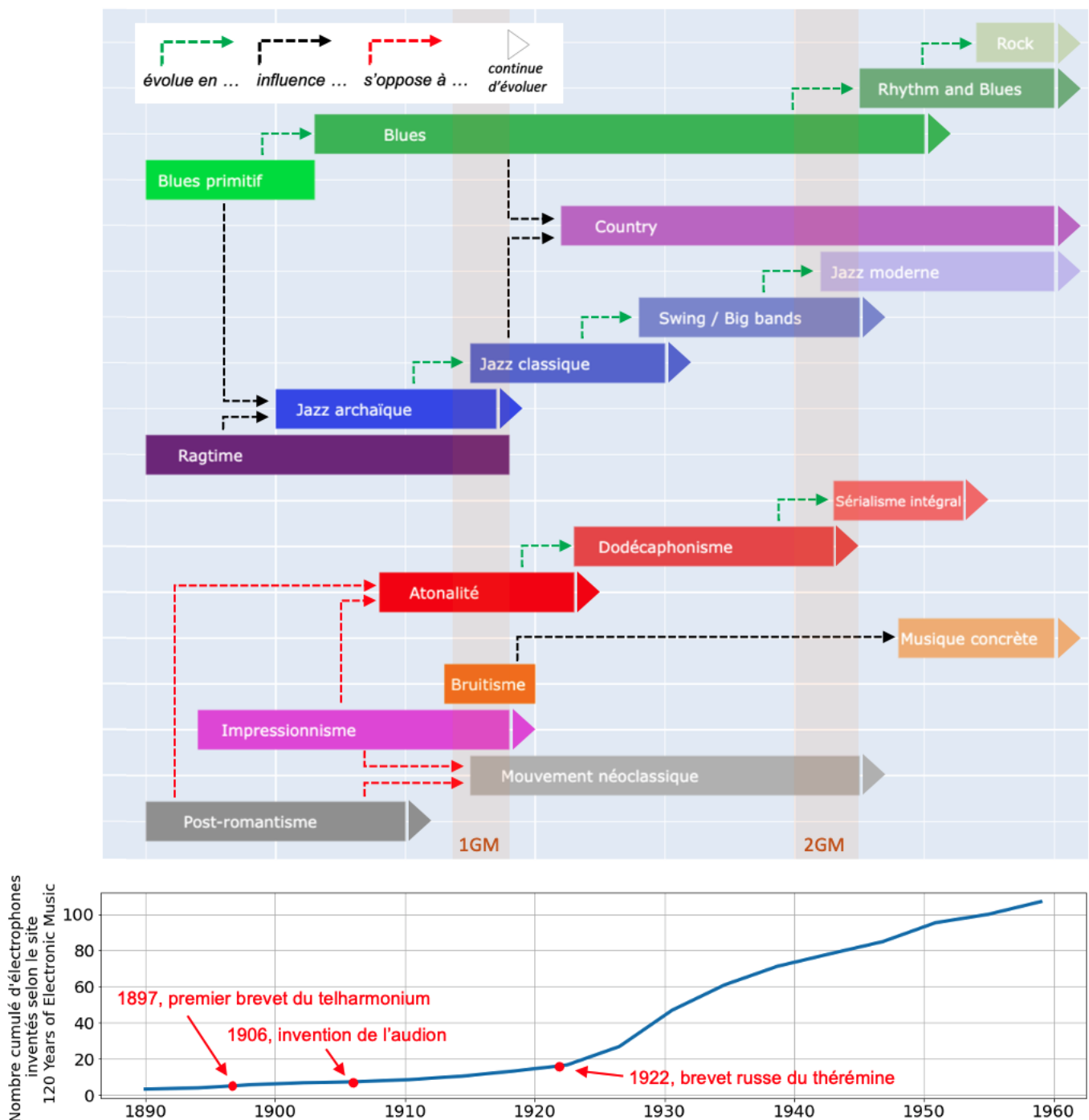


Figure 3.2: Ligne du temps synoptique des courants musicaux et évolution des électrophones dans la première moitié du XXe siècle. La ligne du temps a été construite sur la base des sources mentionnées dans les sections 3.2 et 3.3. L'objectif de cette ligne du temps est de retracer l'évolution de la majeure partie des courants musicaux ayant traversé la première moitié du XXe siècle et de mettre cette évolution en perspective avec l'invention des premiers électrophones. Par conséquent, un graphique indiquant le nombre d'électrophones inventés (cumulé au cours du temps) est aussi adjoint à la ligne du temps. Ce graphique a été établi sur la base des instruments recensés par le site *120 Years of Electronic Music*. Bien que ce site soit détaillé, ce graphique ne représente donc pas le nombre total d'électrophones inventés, mais permet de saisir la tendance de croissance du nombre d'électrophones inventés cumulé au cours du temps. Nous constatons qu'à partir de l'invention du thérémine, le nombre d'électrophones cumulé croît de façon plus significative. 1GM (resp. 2GM) est le diminutif pour la Première Guerre mondiale (resp.) Seconde Guerre mondiale.

3.5 Pistes de réponses complémentaires à la question de recherche

Dans le chapitre 2 consacré à l'étude de cas, nous avons formulé de premières hypothèses qui expliquent la presque absence des électrophones dans le paysage musical entre 1900 et 1950. Toutefois, nous sommes parvenus à la conclusion que les contraintes techniques imposées par les technologies électroniques n'expliquent pas cette absence à elles seules. Cette section a pour objectif de proposer des pistes de réponses complémentaires fondées sur des considérations d'ordre esthétique et historique. Ces considérations sont issues de l'étude des courants musicaux proposée dans les sections 3.2 et 3.3.

Au XXe siècle, nous constatons que les compositeurs de musique dite «savante» ont souhaité s'affranchir des codes artistiques qui les avaient précédés en cherchant leur propre langage musical⁵³ unique et novateur. Ce constat va dans le sens des considérations évoquées dans la section 3.1. Sur la base de l'étude des courants de musique suivants, impressionnisme musical, néoclassicisme et atonalité, nous observons que cette recherche d'innovations a pris la forme d'une remise en question des langages musicaux plus anciens tout en ayant recours à des supports de compositions similaires, c'est-à-dire des instruments acoustiques. Cette approche ne requiert donc pas l'utilisation d'électrophones. À titre d'exemple, mentionnons Arnold Schönberg et les compositions atonales. Bien que la forme des compositions atonales soit fondamentalement distincte de la musique romantique, les instruments employés demeurent identiques. Cette remarque ne concerne bien évidemment pas le courant bruitiste et la musique concrète qui emploient des matériaux sonores complètement inédits pour leur temps.

La question de la virtuosité des musiciens mérite également d'être soulignée. En effet, comme les identités musicales au XXe siècle se dessinaient au moyen de langages musicaux propres, nous faisons l'hypothèse que l'expression d'une forme de virtuosité était une opportunité pour les compositeurs de s'illustrer auprès du public et de leurs pairs. Or, nous avons découvert que certains électrophones possédaient des tessitures ou des moyens d'expression limités (p. ex. le télégraphe musical). Dans ce travail, nous émettons l'hypothèse que certains électrophones primitifs ne donnaient pas aux compositeurs des moyens suffisants (p. ex. une large tessiture ou la possibilité de jouer avec des nuances) pour exprimer leur virtuosité, ce qui explique pourquoi ils n'ont pas été utilisés comme outils de création musicale. L'argument proposé ici s'applique principalement pour les électrophones conçus avant l'invention du thérémine. Les électrophones conçus avec des tubes à vide ont permis une meilleure expression de la virtuosité⁵⁴.

⁵³Gardons à l'esprit que de nombreux musiciens et musicologues remettent en question l'idée que la musique soit assimilable à un langage. Voir par exemple BOULEZ Pierre, *Nécessité d'une orientation esthétique. Points de repère I: Imaginer*, Paris, Christian Bourgois, 1995, p. 111.

⁵⁴Nous pourrions aussi avancer l'hypothèse que le telharmonium est le premier électrophone à permettre aux créateurs d'exprimer leur virtuosité, car le timbre et les nuances de cet instrument sont modulables (voir section 2.3.3). Cependant, il y a eu peu d'interprètes de cet instrument. Ce faible nombre empêche la comparaison entre interprètes et ne permet pas vraiment, selon nous, d'établir une «norme de virtuosité» pour l'instrument.

Dans le cadre de ce travail, la question du timbre des premiers électrophones a déjà été abordée. Dans la section 2.5, nous avons proposé l'idée que les électrophones qui ont suivi l'invention du thérémine avaient été plus facilement acceptés comme outils de création musicale grâce à leur timbre original. Nous souhaitons parfaire cet aspect de la discussion au regard des éléments mentionnés dans ce chapitre 3. Nous faisons l'hypothèse que les instruments tels que le thérémine et les ondes Martenot ont aussi séduit des compositeurs de musique dite «savante» avec leur interface unique⁵⁵. Certains compositeurs inscrits dans un esprit d'avant-garde, fort marqué durant le début du XXe siècle dans le milieu de la musique dite «savante», n'ont pas seulement cherché des timbres insolites, mais de nouveaux moyens de composition inexplorés. Pour illustrer cette hypothèse, nous pouvons citer les *Écrits* d'Edgard Varèse :

Il faut que notre alphabet musical s'enrichisse. Nous avons aussi terriblement besoin de nouveaux instruments. Les futuristes (Marinetti et ses bruitistes) ont commis à cet égard une grosse erreur. Les nouveaux instruments ne doivent être, après tout, que des moyens temporaires d'expression. Les musiciens doivent aborder cette question avec le plus grand sérieux, aidés par des ingénieurs spécialisés. J'ai toujours senti dans mon œuvre personnelle, le besoin de nouveaux moyens d'expression. Je refuse de ne me soumettre qu'à des sons déjà entendus. Ce que je recherche, ce sont de nouveaux moyens techniques qui puissent se prêter à n'importe quelle expression de la pensée et la soutenir⁵⁶.

Par ailleurs, si ces «nouveaux moyens techniques» ont été inspirants pour certains compositeurs, nous pouvons aussi faire l'hypothèse qu'ils ont pu être rédhitoires pour d'autres. L'esthétique musicale de certains courants, en particulier ceux de musique dite «populaire», ne semble pas conciliable avec les timbres inédits, voire parfois étranges, des premiers électrophones.

Sur la base de la section 3.3, nous observons que les courants de musique dite «populaire» ont recours à des instruments aisément accessibles et peu onéreux. Cela se justifie par le fait que ces courants musicaux prennent racine dans des classes sociales plus défavorisées (communautés afro-américaines pour le blues et le jazz, classe rurale pour la musique country). De plus, les instruments employés dans ces courants musicaux populaires se transportent facilement, car de nombreux musiciens sont itinérants. Cependant, nous avons vu que les premiers électrophones sont difficilement transportables, requièrent nécessairement une source d'alimentation électrique et peuvent être coûteux (voir section 2.4.1, p. 37). Pour ces différentes raisons pratiques, les premiers électrophones n'ont pas trouvé leur place en tant qu'outils de création musicale au sein des courants de musique dite «populaire» au début du XXe siècle.

⁵⁵Pour information, les ondes Martenot peuvent être jouées au moyen d'un anneau fixé le long d'un ruban. À l'instar du thérémine, les ondes Martenot fonctionnent avec un oscillateur hétérodyne. Déplacer l'anneau le long du ruban modifie la fréquence d'un des deux oscillateurs à haute fréquence, ce qui modifie la hauteur du battement produit et donc la hauteur du son de l'instrument (voir section 2.4.3).

⁵⁶VARÈSE Edgar, *Écrits*, Paris, Christian Bourgois, 1983, p. 23.

Mentionnons un dernier point qui nous semble non négligeable, mais peu abordé dans la littérature. Nous constatons que les premiers électrophones émergent pour la majeure partie aux États-Unis et en Europe⁵⁷. Or, la première moitié du XXe siècle correspond à une période difficile pour ces deux continents ravagés par la Première Guerre mondiale, le krach boursier en 1929 (aux États-Unis) et la Seconde Guerre mondiale. Nous émettons l'hypothèse que ces circonstances économiques et politiques ont compliqué l'accès aux premiers électrophones, limité leur démocratisation et donc leur utilisation.

Dans le même ordre d'idées, il aurait été surprenant qu'un pays en conflit commercialise des électrophones produits dans le camp adverse. Par exemple, dans les années 1940-1950, utiliser des technologies russes dans le climat de la guerre froide n'est pas bien perçu aux États-Unis. Pour cette raison, le thérémine connaît une véritable baisse de popularité à ce moment-là⁵⁸.

⁵⁷Les instruments étudiés sont pour la plupart originaires des États-Unis. Toutefois, de nombreux électrophones sont inventés en Europe. Plus de 500 brevets pour des instruments électroniques (dans certains cas, plusieurs pour un seul instrument) ont été accordés en Grande-Bretagne, en France, en Allemagne et aux États-Unis jusqu'en 1950. Voir DAVIES Hugh, «Electronic instruments», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000008694?rskey=DPPimW&result=1> (page consultée le 3 mai 2022).

⁵⁸GLINSKY Albert, *Theremin. Ether Music and Espionage*, op. cit., p. 11.

Chapitre 4

Classification des cas d'étude dans Hornbostel-Sachs

Ce chapitre s'intéresse à la classification des instruments étudiés précédemment dans la version MIMO¹ du système Hornbostel-Sachs. Sur la base de cette classification et d'observations plus générales au sujet des électrophones, ce chapitre suggère également des voies d'améliorations possibles pour le système MIMO.

Tout d'abord, la section 4.1 revient sur les fondements de la classification de Hornbostel-Sachs et l'émergence de la catégorie des électrophones. Par la suite, la section 4.2 classe les instruments étudiés dans le chapitre 2 en fournissant un raisonnement détaillé pour chacun. La section 4.3 met en évidence les difficultés de classification rencontrées et propose des contributions pratiques afin d'améliorer le système actuel. La section 4.4 souligne les obstacles généralement rencontrés quand il s'agit de classer les électrophones. Finalement, les sections 4.5 et 4.6 proposent respectivement des pistes d'amélioration théoriques et pratiques pour le système de classification des électrophones. Ces deux dernières sections sont inspirées d'un entretien réalisé le 27 juillet 2022 avec Maarten Quanten, chercheur et musicologue ayant conçu la structure de la catégorie des électrophones sur la demande du projet MIMO.

Ce chapitre utilise des indices de classification de la version MIMO du système Hornbostel-Sachs. Cette version est disponible au lien suivant : <http://www.mimo-international.com/documents/hornbostel%20sachs.pdf>.

¹MIMO (Music Instrument Museums Online) est un projet financé par l'Union européenne qui fournit un point d'accès centralisé aux collections numériques des musées d'instruments de musique d'Europe et les rend disponibles sur EUROPEANA, un portail pour les musées, bibliothèques, archives et collections vidéo européens. Le projet MIMO visait également à réviser la classification Hornbostel Sachs. Voir *MIMO musical instrument museums online*, <https://mimo-international.com/MIMO/accueil-ermes.aspx>.

4.1 Classification de Hornbostel-Sachs

4.1.1 Des premiers systèmes de classification au système MIMO

Les premiers systèmes de classification d'instruments de musique remontent à l'Antiquité et sont bipartites ou tripartites². D'une part, les systèmes bipartites font habituellement la distinction entre les instruments à vent et les instruments à percussion dans un sens large³. D'autre part, les systèmes tripartites font plus généralement la distinction entre les instruments à cordes, à vent et à percussion. C'est le cas par exemple du premier livre du *De institutione musica* de Boèce⁴ écrit au VI^e siècle. Le compositeur allemand et théoricien de la musique Sebastian Virdung, auteur du premier traité d'organologie imprimé, divise lui aussi les instruments de musique de façon tripartite au début du 16^e siècle⁵.

Les systèmes bipartites et tripartites perdureront jusqu'à l'apparition de la classification établie par le musicologue belge Victor-Charles Mahillon⁶, publiée en 1880 pour le Musée instrumental du conservatoire royal de musique dont il était le directeur⁷. À l'époque, cette classification répond au besoin d'un système d'inventaire pour les musées qui comprennent d'importantes collections d'instruments de musique, parfois extraeuropéens. Elle distingue les instruments de musique sur la base de la nature de leur élément vibrant⁸ plutôt que la façon dont ils sont joués. De plus, contrairement à ses prédécesseurs, Victor-Charles Mahillon divise les instruments en quatre catégories; les instruments autophones, les instruments à membranes, les instruments à vent et les instruments à cordes.

Au début du XX^e siècle, les théoriciens et chercheurs Erich von Hornbostel et Curt Sachs élaborent un nouveau système de classification d'instruments de musique qui prendra leur nom. Cette classification est initialement publiée en allemand en 1914 sous le titre *Systematik der Musikinstrumente: ein Versuch*⁹ et comprend une introduction détaillée qui explique la conception du système. Les deux chercheurs décrivent les classifications tripartites traditionnelles comme illogiques et vont dans le sens d'une classification à quatre catégories comme Mahillon. Bien qu'il n'étendent pas la classification de Mahillon, car ils sont en

²WACHSMANN Klaus, «Instruments, Classification of», dans *Oxford Music Online*, <https://doi.org/10.1093/gmo/9781561592630.article.13818> (page consultée le 11 juillet 2022).

³Dans le système de classification qu'il propose en 1619, Michael Praetorius fait la distinction entre les instruments à vent et à percussion. Toutefois, l'acception du terme «percussion» est à comprendre avec une signification étendue, car elle inclut, selon Praetorius, le frottement et le pincement. Voir PRAETORIUS Michael, *Syntagma Musicum volume II. De Organographia*, Wolfenbüttel, Elias Holwein, 1619.

⁴Boèce, *De institutione musica*, livre I, chap. 2.

⁵VIRDUNG Sebastian, *Musica getuscht*, Bâle, [Michael Furter], 1511.

⁶Cette classification lui aurait été inspirée par un traité hindou rédigé en sanskrit, le *Natyasastra de Bharata*. Voir LEE Deborah, «Hornbostel-Sachs Classification of Musical Instruments», dans *Knowledge Organization*, vol. 47/1 (2020), p. 74.

⁷WATERHOUSE William, «Mahillon, Victor-Charles», dans *Oxford Music Online*, <https://doi.org/10.1093/gmo/9781561592630.article.53197> (page consultée le 10 juillet 2022).

⁸Voir CEULEMANS Anne-Emmanuelle, *Technologie de la musique - organologie (partie systématique)*. *LMUSI1516*, cours de musicologie dispensée à L'UCLouvain en 2017-2018, syllabus p. 75.

⁹VON HORNBOSTEL Erich Maria et SACHS Curt. «Systematik der Musikinstrumente. Ein Versuch», dans *Zeitschrift für Ethnologie*, vol. 46 (1914), p. 553-590.

désaccord sur le principe d'un système «fermé» auquel il n'est pas possible d'ajouter des subdivisions¹⁰, les quatre grandes catégories sont maintenues. Seul le terme «autophone» est remplacé par «idiophone», afin d'éviter toute confusion avec la classe des automatophones¹¹. Hornbostel-Sachs est un système de classification hiérarchique qui emploie la version européenne de la classification décimale de Dewey¹². Par rapport à la classification de Mahillon, Hornbostel-Sachs fournit une plus grande flexibilité aux musicologues, car elle permet des ajouts aux classes existantes. Ces ajouts prennent la forme de suffixes adjoints aux numérotations des classes principales.

Hornbostel-Sachs est le système de classification le plus couramment utilisé par les musicologues aujourd'hui. Le système MIMO, dernière version de Hornbostel-Sachs proposée en 2011, a été adopté dans les bases de données de nombreux musées.

4.1.2 Instruments électrophoniques ou électrophones

Le musicologue anglais Francis W. Galpin décrit les instruments électrophoniques (ou électrophones) pour la première fois en 1937. Il les caractérise comme «des instruments dans lesquels les ondes sonores sont formées par des oscillations créées dans des ondes électroniques»¹³. La première apparition de la cinquième catégorie dans Hornbostel-Sachs remonte à 1940 dans un ouvrage de Curt Sachs. Dans ce dernier, Sachs déclare qu'il existe «cinq classes principales d'instruments» et mentionne une section pour les électrophones dans le chapitre intitulé «Terminologie»¹⁴. Les électrophones sont définitivement ajoutés en 2011 dans le cadre du projet MIMO. La catégorie des électrophones doit sa structure à Maarten Quanten.

Dans la version MIMO de Hornbostel-Sachs, les électrophones [5]¹⁵ sont répartis en six classes principales : [51] instruments et dispositifs électroacoustiques [52] instruments et dispositifs électromécaniques [53] instruments/modules et composants électroniques analogiques [54] instruments/modules et composants numériques [55] configurations hybrides analogiques et numériques et [56] logiciels.

¹⁰LEE Deborah, «Hornbostel-Sachs Classification of Musical Instruments», op. cit.

¹¹CEULEMANS Anne-Emmanuelle, *Technologie de la musique - organologie (partie systématique)*. LMUSI1516, op. cit., p. 79.

¹²Pour en savoir plus, voir TAYLOR Arlene G., «Teaching the Dewey Decimal Classification System», dans *Cataloging Classification Quarterly*, vol. 42/3 (2006), p. 97-117.

¹³«instruments in which the sound-waves are formed by oscillations set up in electronic waves», voir GALPIN Francis W., *A Textbook of European Musical Instruments. Their Origin, History and Character*, Londres, Williams & Norgate, 1937, p. 30.

¹⁴Voir SACHS Curt, *The History of Musical Instruments*, s.l., W. W. Norton, 1940.

¹⁵Dans le cadre de ce travail, un chiffre entre crochets représente l'index de classification dans Hornbostel-Sachs. En l'occurrence, les électrophones sont la cinquième grande catégorie. Lorsque plusieurs chiffres se succèdent, il s'agit d'une sous-classe de Hornbostel-Sachs.

4.2 Classification des instruments étudiés comme cas d'étude dans le système MIMO

4.2.1 Classification du clavecin électrique

Le clavecin électrique comprend des cloches qui produisent des sons sans haut-parleurs. Le phénomène électrostatique qui survient lorsqu'une touche du clavier est abaissée provoque la mise en son. La force d'attraction électrostatique est donc la cause de la mise en son d'un objet acoustique. Trois possibilités de classification se présentent au musicologue qui cherche à classer le clavecin électrique.

La première possibilité est d'opter pour la classe [51] et plus précisément la sous-classe [511]. Celle-ci inclut les idiophones électroacoustiques. Toutefois, le principe de fonctionnement du clavecin électrique ne correspond pas à la description fournie par la classe [51], car une vibration acoustique n'est pas à l'origine de la fluctuation d'un courant électrique. Le clavecin électrique est certes obtenu par la modification structurelle d'un instrument existant (le carillon), mais aucun signal n'est transmis vers un haut-parleur pour être converti en ondes acoustiques. Concernant cette première option de classification, l'incertitude se situe à un niveau conceptuel. En effet, l'appellation «idiophone électroacoustique» fait sens pour décrire le clavecin électrique, mais la définition des instruments électroacoustiques ne convient pas au principe de fonctionnement de cet instrument.

La deuxième possibilité est de considérer la classe [52]. Celle-ci comporte les instruments électromécaniques. Cette approche est cohérente, car une pièce mécanique mobile inaudible (le battant métallique) frappe les cloches par attraction électrostatique. Cependant, le mouvement mécanique n'est pas à l'origine de la génération d'un courant alternatif, ce qui ne correspond pas à la description fournie. Parallèlement à cela, le fonctionnement du clavecin électrique ne correspond à aucune sous-classe des instruments électromécaniques.

La dernière possibilité est de s'en tenir rigoureusement au critère de classification initial de Hornbostel-Sachs, c'est-à-dire la nature de l'élément vibrant. Dans le cas du clavecin électrique, les éléments vibrants sont les cloches. Autrement dit, cet instrument électrique se classe au côté d'un carillon conventionnel dans la classe [111.242.22]. D'un point de vue méthodologique, ce choix semble plus judicieux, mais ne renseigne en rien le principe de fonctionnement électrostatique de l'instrument.

4.2.2 Classification du télégraphe musical

Le télégraphe musical génère des signaux électriques alternatifs de fréquences audibles à partir de l'ouverture et de la fermeture périodique de circuits via les mouvements oscillatoires de lamelles métalliques conductrices. Les signaux produits sont transmis par des fils conducteurs, en l'occurrence une ligne téléphonique, pour être convertis en ondes acoustiques par des haut-parleurs dans un endroit distant de l'interprète.

Cet instrument appartient à la classe [51], car une vibration mécanique audible entraîne une fluctuation analogique d'un courant électrique. Comme mentionné ci-dessus, la vibration provient d'une lamelle métallique. Pour cette raison, la sous-classe [511] semble la plus adaptée pour le télégraphe musical. Le télégraphe musical se range aux côtés des pianos électriques Fender-Rhodes et des Wurlitzers.

Rappelons que les lamelles métalliques du télégraphe musical génèrent un son audible pour l'interprète. De ce fait, le télégraphe musical peut être aussi perçu comme un «simple» instrument acoustique et se ranger dans la classe des lamellophones [12]. Cependant, nous ne pouvons pas attribuer une sous-classe précise pour le télégraphe musical s'il est considéré comme un instrument acoustique¹⁶. De plus, cette approche supprime l'intérêt du télégraphe musical en faisant abstraction de la transmission du signal par des lignes téléphoniques.

4.2.3 Classification du telharmonium

Le telharmonium génère des sons en employant des roues phoniques. Ces roues phoniques sont mécaniques et comprennent chacune des roues dentées, dont le motif (angl. *pattern*) détermine la forme d'onde et la fréquence du signal électrique alternatif produit. Pour cette raison, le telharmonium se range dans la classe [521] au côté de l'orgue Hammond.

Entre l'orgue Hammond et le telharmonium, le son est bien produit de façon analogue. Toutefois, le telharmonium présente des dimensions bien plus colossales que celles de l'orgue Hammond et consomme une puissance électrique plus importante. Un système de classification optimal devrait être capable de signaler ce genre de différences entre deux instruments pratiquement identiques.

4.2.4 Classification du thérémine

Dans le système MIMO, le thérémine est mentionné comme exemple pour la sous-classe [531.1]. Il s'agit en effet d'un instrument électronique dont le principe de fonctionnement repose sur des circuits analogiques [53] et il s'agit d'un synthétiseur qui utilise des tubes à vide pour produire et traiter un signal électrique [531.1]. Paradoxalement, il existe dans le système MIMO une sous-classe qui spécifie l'emploi d'oscillateurs à fréquence de battement et de systèmes hétérodynes [533.11], mais le thérémine n'est pas renseigné dedans.

L'entretien réalisé avec Maarten Quanten a permis de lever l'ambiguïté sur la classification du thérémine. La sous-classe [531] désigne des synthétiseurs dans leur totalité. Dans cette classe, l'instrument est considéré comme un tout, ce qui est le cas du thérémine. La sous-classe [533] désigne des modules séparés qui conçoivent un instrument électronique lorsqu'ils sont agencés ensemble de façon modulaire. La section 4.5.1 décrit comment les sous-classes des électrophones peuvent être employées au sein d'un système de classification modulaire.

¹⁶Nous faisons l'hypothèse que le terme exact serait *electromagnetically driven lamellophones*.

Mentionnons que le circuit d'un thérémine peut aussi être réalisé en utilisant des transistors¹⁷. Dans ce cas, le thérémine se range dans la classe [531.2].

4.2.5 Résumé des classifications

Le tableau 1 regroupe les résultats de classification des instruments de musique étudiés. Ce tableau illustre aussi les différentes possibilités de classification évoquées en filigrane de la section 4.2.

Instrument	Classe proposée	Autres possibilités cohérentes
Clavecin électrique	[111.242.22]	[511] ou [52]
Télégraphe musical	[511]	[12]
Telharmonium	[521]	aucune
Thérémine	[531.1]	[533.11] ou [531.2]

Tableau 1: Résumé de la classification des instruments étudiés comme cas d'étude. Les classes proposées paraissent les plus appropriées. Les autres possibilités rappellent les classes avec lesquelles une ambiguïté de classification pourrait subsister.

4.3 Difficultés rencontrées dans la classification des cas d'étude et suggestions d'amélioration

Cette section présente des suggestions d'amélioration pour le système MIMO sur la base de la section 4.2 de ce chapitre.

4.3.1 Analyse de la classification du clavecin électrique

Selon le système MIMO, le clavecin électrique n'est pas un électrophone parce qu'il ne produit pas un signal électrique transmis à un haut-parleur. Cela signifie que tous les instruments employant de l'électricité pour provoquer la mise en vibration d'un objet sonore acoustique ne sont pas des électrophones. Dans ce cas, le clavecin magnétique (inventé par Pierre Bertholon de Saint-Lazare en 1785¹⁸) et le piano électromécanique (inventé par Matthias Hipp en 1867¹⁹) sont aussi des instruments «uniquement» acoustiques. Classifier le clavecin électrique aux côtés d'un carillon conventionnel n'est pas dénué de sens, mais fait totalement abstraction de

¹⁷Un transistor est un dispositif semi-conducteur permettant d'amplifier, de contrôler et de générer des signaux électriques. Il est inventé en 1947-48 et remplace progressivement le tube à vide dans de nombreuses applications vers la fin des années 1950. RIORDAN Michael, «Transistor. Electronics», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/technology/transistor> (page consultée le 4 août 2022).

¹⁸Voir BERTHOLON Pierre, «Du Clavecin magnétique. Par M. l'Abbé Bertholon», dans *La nature considérée sous ses différents aspects ou Journal d'histoire naturelle*, vol. 9 (1789), p. 321-332.

¹⁹Voir DAVIES Hugh, «Electronic Instruments», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000008694?rskey=DPPimW&result=1> (page consultée le 3 mai 2022).

son principe de fonctionnement. Il pourrait être avantageux d'intégrer un suffixe au code de classification conventionnel pour indiquer qu'un principe d'électricité est employé au sein de l'instrument. Naturellement, ce suffixe ne serait pas requis pour les électrophones dont nous savons déjà qu'ils utilisent de l'électricité. Pour éviter toute confusion avec les codes chiffrés déjà employés, ce suffixe pourrait être une lettre. La figure 4.1 illustre de façon simplifiée l'emploi d'un tel suffixe.

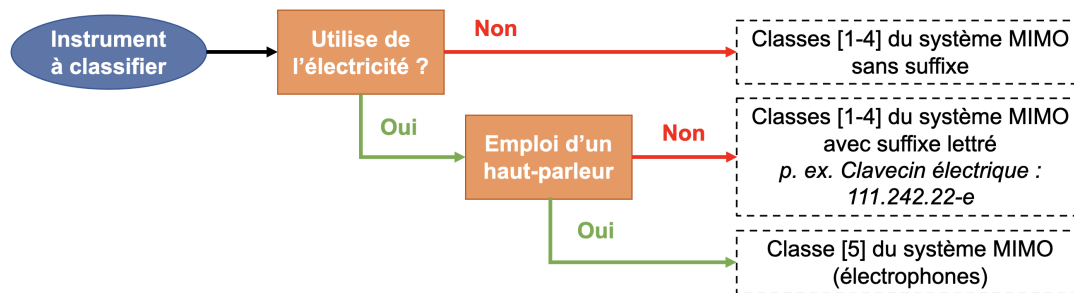


Figure 4.1: Illustration de l'emploi d'un suffixe pour informer qu'un principe d'électricité est employé au sein de l'instrument étudié.

Mentionnons que les instruments acoustiques amplifiés au moyen d'un transducteur et d'un haut-parleur, mais qui n'ont pas été modifiés structurellement sont classés dans les catégories [1-4] avec l'ajout d'un suffixe chiffré, conformément à la description fournie par le système MIMO²⁰.

4.3.2 Analyse de la classification du télégraphe musical

La description de la classe [511] semble appropriée pour le télégraphe musical. Classer le télégraphe musical au côté d'un piano électrique Rhodes²¹ nous paraît cohérent, car tous deux sont des idiophones électroacoustiques. Toutefois, il serait pertinent de considérer des subdivisions complémentaires au sein de cette classe avec des nuances semblables à celles proposées pour la classe [1] des idiophones. Nous pourrions envisager une première sous-classe [511.1] décrivant les idiophones électroacoustiques frappés directement (p. ex. pour le piano électrique Rhodes) et une seconde sous-classe [511.2] décrivant les lamellophones électroacoustiques actionnés indirectement (p. ex. pour le télégraphe musical).

Cette remarque s'applique également à la sous-classe [513] des cordophones électroacoustiques. Avec le système MIMO actuel, un piano à queue électrique Neo-Bechstein est classé au côté d'une guitare électrique. Afin de différencier ces deux instruments, il pourrait être intéressant d'intégrer deux sous-classes [513.1] et [513.2] faisant une distinction analogue à celle qui existe entre les classes [31] et [32].

²⁰Voir *MIMO H-S classification*, «Revision of the Hornbostel-Sachs Classification of Musical Instruments by the MIMO Consortium» (PDF), p. 3, <http://www.mimo-international.com/documents/hornbostel%20sachs.pdf> (page consultée le 28 juin 2022).

²¹Le son du piano électrique Rhodes est généré en frappant une petite lamelle métallique dont le son est capté par un micro (angl. *pickup*), traité, puis amplifié. Voir FALAIZE Antoine, «Simulation of the Fender Rhodes», dans *Synthèse sonore et systèmes hamiltoniens* (en ligne), <http://recherche.ircam.fr/anasy/falaize/fr/applis/rhodes/> (page consultée le 28 juin 2022).

4.3.3 Analyse de la classification du telharmonium

Classer le telharmonium dans le système MIMO n'est pas problématique, car nous observons une similitude évidente entre son principe de fonctionnement et celui d'un orgue Hammond, qui est renseigné comme exemple dans la classe [521].

Toutefois, les deux instruments sont bien distincts en ce qui concerne leurs proportions (dimensions, consommation de puissance électrique, poids, etc.). Pour faire une distinction pratique entre ces deux instruments électromécaniques, une possibilité serait de considérer la présence ou l'absence de dispositifs amplificateurs comme paramètre de classification²². De cette manière, au sein de la classe [521], une première sous-classe [521.1] décrirait les instruments électromécaniques dont les signaux électriques sont amplifiés (p. ex. l'orgue Hammond) et une seconde sous-classe [521.2] décrirait les électrophones électromécaniques dont les signaux électriques ne sont pas amplifiés (p. ex. le telharmonium).

4.3.4 Analyse de la classification du thérémine

Le thérémine est cité comme exemple dans la sous-classe [531.1]. Aucun doute ne peut subsister quant à sa classification dans le système MIMO.

Une possibilité d'amélioration pour la classification des instruments électroniques analogiques serait de systématiquement distinguer les circuits analogiques basés sur des transistors de ceux basés sur des tubes à vide. En effet, les fonctions électroniques reprises par les classes [532-533] peuvent être aussi bien réalisées par des transistors que des tubes à vide. De plus, si le choix entre ces deux dispositifs est disponible dans chaque sous-classe, il serait cohérent de l'envisager comme critère pour des classes plus macroscopiques dans l'arborescence (voir figure 4.2). Cependant, cette suggestion présente un désavantage. En effet, un même instrument (p. ex. le thérémine) se trouverait dans des classes différentes éloignées en fonction des dispositifs amplificateurs avec lesquels il a été conçu. Ce problème se pose déjà dans le système MIMO, mais les deux classes possibles sont très proches (voir section 4.2.4).

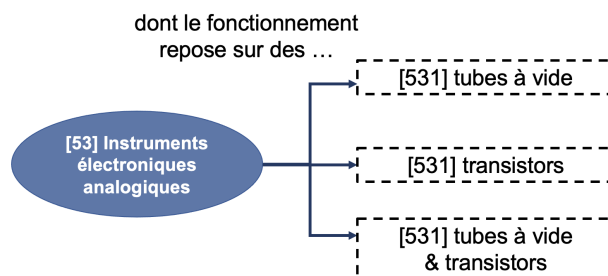


Figure 4.2: Possibilité de subdivision de la classe [53] sur la base du type de dispositif amplificateur. Mentionnons que cette logique pourrait être également appliquée sous la forme d'un suffixe adjoint aux codes de classification.

²²Nous avons vu dans le chapitre précédent que la présence ou l'absence de dispositifs amplificateurs au sein d'un instrument a des impacts importants sur sa topologie, ses dimensions et sa consommation de puissance.

4.4 Difficultés de fond rencontrées dans la classification des électrophones

Le système Hornbostel-Sachs rencontre des obstacles évidents lorsqu'il s'agit de classer les électrophones. En effet, le principe de fonctionnement des électrophones remet en question le critère fondamental sur lequel ce système est construit, c'est-à-dire la nature de l'élément vibrant de l'instrument. Dans le cas des électrophones, des instruments distincts peuvent utiliser des haut-parleurs similaires. Considérons une guitare électrique et un piano électrique Wurlitzer connectés à un même haut-parleur. Si le critère de mise en vibration est appliqué, les deux instruments se rangent dans une catégorie identique, celle des membranophones. Le critère initial de Hornbostel-Sachs ne permet donc pas de retrouver deux instruments distincts écartés l'un de l'autre dans l'arborescence du système hiérarchique.

Pour pallier ce problème, le système MIMO se concentre sur la génération du signal électrique qui précède la conversion en ondes acoustiques. Toutefois, ce critère demeure insuffisant. En effet, prenons l'exemple de deux synthétiseurs en tout point identiques²³, mais dont les oscillateurs diffèrent, ceux-ci seront rangés dans des classes différentes malgré leurs nombreuses similitudes.

Un autre problème est le manque de corrélation entre la forme physique d'un électrophone et le son qu'il produit. L'électricité dissocie la forme de l'instrument du son qu'il produit, puisque la génération du signal n'a pas lieu dans le domaine acoustique, mais le domaine électrique.

La complexité supplémentaire apportée par l'utilisation de principes d'électricité ou de circuits électroniques ne peut pas être assimilée à un système hiérarchique, car les instruments électrophoniques sont modulaires par essence. La section 4.5.1 discute la possibilité d'établir un système modulaire pour la classification des électrophones.

²³Ces similitudes se marquent principalement dans la chaîne de conditionnement du son. Par exemple : le traitement de l'enveloppe, les filtres, les *mixers*, les *low frequency oscillators* (LFO), la saturation ajoutée, etc.

4.5 Systèmes alternatifs de classification

Comme explicité dans la section 4.4, un système hiérarchique ne convient pas à la classification des électrophones. La section 4.5.1 présente un système de classification qui étudie les électrophones comme un agencement de différents modules. Ce système a été développé par Maarten Quanten dans un article intitulé *Rethinking Musical Instrument Classification: Towards a Modular Approach to the Hornbostel-Sachs System*²⁴. La section 4.5.2 aborde brièvement comment un système de classification idéal devrait être construit selon nous²⁵.

4.5.1 Système de classification modulaire

En 2010, Maarten Quanten tente de formaliser la classe des électrophones dans Hornbostel-Sachs pour le projet MIMO. Sur la base de cette recherche, il conclut que la nature modulaire des électrophones contredit l'organisation hiérarchique du système Hornbostel-Sachs. Il existe en effet des topologies électroniques et hybrides qui ne peuvent pas être représentées dans une structure arborescente. De nombreux électrophones sont plutôt des assemblages qui fonctionnent conformément aux spécifications de leurs composants, de leurs mécanismes de connexion et des commandes qu'ils peuvent recevoir²⁶.

Employer une démarche de classification modulaire permet d'effectuer des liens plus pertinents entre deux électrophones semblables. Par exemple, un piano électrique peut avoir plus de points communs avec un synthétiseur que deux synthétiseurs entre eux. Ces points communs comprennent par exemple la présence de filtres, de générateurs sinusoïdaux, de modulateurs en anneau, etc.

En utilisant la catégorie des modules [533] déjà présente dans le système MIMO, nous pouvons incorporer cette logique modulaire dans la classification. Avec des symboles comme +, * et = nous pouvons décrire un électrophone complexe comme l'agencement de différents modules moins compliqués. Le code devient ainsi plus long, mais aussi plus précis. Il est facile d'utiliser ce système pour différencier les configurations de synthétiseurs sans avoir à quitter Hornbostel-Sachs²⁷.

Par exemple, l'*EMS Synthesi 100* peut être décrit assez simplement comme un synthétiseur [523.1] ou bien de façon plus complète comme un assemblage de plusieurs modules, dont douze (*12) oscillateurs (511.1), deux (*2) générateurs de bruit (511.2), quatre (*4) filtres passe-haut (512.11), quatre (*4) filtres passe-bas (512.12), un filtre passe-bande (512.13), seize (*16) amplificateurs (512.2), deux (*2) modificateurs de réverbération (512.3), trois (*3) modulateurs en anneau (513.2), trois (*3) générateurs d'enveloppe (514.12), un séquenceur

²⁴WEISSER Stephanie et QUANTEN Maarten, «Rethinking Musical Instrument Classification: Towards a Modular Approach to the Hornbostel-Sachs System», dans *Yearbook for Traditional Music*, vol. 43/2 (2011), p. 122-146.

²⁵Aucun système de classification n'est à proprement parler idéal. Cependant, nous osons croire que le système abordé permettrait de se libérer de nombreuses contraintes associées à Hornbostel-Sachs.

²⁶WEISSER Stephanie et QUANTEN Maarten, «Rethinking Musical Instrument Classification: Towards a Modular Approach to the Hornbostel-Sachs System», op. cit., p. 137.

²⁷Ibid., p. 138.

(514.13), un générateur de tension aléatoire (514.15), deux (*2) suiveurs d'enveloppe (514.16), deux (*2) *slew limiter* (514.18), deux (*2) claviers (514.21) et un convertisseur de tension *pitch-to-control* (516.1). Le code de classification de l'*EMS Synthesi 100* devient : $523.1 = 511.1*12 + 511.2*2 + 512.11*4 + 512.12*4 + 512.13 + 512.2*16 + 512.3*2 + 513.2*3 + 514.12*3 + 514.13 + 514.15 + 514.16*2 + 514.18*2 + 514.21*2 + 516.1$ ²⁸.

L'exemple est ici donné pour un instrument électronique analogique, mais il est tout à fait concevable d'imaginer un système de classification modulaire pour tous les électrophones²⁹

4.5.2 Proposition d'un système de classification «idéal»

Chaque musicologue a sa propre idée du système de classification idéal, c'est pourquoi le commentaire fourni dans cette section est avant tout théorique. Nous qualifions d'idéal un système de classification capable de regrouper (resp. d'éloigner) des électrophones similaires (resp. distincts) sur la base d'un code chiffré ou d'un critère quantitatif.

Un tel système considérerait théoriquement toutes les caractéristiques d'un électrophone. Élaborer un système de classification sur la seule base de la génération du signal peut s'avérer en effet limité (voir sections 4.4 et 4.5.1). Les autres caractéristiques sur lesquelles il serait possible de se baser sont par exemple : l'origine géographique et culturelle de l'instrument, sa taille, son poids, le nombre et le type des différents modules qui le constituent, la façon dont il est joué, s'il est amplifié ou non, s'il est autonome, si l'interface utilisée est dépendante ou indépendante du son qu'il produit (p. ex. clavier MIDI), etc.

Considérons un ensemble de M électrophones. N caractéristiques sont associées à chaque instrument. En quantifiant chaque caractéristique via des méthodes d'encodage appropriées, il serait théoriquement possible d'employer des techniques de réduction de la dimensionnalité³⁰ pour attribuer un code de longueur K à chaque électrophone, avec $K < N$ ³¹. Ce code correspondrait ainsi aux coordonnées d'un point dans un espace à K dimensions dans lequel tous les instruments seraient disposés. Deux instruments avec des caractéristiques proches auraient des coordonnées proches l'une de l'autre dans l'espace à K dimensions (la distance euclidienne les séparant serait faible).

Le premier avantage de ce système de classification est qu'il définirait les instruments de musique relativement les uns par rapport aux autres dans un espace et pas de façon absolue dans des catégories excluanes. Le second avantage serait la réduction de la longueur du code chiffré par rapport à la classification modulaire proposée dans la section 4.5.1. Un inconvénient serait toutefois la perte de l'interprétabilité du code.

²⁸Ibid., p. 139.

²⁹Par exemple le telharmonium pourrait être perçu comme l'assemblage dynamos et de filtres.

³⁰Ce type de techniques vise à préserver autant que possible la géométrie de données de haute dimension (dans notre cas, les caractéristiques des électrophones) dans un nombre de dimensions restreint. Voir VIKRAM Mandikal e. a., «Performance Evaluation of Dimensionality Reduction Techniques on High Dimensional Data», dans *3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics*, 2019, p. 1169-1174, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8862526> (page consultée le 18 juillet 2022).

³¹Les éléments de ce code appartiendraient en toute généralité à l'ensemble des nombres réels.

4.6 Réorganisation de la catégorie des électrophones dans le système MIMO

La section précédente est d'ordre théorique, mais ne contribue pas à perfectionner le système MIMO utilisé par de nombreux musicologues en pratique. Pour que les apports de ce chapitre soient d'ordre théorique et pratique, cette section suggère une nouvelle organisation des classes principales au sein de la famille des électrophones dans le système MIMO.

Cette réorganisation aboutit à un agencement plus cohérent des électrophones sans demander de redéfinitions des classes principales ni de changements de fond. Elle ne se penche donc pas sur les obstacles de classification (abordés précédemment) associés au système hiérarchique qui demanderaient des révisions de fond du système MIMO. Au contraire, les propositions de cette section visent plutôt à accentuer la hiérarchie dans la catégorie des électrophones, pour s'inscrire dans une logique cohérente avec celle de Hornbostel-Sachs. À première vue, il semble inapproprié d'exacerber une logique critiquée par les sections 4.5.1 et 4.5.2. Toutefois, une classification hiérarchique ne pose problème que lorsque la définition d'une classe ne correspond que partiellement à un instrument et exclut d'autres définitions.

Dans ce nouveau système, les électrophones sont divisés en trois classes principales plutôt que six. Nous regroupons les instruments électroniques [51]³² - basés sur des valves thermioniques (tubes à vide) ou des semi-conducteurs - et les distinguons des électrophones qui emploient des mécanismes oscillants pour générer un courant alternatif [52]³³. Au sein de la nouvelle classe principale [51], nous retrouvons les sous-classes [53-55] du système MIMO. La nouvelle classe [52] regroupe quant à elle les classes [51-52] du système MIMO, c'est-à-dire les instruments électroacoustiques et électromécaniques. L'avantage d'un tel regroupement est une division plus progressive de l'arborescence du système hiérarchique, ce qui facilite la démarche de classification. La réorganisation proposée considère également les logiciels [53]³⁴ comme une classe principale des électrophones³⁵, car leur principe de fonctionnement repose sur l'exécution

³²Dans le cadre de ce chapitre, les numéros de classification en italique désignent une proposition de classification et non la classification actuelle dans le système MIMO.

³³Précisons que les électrophones qui emploient des mécanismes oscillants possèdent inévitablement des dispositifs électroniques pour moduler ou amplifier le signal électrique produit. Cependant, ceux-ci ne peuvent pas être considérés seulement comme des instruments exclusivement électroniques, car le mécanisme oscillatoire est essentiellement responsable de la génération du son.

³⁴Parmi ces programmes de musique informatique, nous retrouvons par exemple des *Virtual Studio Technology* (VST). Il s'agit d'une interface logicielle permettant d'intégrer des synthétiseurs virtuels et des unités d'effets dans des stations de travail audio numériques. Voir SMITH Brandon, «Virtual Instrument [software synthesizer]», dans *Oxford Music Online*, <https://doi.org/10.1093/gmo/9781561592630.article.L2295003> (page consultée le 17 juillet 2022).

³⁵La présence de cette classe peut être discutée. Une première option pourrait être de considérer les logiciels comme une simple émulation d'instruments existants. Il suffirait alors de classer les instruments émulés dans le système MIMO conventionnel en ajoutant un suffixe indiquant que l'instrument est une émulation. Une autre possibilité consisterait à ranger les logiciels dans la classe des instruments électroniques numériques étant donné que le processeur qui exécute les lignes de code des logiciels est composé de circuits numériques. Aucune solution idéale n'existe dans l'absolu. Nous estimons néanmoins que considérer les logiciels comme une classe principale au sein des électrophones permet de placer des instruments analogues à proximité suffisante dans l'arborescence du système MIMO.

de lignes de code informatique au sein d'un microprocesseur, ce qui diffère fondamentalement des deux classes précédentes. De plus, nous proposons l'ajout d'une nouvelle sous-classe [532] consacrée aux logiciels d'intelligence artificielle (composant des œuvres musicales sans l'intervention d'un interprète en temps réel).

La figure 4.3 illustre visuellement la classification des électrophones au sein du système MIMO et la figure 4.4 illustre la réorganisation proposée.

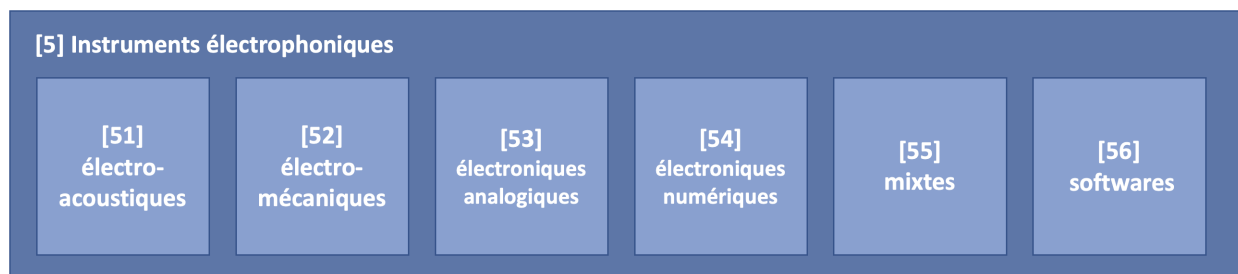


Figure 4.3: Structure de la catégorie des électrophones dans le système MIMO actuel.

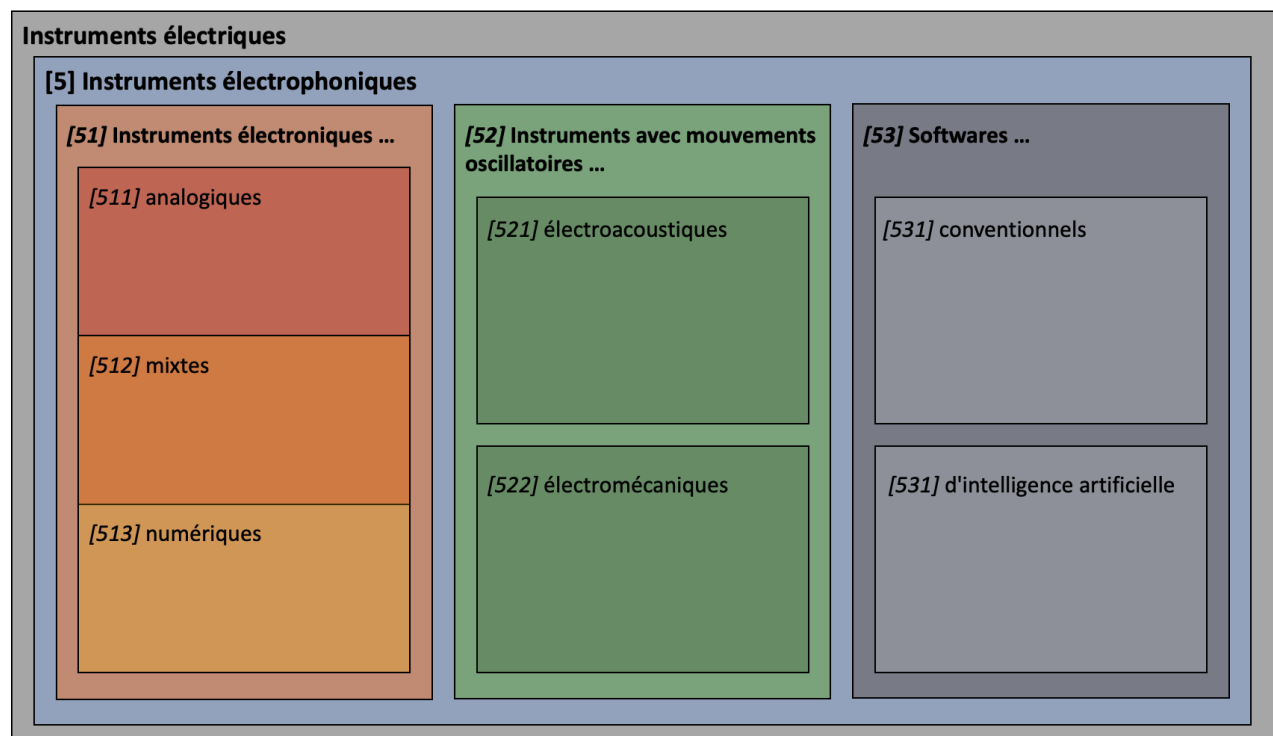


Figure 4.4: Réorganisation proposée de la catégorie des électrophones. Dans la zone grisée (hors des électrophones) se trouvent les instruments comme le clavier électrique qui emploient un principe d'électricité pour provoquer la mise en vibration d'un objet sonore acoustique. Ces instruments se classent dans les catégories [1-4], mais il pourrait être intéressant de considérer l'ajout d'un suffixe indiquant l'emploi d'un principe d'électricité (voir section 4.3.1). Comme le système a été réarrangé, les codes chiffrés pour chaque sous-classe diffèrent par rapport au système MIMO.

Chapitre 5

Conclusion

Ce travail avait, dans un premier temps, pour ambition d'étudier le premier instrument électrique et les premiers électrophones sur un plan historique et technique afin d'expliquer l'intervalle de temps entre l'émergence des premiers électrophones et l'utilisation d'électrophones comme outils de création musicale durant la seconde moitié du XXe siècle. Dans un second temps, sur la base de l'analyse technique susmentionnée, ce travail avait pour objectif de suggérer des améliorations pour la catégorie des électrophones dans la version MIMO du système Hornbostel-Sachs.

Notre analyse du premier instrument électrique et des premiers électrophones a pris la forme d'une étude de cas. Quatre instruments ont été sélectionnés en fonction d'un critère de pertinence, à savoir le progrès technique qu'ils ont apporté dans l'histoire de la musique. Étudier rigoureusement le principe de fonctionnement de chaque cas nous a permis de mettre en lumière que l'évolution des premiers électrophones était indissociable des progrès réalisés en téléphonie vers la fin du XIXe siècle et de l'invention de l'audion en 1906. Cette approche technique nous a en outre aidés à illustrer que les contraintes technologiques rencontrées avant l'amplification électrique, c'est-à-dire avant l'invention de l'audion, ont sérieusement freiné les inventeurs dans la conception d'instruments conciliant une faible consommation de puissance électrique, une production de sons harmonieux et des dimensions acceptables.

L'approche historique menée dans cette étude de cas nous a fait comprendre que les premiers électrophones étaient plutôt considérés comme des curiosités intellectuelles que des instruments de musique. Au lieu de créer de nouveaux titres, ils reprenaient des titres existants. Ce dernier constat ne s'applique pas au thérémine et à la génération d'électrophones qui lui succède. En effet, des compositions originales ont été écrites pour ces électrophones, mais en quantité limitée.

Afin de proposer une réponse holistique à la question de recherche, nous avons ensuite étudié le contexte artistique et historique qui a vu émerger les premiers électrophones. Cette étude a pris la forme d'une analyse des courants musicaux qui ont traversé la première moitié du XXe siècle. Nous avons conclu premièrement que les compositeurs du début du XXe siècle utilisaient pour la plupart des moyens de composition similaires aux courants musicaux qui les avaient précédés (instruments acoustiques), car l'innovation était focalisée

sur le langage musical. Deuxièmement, nous avons formulé l'hypothèse que les électrophones, notamment ceux avant le thérémine, limitaient l'expression de la virtuosité des musiciens. Or, cette forme d'expression était importante pour qu'ils s'illustrent auprès du public et de leurs pairs. Troisièmement, les timbres des premiers électrophones n'étaient pas en adéquation avec l'esthétique de la plupart des courants de musique dite «populaire» qui leur étaient contemporains. Toutefois, des instruments comme le thérémine, les ondes Martenot ou le trautonium ont réussi à susciter l'attention de certains compositeurs de musique dite «savante» qui étaient à la recherche de nouveaux moyens de composition pour affirmer leur identité musicale. Nous avons aussi fait l'hypothèse que les circonstances politiques et économiques vers le début du XXe siècle avaient compliqué l'accès aux premiers électrophones. Finalement, nous justifions l'absence presque totale des électrophones dans les courants de musique dite «populaire» dans la première moitié du XXe siècle par leur coût trop élevé. Les registres dits «populaires» au XXe siècle sont caractérisés par des instruments peu onéreux et facilement transportables, ce qui était indispensable pour les musiciens itinérants. Cependant, les premiers électrophones étaient des instruments plutôt coûteux. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer le prix du thérémine lors de sa production en masse par la *Radio Corporation of America* (RCA).

Ce travail a classifié les électrophones abordés comme cas d'étude dans Hornbostel-Sachs. Sur la base de cette classification, nous avons proposé des pistes d'amélioration pratiques. Pour obtenir à la fois un système plus complet et plus cohérent, ces améliorations ont consisté respectivement en l'ajout de sous-classes et en la réorganisation des classes principales. Sur la base d'un entretien avec le musicologue Maarten Quanten, nous avons discuté et proposé des systèmes de classification théoriques plus adaptés à la catégorie des électrophones. Le premier système théorique est modulaire et a déjà été abordé dans la littérature. L'autre système, qualifié d'«idéal», repose sur une réduction de la dimensionnalité et présente une classification originale dans la littérature.

Ce travail ouvre de nombreuses possibilités de recherches. En effet, nous avons insisté sur le fait que des électrophones avaient été utilisés comme outils de composition à partir des années 1930, mais dans des proportions très limitées. Une première question de recherche pourrait tenter d'affirmer (ou de réfuter) formellement que ces compositions pour électrophones étaient bien anecdotiques dans la carrière de leur compositeur. Dans le même ordre d'idée, une seconde question pourrait également étudier l'influence de ces compositions pour électrophones sur des œuvres postérieures dans l'histoire de la musique.

Une tout autre piste pourrait s'intéresser plus généralement aux intervalles de temps qui séparent l'apparition de technologies de leur assimilation à la musique. Sommes-nous en 2022 au cœur d'un tel intervalle situé entre l'évolution fulgurante des logiciels d'intelligence artificielle depuis le début du XXIe siècle et leur adoption comme outils de création musicale ?

Bibliographie

Références pour les études historiques des premiers électrophones

BAKER Ray Stannard, «A Wonderful New Musical Instrument», dans *McClure's Magazine*, New York, 1^{er} août 1906.

Britannica, «Elisha Gray. American inventor», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/biography/Elisha-Gray> (page consultée le 18 juin 2022).

CAMPBELL Murray, «Helmholtz resonator», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000046588?&mediaType=Article> (page consultée le 2 juillet 2022).

DAVIES Hugh, «Denis d'or [goldene Dionys]», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000047638> (page consultée le 14 juin 2022).

DAVIES Hugh, «Hammond Organ», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-000012289> (page consultée le 3 juillet 2022).

DE FOREST Lee, *Father of Radio*, Chicago, Wilcox & Follett Co., 1950, p. 331-332.

DELABORDE Jean-Baptiste, *Le clavessin électrique avec une nouvelle théorie du mécanisme et des phénomènes de l'électricité*, Paris, H.L. Guerin & L.F. Delatour, 1761.

DONHAUSER Peter, *Elektrische Klangmaschinen. Die Pionierzeit in Deutschland und Österreich*, Weimar, Böhlau, 2007, p. 25.

FIELDING Raymond E., «Lee de Forest. American Inventor», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/biography/Lee-de-Forest> (page consultée le 4 juillet 2022).

FORREST D. Pass, «Fessenden, Reginald Aubrey», dans *Dictionnaire biographique du Canada* (en ligne), vol. 16, Université Laval/University of Toronto, 2003, http://www.biographi.ca/fr/bio/fessenden_reginald_aubrey_16F.html (page consultée le 11 juillet 2022).

FROESCHLÉ-CHOPARD Marie-Hélène et FROESCHLÉ Michel, «Sciences et arts dans les Mémoires de Trévoux», dans *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 2001, p. 30-49, <https://www.researchgate.net/journal/Revue-dhistoire-Moderne-et-Contemporaine-0048-8003> (page consultée le 16 juin 2022).

GALEYEV Bulat M., «Light and Shadows of a Great Life: In Commemoration of the One-Hundredth Anniversary of the Birth of Leon Theremin, Pioneer of Electronic Art», dans *Leonardo Music Journal*, vol. 6 (1996), p. 47.

GLINSKY Albert, *Theremin. Ether Music and Espionage*, s.l., Université de l'Illinois, 2005.

Harvard Brain Tour, «Helmholtz Sound Synthesizer», <https://braintour.harvard.edu/archives/portfolio-items/helmholtz-sound-synthesizer> (page consultée le 2 juillet 2022).

HOLMES Thom, *Electronic and Experimental Music: Technology, Music, and Culture*, 4^e éd., New York, Routledge, 2012, p. 46.

LAVOISY Olivier, «Invention du téléphone», dans *Encyclopædia Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/invention-du-telephone/> (page consultée le 18 juin 2022).

LEROY Michel, *Le mythe jésuite. De Béranger à Michelet*, Paris, Presses Universitaires de France, 1992.

MERRITT Frederic, «La Borde [Delaborde], Jean-Baptiste (Thillaie) [Thillais, Thillaès] de», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000015759> (page consultée le 17 juin 2022).

MICHIELS Marie, «Alexander Graham Bell, l'inventeur du téléphone, est mort il y a 100 ans», dans *rtbf* (en ligne), <https://www.rtbf.be/article/alexander-graham-bell-linventeur-du-telephone-est-mort-il-y-a-100-ans-10948597> (page consultée le 19 juin 2022).

MIESSNER Benjamin F., «Electronic Music and Instruments», dans *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 24/11 (1936), p. 1427-1463, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1686031> (page consultée le 3 juillet 2022).

MONTAGUE Stephen, «Termen, Lev Sergeyevich», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000045834> (page consultée le 9 juillet 2022).

Musician Biographies, «Leon Theremin Biography», <https://musicianguide.com/biographies/1608000933/Leon-Theremin.html> (page consultée le 9 juillet 2022).

NIKITIN Pavel, «Leon Theremin (Lev Termen)», dans *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54/5 (2012), p. 252-257.

OWEN Barbara, «Reed Organ», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000043321> (page consultée le 18 juin 2022).

PIRE Bernard, «Nollet Jean Antoine (1700-1770)», dans *Encyclopædia Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/jean-antoine-nollet/> (page consultée le 16 juin 2022).

RICHTER Felix, «The World's Favorite Music Genres», dans *Statista* (en ligne), 2018, <https://www.statista.com/chart/15763/most-popular-music-genres-worldwide/> (page consultée le 28 juillet 2022).

SACHS Curt, *Real-Lexikon der Musikinstrumente. zugleich ein Polyglossar fuer das gesamte Instrumentengebiet*, Berlin, J. Bard, 1913, p. 108.

SCHONBERG Harold C., «Music: Leon Theremin; Inventor of Instrument Bearing His Name Is Interviewed in the Soviet Union», dans *The New York Times*, New York, 26 avril 1906, p. 40.

SITTER Peer, «Das Denis d'or: Urahn der elektroakustischen Musikinstrumente?», dans *Perspektiven und Methoden einer Systemischen Musikwissenschaft: Bericht über das Kolloquium im Musikwissenschaftlichen Institut der Universität zu Köln 1998*, Frankfurt am Main, Peter Lang, 2003, p. 303-305.

STOCK Jonathan P. J., «Alexander J. Ellis and His Place in the History of Ethnomusicology», dans *Ethnomusicology*, vol. 51/2 (2007), p. 306-325, <http://www.jstor.org/stable/20174527> (page consultée le 2 juillet 2022).

TEAGLE John, «Antique Guitar Amps 1928-1934. Which Came First - Electric Guitar or Amp?», dans *Vintage Guitar Magazine* (en ligne), <https://www.vintageguitar.com/1804/antique-guitar-amps-1928-1934/> (page consultée le 30 juin 2022).

Telharmonium Historical Documents, «A Chronological Archive of Letters, Booklets, Programs, Clippings, and Writings on the Telharmonium», <https://magneticmusic.ws/telharmonium%20hist.htm> (page consultée le 3 juillet 2022).

The New York Times Archives, «Music by Telegraph», dans *The New York Times* (en ligne), New York, 10 juillet 1874. <https://www.nytimes.com/1874/07/10/archives/telegraphy-new-inventions-in-the-science-of-electrical-transmission.html> (page consultée le 4 août 2022).

TORLAIS Jean, «Qui a Inventé La Bouteille de Leyde?», dans *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, vol. 16/3 (1963), p. 211–19.

VON HELMHOLTZ Hermann, *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music. Theory of Music*, 4^e éd., trad. de l'allemand par Alexander John Ellis, New York, Dover Publications, 1885.

WEIDENAAR Reynold, *Magic Music from the Telharmonium*, Metuchen New Jersey, The Scarecrow Press, 1995.

120 Years of Electronic Music, «The Clavecin Magnetique. M. l'Abbé Bertholon. France, 1785», <https://120years.net/wordpress/the-clavecin-magnetique-m-labbe-bertholon-france-1785/> (page consultée le 18 juin 2022).

120 Years of Electronic Music, «The Musical Telegraph or Electro-Harmonic Telegraph, Elisha Gray. USA, 1874», <https://120years.net/wordpress/the-musical-telegraph-elisha-greyusa1876/> (page consultée le 19 juin 2022).

120 Years of Electronic Music, «The 'Telharmonium' or 'Dynamophone' Thaddeus Cahill, USA 1897», <https://120years.net/wordpress/the-telharmonium-thaddeus-cahill-usa-1897/> (page consultée le 2 juillet 2022).

120 Years of Electronic Music, «The 'Theremin' or 'Thereminvox'. Leon (or Lev) Sergeivitch Termen, Russia. 1922», <https://120years.net/wordpress/the-thereminleon-termensoviet-union1922/> (page consultée le 6 juillet 2022).

Références techniques de ce travail

Britannica, «Telecommunication. Multiplexing», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/technology/telecommunication/Multiplexing> (page consultée le 19 juin 2022).

Cadence, PCB Design & Analysis, «What is Resonant Frequency?», <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2021-what-is-resonant-frequency> (page consultée le 7 juillet 2022).

CAHILL Thaddeus, *Art Of and Appartus For Generating and Distributing Music Electrically*, U.S. Patent Application Ser. No. 580,035, 1897, <https://patentimages.storage.googleapis.com/d8/63/b2/7644905570595a/US580035.pdf> (page consultée le 4 juillet 2022).

DUBOIS Marc, *Contrôle des ondes de flexion dans les plaques*, Paris, Université Paris-Diderot, 2014, p. 132.

GRAY Elisha, *Electrical Telegraph for Transmitting Musical Tones*, U.S. Patent Application Ser. No. 166,095, 1875, <https://patentimages.storage.googleapis.com/44/db/59/0c3627a57d1007/US166095.pdf> (page consultée le 19 juin 2022).

GRAY Elisha, *Electrical Telegraph for Transmitting Musical Tones*, U.S. Patent Application Ser. No. 166,096, 1875, <https://patentimages.storage.googleapis.com/df/c4/b0/46c47d0c6aaf59/US166096.pdf> (page consultée le 19 juin 2022).

GRAY Elisha, *Electro-Harmonic Telegraph*, U.S. Patent Application Ser. No. 173,618, 1876, <https://patentimages.storage.googleapis.com/d8/88/70/9380736fed1748/US173618.pdf> (page consultée le 19 juin 2022).

GRAY Elisha, *Improvement in Transmitters for Electro-Harmonic Telegraphs*, U.S. Patent Application Ser. No. 165,728, 1875, <https://patentimages.storage.googleapis.com/73/c7/4d/bf4a221201fc53/US165728.pdf> (page consultée le 19 juin 2022).

HARRIS Sarah L. et HARRIS David Money, *Digital Design and Computer Architecture. ARM Edition*, s.l., Morgan Kaufmann Publishers, 2015, p. 6.

Iowa State University, «Magnetism. Ferromagnetic Materials», dans *Iowa State University* (en ligne), <https://www.nde-ed.org/Physics/Magnetism/index.xhtml> (page consultée le 20 juin 2022).

MIKEROV Alexander G., «From History of Electrical Engineering V: Electron Discovery and its Properties Estimation», dans *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference*, s.l., IEEE, 2016, p. 3-7, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7448102?reload=true> (page consultée le 6 juillet 2022).

SÉGUIN Marc (éd.), DESCHENEAU Julie et TARDIF Benjamin, *Physique XXI - Tome B, Electricité et magnétisme*, s.l., De Boeck, 2010.

THEREMIN Leon S., *Method of and Apparatus for the Generation of Sounds*, U.S. Patent Application Ser. No. 1,661,058A, 1928, <https://patentimages.storage.googleapis.com/06/b7/87/90f175e638a846/US1661058.pdf> (page consultée le 8 juillet 2022).

VEGA Juan Martinez, *Matériaux diélectriques pour le génie électrique - Volume 1*, s.l., Hermès - Lavoisier, 2007.

WARDKIEN Paramote et KITTIPUTE Kunanon, «Discussion on The Physic of The Barkhausen Criteria Based on The Second Order Differential Equation», dans *7th International Electrical Engineering Congress*, 2019, p. 1-4, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8938934> (page consultée le 7 juillet 2022).

Références pour l'étude des courants musicaux de la première moitié du XXe siècle

BEAUMONT Antony, «Busoni, Ferruccio (Dante Michelangelo Benvenuto)» dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000004438> (page consultée le 18 juin 2022).

BILLINGTON Ray Allen (éd.) et FORTEN Charlotte L., *A Free Negro in the Slave Era*, New York, W. W. Norton & Company, 1981.

BOULEZ Pierre, *Nécessité d'une orientation esthétique. Points de repère I: Imaginer*, Paris, Christian Bourgois, 1995, p. 111.

BRAS Jean-Yves, *Les courants musicaux du XXème siècle ou La musique dans tous ses états*, Paris, Papillon, 2003.

Britannica, «Bebop. Jazz», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/bebop> (page consultée le 18 juin 2022).

Britannica, «Blues. Music», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/blues-music> (page consultée le 10 juin 2022).

Britannica, «Great Migration. African-American history», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/event/Great-Migration> (page consultée le 10 juin 2022).

Britannica, «Impressionism. Art», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/Impressionism-art> (page consultée le 22 juin 2022).

Britannica, «Rhythm and blues music», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/rhythm-and-blues> (page consultée le 18 juin 2022).

Britannica, «Tin Pan Alley. Musical history», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/art/Tin-Pan-Alley-musical-history> (page consultée le 10 juin 2022).

BROWN Barclay, «The Noise Instruments of Luigi Russolo», dans *Perspectives of New Music*, vol. 20/(1-2) (1981), p. 31-48.

CHORIER Jean-Paul, «Le dodécaphonisme sériel», dans *Introduction à la musique classique* (en ligne), <https://classic-intro.net/introductionalamusique/vingtieme4-2.html> (page consultée le 18 juin 2022).

DEKOCK Céline, «Jouez du thérémine avec Clara Rockmore grâce à Google Doodle», dans *rtbf* (en ligne), <https://www.rtbef.be/article/jouez-du-theremine-avec-clara-rockmore-grace-a-google-doodle-10495624> (page consultée le 18 juin 2022).

GARRIGUES Juliette, PHILIPPOT Michel, «Atonalité», dans *Encyclopædia Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/atonalite/> (page consultée le 22 juin 2022).

GOUBAULT Christian, *Vocabulaire de la musique à l'aube du XX^e siècle*, Paris, Minerve, 2000.

GRIFFITHS Paul, «Les Six», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000025911>. (page consultée le 16 juin 2022).

Grove Music Online, «Second Viennese School», <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000053872> (page consultée le 23 juin 2022).

HANDY William Christopher, *Father of the Blues: An Autobiography*, éd. par Arna Bontemps, New York, The Macmillan Company, 1941.

Hisour Art Culture Histoire, «Musique du modernisme», <https://www.hisour.com/fr/modernism-music-35882/#> (page consultée le 21 juin 2022).

HOI-NING LEE Thomas, *Evocations of Nature in the Piano Music of Franz Liszt and the Seeds of Impressionism*, thèse de doctorat, Université de Washington, 2016.

ifcen, «Les biais cognitifs - épisode 1 : le biais de confirmation», <https://ifcen.com/2021/07/06/le-biais-de-confirmation/> (page consultée le 12 juin 2022).

JACKSON Gale P., «Rosy, Possum, Morning Star: African American Women's Work and Play Songs», dans *Journal of Black Studies*, vol. 46/8 (2015), p. 779.

KOECHLIN Stéphane, *Le blues*, Paris, Flammarion, 2000, p. 9-14.

JACKSON Travis A. et TUCKER Mark, «Jazz», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000045011> (page consultée le 10 juin 2022).

L'art en théorie, «Art des bruits - Luigi Russolo», <https://theoria.art-zoo.com/fr/art-des-bruits-luigi-russolo/> (page consultée le 19 juin 2022).

LEWIS William Dukes, *Marching to the Beat of a Different Drum: Performance Traditions of Historically Black College and University Marching Bands*, thèse de doctorat, University of North Carolina at Chapel Hill, 2003.

LISTA Giovanni, «Filippo Tommaso Marinetti ou la guerre comme œuvre d'art totale», dans *Inflexions*, vol. 44/2 (2020), p. 111-119, <https://www.cairn.info/revue-inflexions-2020-2-page-111.htm> (page consultée le 17 juin 2022).

LOYER Aurélie, «Prélude à l'après-midi d'un faune. Claude Debussy», dans *Philharmonie de Paris à la demande* (en ligne), <https://pad.philharmoniedeparis.fr/0764467-prelude-a-l-apres-midi-d-un-faune-de-claude-debussy.aspx> (page consultée le 22 juin 2022).

SOLOMOS Makis, «Bruits 'entonnés' et sons 'convenables' : Russolo et Schaeffer ou la domestication des bruits», dans *Filigrane. Musique, esthétique, sciences, société*, n°7 (2008), p. 133-157, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00770151/document> (page consultée le 19 juin 2022).

NEAL Jocelyn R., «Country Music», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-1002224075> (page consultée le 11 juin 2022).

NEIGHBOUR Oliver, «Schoenberg [Schönberg], Arnold (Franz Walter)», dans *Oxford Music Online*, <https://doi.org/10.1093/gmo/9781561592630.article.25024> (page consultée le 22 juin 2022).

PALOMBINI Carlos, «Pierre Schaeffer, 1953: Towards an Experimental Music», dans *Music Letters*, vol. 74/4 (1993), p. 543.

RUSSOLO Luigi, *L'Arte dei rumori*, Milan, Edizioni futuriste di Poesia, 1916, p. 10-11.

SAMSON Jim, «Romanticism», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000023751> (page consultée le 17 juin 2022).

SCHAEFFER Pierre, «Introduction à la musique concrète», dans *Polyphonie : Revue musicale trimestrielle. La musique mécanisée*, 1950, pp. 30-52.

SCHAEFFER Pierre, *Traité des objets musicaux : essai interdisciplines*, Paris, Seuil, 1977.

SCHLESSER Thomas, «Impression, Soleil Levant: enquête sur un chef-oeuvre», dans *Beaux Arts Magazine*, no. 363 (2014), p. 100-105.

SHIBATANI Naomi, *Contrasting Debussy and Ravel: A Stylistic Analysis of Selected Piano Works and Ondine*, thèse de doctorat, Rice University, 2008, p. 3-11.

Spiegato, «Qu'est-ce que la musique néoclassique ?», <https://spiegato.com/fr/quest-ce-que-la-musique-neoclassique> (page consultée le 20 juin 2022).

VARÈSE Edgard, *Écrits*, Paris, Christian Bourgois, 1983, p. 23.

VARÈSE Louise, *Varèse: A Looking-Glass Diary, Vol. 1*, s.l., W. W. Norton & Co Inc, 1972, p. 50.

WHITTALL Arnold, «Neo-classicism», dans *Oxford Music Online*, <https://doi-org.proxy.bib.ucl.ac.be/2443/10.1093/gmo/9781561592630.article.19723> (page consultée le 24 juin 2022).

120 Years of Electronic Music, «The Groupe de Recherches Musicales Pierre Schaeffer, Pierre Henry & Jacques Poullin, France 1951», <https://120years.net/wordpress/the-gm-group-and-rtf-electronic-music-studio-pierre-schaeffer-jacques-poullin-france-1951/> (page consultée le 18 juin 2022).

Références pour la classification des électrophones

BERTHOLON Pierre, «Du Clavecin magnétique. Par M. l'Abbé Bertholon», dans *La nature considérée sous ses différents aspects ou Journal d'histoire naturelle*, vol. 9 (1789), p. 321-332.

Boèce, *De institutione musica*, livre I, chap. 2.

SMITH Brandon, «Virtual Instrument [software synthesizer]», dans *Oxford Music Online*, <https://doi.org/10.1093/gmo/9781561592630.article.L2295003> (page consultée le 17 juillet 2022).

DAVIES Hugh, «Electronic Instruments», dans *Oxford Music Online*, <https://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000008694?rskey=DPPimW&result=1> (page consultée le 3 mai 2022).

FALAIZE Antoine, «Simulation of the Fender Rhodes», dans *Synthèse sonore et systèmes hamiltoniens* (en ligne), <http://recherche.ircam.fr/anasyn/falaize/fr/applis/rhodes/> (page consultée le 28 juin 2022).

GALPIN Francis W., *A Textbook of European Musical Instruments. Their Origin, History and Character*, Londres, Williams & Norgate, 1937.

LEE Deborah, «Hornbostel-Sachs Classification of Musical Instruments», dans *Knowledge Organization*, vol. 47/1 (2020), p. 74.

MIMO Musical Instrument Museums Online, <https://mimo-international.com/MIMO/accueil-ermes.aspx>.

MIMO H-S classification, «Revision of the Hornbostel-Sachs Classification of Musical Instruments by the MIMO Consortium» (PDF), <http://www.mimo-international.com/documents/hornbostel%20sachs.pdf> (page consultée le 28 juin 2022).

PRAETORIUS Michael, *Syntagma Musicum volume II. De Organographia*, Wolfenbüttel, Elias Holwein, 1619.

RIORDAN Michael, «Transistor. Electronics», dans *Encyclopedia Britannica* (en ligne), <https://www.britannica.com/technology/transistor> (page consultée le 4 août 2022).

SACHS Curt, *The History of Musical Instruments*, s.l., W. W. Norton, 1940.

TAYLOR Arlene G., «Teaching the Dewey Decimal Classification System», dans *Cataloging & Classification Quarterly*, vol. 42/3 (2006), p. 97-117.

VON HORNBOSTEL Erich Maria et SACHS Curt. «Systematik der Musikinstrumente. Ein Versuch», dans *Zeitschrift für Ethnologie*, vol. 46 (1914), p. 553-590.

VIKRAM Mandikal e. a., «Performance Evaluation of Dimensionality Reduction Techniques on High Dimensional Data», dans *3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics*, 2019, p. 1169-1174, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8862526> (page consultée le 18 juillet 2022).

VIRDUNG Sebastian, *Musica getuscht*, Bâle, [Michael Furter], 1511.

WACHSMANN Klaus, «Instruments, Classification of», dans *Oxford Music Online*, <https://doi.org/10.1093/gmo/9781561592630.article.13818> (page consultée le 11 juillet 2022).

WATERHOUSE William, «Mahillon, Victor-Charles», dans *Oxford Music Online*, <https://doi.org/10.1093/gmo/9781561592630.article.53197> (page consultée le 10 juillet 2022).

WEISSER Stephanie et QUANTEN Maarten, «Rethinking Musical Instrument Classification: Towards a Modular Approach to the Hornbostel-Sachs System», dans *Yearbook for Traditional Music*, vol. 43/2 (2011), p. 122-146.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté de philosophie, arts et lettres

Place Blaise Pascal, 1 bte L3.03.11, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/fial