

Université Rennes 2 Haute Bretagne

SAUNEUF MATHIEU

**RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS ET CREATION MUSICALE
ELECTROACOUSTIQUE**

**Conséquences poïétiques et esthétiques induites par l'utilisation d'agents
neuromimétiques au sein du processus de réalisation sonore**

Mémoire de Master 2 recherche en Arts et Technologies Numériques

Sous la direction de M. Bruno Bossis

2009 - 2010

Université Rennes 2 Haute Bretagne

SAUNEUF MATHIEU

**RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS ET CREATION MUSICALE
ELECTROACOUSTIQUE**

**Conséquences poïétiques et esthétiques induites par l'utilisation d'agents
neuromimétiques au sein du processus de réalisation sonore**

Mémoire de Master 2 recherche en Arts et Technologies Numériques

Sous la direction de M. Bruno Bossis

2009 - 2010

Introduction

« ... le cerveau, et en particulier le cerveau humain, est la machine de traitement de l'information la plus sophistiquée que nous connaissons. »¹ Même si nous ne rivalisons pas avec l'ordinateur en termes de puissance de calcul, notre cerveau est mieux adapté que lui en ce qui concerne le traitement d'informations, en particulier dans les systèmes complexes. L'ordinateur représente en effet un outil formidable pour résoudre des problèmes clairement définis, dont la difficulté ne repose que sur la complexité du calcul. En revanche, les êtres vivants sont doués de capacités de traitement nettement supérieures aux systèmes informatiques en ce qui concerne les problèmes reposant sur des données incertaines, n'appelant pas de réponse unique et mobilisant un grand nombre de connaissances.

Chez les êtres vivants, la cognition repose sur les fonctions suivantes : la perception, l'acquisition d'informations, l'apprentissage, le raisonnement et l'adaptation comportementale. Comprendre ces facultés pourrait donc permettre d'élaborer des outils de calcul plus à même de résoudre ces problèmes tenant jusqu'alors les systèmes informatiques traditionnels en échec. La complexité de ces processus cognitifs rend leur modélisation informatique extrêmement difficile, mais une approche consiste aujourd'hui à développer de nouveaux programmes de traitement d'informations basés sur la modélisation de neurones et de synapses : les structures de base de l'encéphale impliquées dans le traitement du message nerveux. Cette approche est dite *connexionniste* et les réseaux de neurones artificiels en sont une application directe.

Le connexionnisme désigne un nouveau paradigme des sciences cognitives, discipline constituée de divers champs disciplinaires : la psychologie cognitive, la linguistique, l'intelligence artificielle, ainsi que certains domaines de la philosophie, de l'anthropologie et des neurosciences. Ces différentes disciplines scientifiques se sont assemblées dans les années 1950, au cours de ce que l'on a baptisé la révolution cognitive, afin d'édifier une science ayant pour objet d'étude les mécanismes de la cognition humaine, animale ou artificielle. En 1956, une conférence rassemblant des

¹ Jean-Louis Amat, Gérard Yahiaoui, *Techniques avancées pour le traitement de l'information. Réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques*, Toulouse, Editions Cépadués, 2002, p. 105.

chercheurs de divers horizons disciplinaires tel que Marvin Minsky², Claude Shannon³, Noam Chomsky⁴, George Miller⁵ ou David Hubel⁶, se pencha sur l'étude de l'intelligence artificielle. Cette conférence a coutume d'être considérée comme l'acte de naissance des sciences cognitives.

L'avènement du connexionnisme a permis de faire évoluer la conception du cerveau, dont on assimilait le fonctionnement à celui d'un ordinateur : « ... le cerveau se distinguait progressivement de la représentation l'assimilant à un processeur, qui agirait selon des règles prédéterminées. »⁷ Ce courant existe au sein des sciences cognitives depuis leur origine, mais ne connaît son véritable essor que dans les années 1980 autour de l'ouvrage *Parallel Distributed Processing*⁸ de David E. Rumelhart⁹ et James L. Maclelland¹⁰. Il consiste à envisager les phénomènes cognitifs du point de vue des mécanismes de traitement de l'information à l'œuvre dans le cerveau.

« L'idée fondamentale est qu'il existe un réseau d'unités élémentaires ou nœuds dont chacun a un certain niveau d'activation. Ces unités sont connectées entre elles, de sorte que les unités actives excitent ou inhibent les autres unités. Le réseau forme ainsi un système dynamique, qui, lorsque qu'on lui fournit une entrée initiale, propage les excitations et inhibitions parmi ses unités. »¹¹

Chaque neurone est considéré comme la pièce élémentaire d'un ensemble complexe qu'est le système nerveux. Un neurone ne peut à lui seul prendre en charge l'ensemble

² Marvin Lee Minsky, scientifique américain spécialisé dans le domaine des sciences cognitives, co-fondateur du groupe d'intelligence artificielle du M.I.T.

³ Claude Elwood Shannon, mathématicien et ingénieur électricien américain, compte parmi les fondateurs de la théorie de l'information.

⁴ Noam Chomsky, professeur américain de linguistique au M.I.T., père fondateur de la grammaire générative et transformationnelle.

⁵ George Armitage Miller, professeur américain de psychologie à l'université de Princeton.

⁶ David Hunter Hubel, neurobiologiste américain, a effectué des travaux sur la neurophysiologie visuelle, docteur honoris causa de l'université de Montréal en 2007.

⁷ Jocelyne Kiss, *Composition musicale et sciences cognitives, Tendances et perspectives*, Paris, Editions l'Harmattan, 2004, p. 283.

⁸ David E. Rumelhart, James L. Maclelland, *Parallel Distributed Processing*, Londres, Editions MIT Press, 1987.

⁹ David E. Rumelhart, Professeur de psychologie jusqu'en 1988 à l'université de Stanford, Etats-Unis.

¹⁰ James L. Maclelland, Professeur de psychologie cognitive et de neurosciences à l'université de Stanford, Etats-Unis.

¹¹ William Bechtel, Adèle Abrahamsen, *Le connexionnisme et l'esprit, Introduction au traitement parallèle par réseaux*, Paris, Editions La Découverte, 1993, p. 10.

des données traitées par le cerveau. Ses performances reposent sur le parallélisme massif des neurones, leurs capacités d'auto-organisation ainsi que le caractère distribué du traitement de l'information. Ces facultés permettent aux neurones d'interagir et de s'organiser entre eux selon la nature de l'information à traiter. L'approche connexionniste envisage donc la cognition comme un processus émergent de l'état de structuration de l'architecture neuronale, où la puissance de traitement de l'ensemble repose sur la faculté de ramification et d'interconnexion des neurones entre eux : on parle d'*holisme* pour définir ce type de systèmes où les propriétés de l'ensemble ne peuvent être entièrement expliquées par les propriétés des parties :

« Un système est un ensemble d'éléments en interaction dans lequel la totalité organisée est plus riche que la somme des éléments, et les éléments pris dans le tout sont plus riches que les éléments pris isolément. Cette vision porte le nom de *holisme*, expression dérivée de l'anglais *whole*.»¹²

L'essor de la pensée connexionniste est également lié à de nouvelles théories concernant la notion d'apprentissage, processus au cœur de la formalisation des réseaux de neurones. Ces nouvelles théories sont liées aux progrès de la psychologie, des sciences cognitives et de la cybernétique au cours du 20^{ème} siècle :

« L'apprentissage a longtemps été conçu comme une accumulation de connaissances résultant d'un transfert de savoirs entre celui qui sait et celui qui ne sait pas. Nous pensons qu'il n'en est rien. Les théories récentes de la complexité, de la dynamique des systèmes instables et du chaos déterministe nous invitent à repenser l'apprentissage humain et sa modélisation en termes de processus dynamique auto-organisé. »¹³

Le modèle d'apprentissage des réseaux de neurones est fondé sur un processus dynamique auto-organisé. Ces automates constituent à la fois une mise en application de la pensée connexionniste du point de vue de l'apprentissage, et un outil de simulation permettant de mettre à jour de nouvelles hypothèses :

« On peut trouver dans les automates cellulaires l'amorce de recherches sur les changements d'état dans notre système cognitif, l'une des questions les plus importantes

¹² Gérard Clergue, *L'apprentissage de la complexité*, Paris, Editions Hermès, 1997, p. 37.

¹³ *Ibid.*, p. 16.

de l'apprentissage...L'apprentissage n'est pas autre chose que ce passage entre un état de non savoir et le savoir [...] Ou plutôt une transition entre deux états de savoirs. »¹⁴

L'apparition de la pensée connexionniste dans la musique savante de la seconde moitié du 20^{ème} siècle est symptomatique de nouvelles interrogations. La compréhension de la cognition musicale devient un enjeu majeur, tant pour les cognitivistes, que pour les musicologues et les compositeurs. Ce phénomène montre une volonté de comprendre le geste compositionnel, l'acte créateur, en termes de processus cognitifs, mais également de mieux comprendre l'activité perceptive chez l'auditeur ainsi que certains phénomènes psycho-acoustiques.

Les réseaux de neurones constituent l'application concrète de la pensée connexionniste. Ces automates rudimentaires sont des outils de calcul capable de traiter des données selon un processus inspiré du fonctionnement présumé des neurones biologiques. Le champ d'application de ces automates s'étend aujourd'hui à de nombreux domaines, allant de l'aéronautique au diagnostic médical. L'utilisation de ces outils pour effectuer des tâches ayant traditionnellement recours aux capacités de traitement du cerveau humain repose sur la propriété fondamentale des agents neuromimétiques : une mémoire distribuée et associative qui se structure par un processus d'apprentissage. En effet, un réseau de neurone a la capacité d'aménager sa structure suite à l'acquisition d'une information nouvelle afin de la mémoriser. Son comportement s'adapte donc à son environnement et peut évoluer selon des exigences prédéfinies. Ces propriétés permettent aux agents neuromimétiques d'investir des champs d'expertise vastes et complexes.

Nous avons pu constater sur la dernière décennie, que les technologies neuromimétiques et le monde musical constituaient deux champs disciplinaires en rapprochement, exerçant l'un sur l'autre une influence réciproque. Nous souhaitons donc examiner, à travers notre travail de recherche, les implications qu'engendre l'utilisation des technologies neuromimétiques au sein de l'activité de création musicale, et plus particulièrement dans le processus de réalisation sonore. Pour ce faire, nous allons nous inspirer d'un modèle d'analyse, afin de mettre en place une méthode permettant de structurer notre recherche. Il ne s'agit pas pour nous de prescrire

¹⁴ *Ibid.*, p. 124.

l'utilisation de ce modèle pour l'analyse des installations musicales pour réseaux de neurones, ni de nous en servir afin d'analyser les œuvres qui viendront illustrer notre propos, mais bien d'y trouver certains outils méthodologiques afin de structurer notre raisonnement. Ce modèle est la tripartition de Jean Molino¹⁵, programme sémiologique consistant à considérer les formes symboliques selon trois aspects différents : les processus poïétiques, les processus esthésiques et le niveau neutre. Les processus poïétiques sont l'ensemble des processus de production ayant engendré une forme symbolique. Les processus esthésiques concernent les mécanismes de réception permettant au sujet d'attribuer des significations à cette forme. Le niveau neutre est ce qui résulte de la nature même de la forme symbolique, ce que Jean Molino appelle le niveau *immanent*, l'objet matériel résultant des processus poïétiques et induisant des processus esthésiques.

Nous allons dans un premier temps présenter et justifier le modèle d'analyse qui sera le nôtre pour aborder cette pratique. Nous allons également présenter certaines problématiques générales liées à la musique électroacoustique : la lutherie électronique, l'écriture et les interfaces de contrôle. Il nous appartiendra également de définir dans ce premier chapitre une notion qui sera au cœur de nos interrogations quant aux modalités d'utilisation de ces outils : l'interactivité. Nous détaillerons la structure et le fonctionnement de ces automates. Nous allons déterminer le champ d'application de ces technologies au sein de la pratique musicale et mettre en évidence leurs propriétés remarquables : l'apprentissage par auto-organisation, l'émergence de comportements adaptés, la mémoire associative et distribuée ainsi que le phénomène de généralisation.

Nous allons ensuite montrer en quoi l'utilisation de tels automates modifie les processus compositionnels, déplace le rapport que le compositeur entretient à son œuvre, modifie le statut de l'instrument et génère de nouvelles problématiques concernant la forme de l'œuvre, son écriture et son exécution. Nous envisageons d'illustrer cette seconde partie en développant une installation électroacoustique pour réseaux de neurones afin de rendre compte des problématiques inhérentes à l'utilisation de ces technologies.

Nous souhaitons enfin étudier les processus de perception propres à ce type d'installations. Une œuvre pour réseau de neurones possède certaines particularités

¹⁵ Jean Molino, sémiologue français, professeur à l'université de Lausanne.

esthétiques et entretient une relation d'un nouveau genre avec le spectateur. Nous allons donc déterminer ces particularités et analyser les nouveaux rapports existants dans ce type d'installations. Nous nous interrogerons notamment sur les enjeux de l'interactivité de seconde génération, sur la relation aléatoire régissant la communication entre l'automate connexionniste et son utilisateur ainsi que sur la délicate question de la pertinence des modèles d'analyse pour ce type d'œuvres.

**1. Musiques électroacoustiques, réseaux de neurones
artificiels et interactivité : principes, définitions et
applications**

1.1. Musique électroacoustique et interactivité

1.1.1. Musiques électroacoustiques : modèles d'analyse

Les installations musicales ayant recours aux technologies neuromimétiques au sein du processus de réalisation sonore s'inscrivent dans le champ de la musique électroacoustique, si l'on entend par électroacoustique ce qui concerne la conjonction de la musique et des machines. Le matériau musical produit par ce type d'installations peut quant à lui, tout en restant dans le domaine de la synthèse sonore, s'inscrire dans des styles tout à fait différents, selon les choix du compositeur. Nous allons aborder, à travers différents exemples d'installations et de performances, le cas de systèmes neuromimétiques capables de réaliser de la synthèse sonore dans des styles très variés : musique classique, contemporaine, « pop-rock » ou électroacoustique. Certains systèmes sont utilisés pour imiter des chants d'oiseaux ou effectuer de la synthèse vocale. Par conséquent, l'analyse de ce type d'installations s'attachera plus à la poïésis de l'œuvre ainsi qu'au processus de réception mis en jeu, qu'à l'analyse du matériau musical en tant que tel, c'est à dire du niveau neutre ou immanent.

« ... si, à la différence des musiques tonales ou sérielles d'aujourd'hui, la musique électroacoustique n'obéit pas à une syntaxe *a priori*, en revanche, son discours est bien syntaxiquement organisé... »¹⁶ Jean-Jacques Nattiez¹⁷ nous explique ici que la musique électroacoustique, bien qu'elle ne soit pas représentable a priori par une écriture, se constitue d'unités musicales organisées selon des règles assimilables à une syntaxe. Stéphane Roy nous dit également que la forme qui résulte de cette organisation syntaxique est propre à provoquer émotions et significations chez l'auditeur : « ... notre approche est à la fois formaliste et expressionniste, c'est à dire que nous reconnaissons que les relations entre les composantes musicales (aspect formaliste) sont capables de générer des réactions émotives chez l'auditeur (aspect expressionniste). »¹⁸ D'un point de vue sémiologique, l'objet musical est donc à considérer comme un ensemble de signes chargés de diverses significations. La multiplicité de ces significations est liée

¹⁶ Jean-Jacques Nattiez, « Préface », dans *L'analyse des musiques électroacoustiques : Modèles et propositions*, Paris, Editions l'Harmattan, 2003, p. 16.

¹⁷ Jean-Jacques Nattiez, né en 1945, sémiologue et musicologue, professeur à la faculté de musique, université de Montréal.

¹⁸ Stéphane Roy, *L'analyse des musiques électroacoustiques : Modèles et propositions*, op. cit., p. 22.

selon Nattiez à la multiplicité des sujets en relation avec l'objet musical : « Une fois confrontée et mise en perspective avec l'intention, le vécu, l'expérience et les savoirs d'un sujet, l'œuvre revêt des significations distinctes. »¹⁹ La sémiologie musicale repose donc sur l'étude des signes et significations contenus dans l'œuvre. Dans le cadre de cette entreprise, Nattiez propose une méthode d'analyse, en s'appuyant sur la tripartition de Jean Molino.

Comme nous l'avons vu en introduction, la tripartition de Jean Molino consiste à aborder l'œuvre selon trois points de vue : les processus compositionnels, c'est à dire la poïétique, les processus de réception, qui constituent l'esthétique, et le niveau neutre. Afin de structurer notre réflexion sur les œuvres musicales électroacoustiques intégrant des systèmes neuromimétiques dans le processus de réalisation sonore, nous nous sommes inspirés de la tripartition de Jean Molino afin de concevoir une méthode adaptée, permettant de mettre en évidence les spécificités de cette pratique ainsi que ses enjeux. Cependant, nous insistons sur le fait que nous envisageons ce modèle comme un outil méthodologique pour structurer notre recherche, pour aborder une pratique musicale. Il ne s'agit pas pour nous d'adhérer à cette approche pour envisager l'analyse des œuvres électroacoustiques pour réseau de neurones.

Nous avons donc, suite à ces observations, élaboré une méthode d'investigation pour mener à bien notre recherche. Nous allons tout d'abord nous attacher à définir les modalités et le contexte de la pratique intégrant les technologies neuromimétiques dans la création d'œuvres électroacoustiques.

Nous allons ensuite nous intéresser aux processus poïétiques spécifiques aux œuvres électroacoustiques pour réseaux de neurones. En nous appuyant sur la terminologie élaborée par Nattiez, nous parlerons de poïétique externe, c'est à dire que nous allons envisager les processus de production grâce aux sources et documents témoignant de la création de l'œuvre.

Ces processus poïétiques nous permettront enfin, de déduire les stratégies de réceptions propres à ces œuvres. On parlera donc, toujours selon Nattiez, d'esthétique inductive, à cette différence près que la source de cette déduction ne sera plus l'analyse

¹⁹ *Ibid.*, p. 24.

niveau neutre, mais les processus poïétiques. Pour enrichir la compréhension des processus esthésiques, nous utiliserons également des sources extérieures : documents, témoignages. On parlera alors d'esthétique externe.

En ce qui concerne l'analyse niveau neutre, nous ne nous attarderons que brièvement sur cet aspect, car, comme nous l'avons mentionné plus haut, le matériau musical à lui seul n'est pas en mesure de révéler les enjeux de cette pratique. Cependant, dans le cadre de l'analyse des processus esthésiques, nous aborderons cette question afin de disposer de suffisamment d'éléments pour amorcer une réflexion sur l'analyse critique de ces œuvres. Nous estimons en effet qu'une analyse du niveau neutre associée à une réflexion sur les processus de réception du matériau musical peut nous éclairer sur les enjeux esthétiques de ce type d'installations.

En ce qui concerne l'analyse du matériau musical produit par une installation intégrant un système connexionniste dans son processus de réalisation sonore, nous pouvons mentionner l'analyse paradigmatique, que Stéphane Roy adapte à la musique électroacoustique dans son ouvrage *L'analyse des musiques électroacoustiques*. Cette méthode est proposée par Nicolas Ruwet en 1972, dans un ouvrage intitulé *Langage, musique, poésie*²⁰, pour l'analyse des musiques modales et tonales. Elle consiste à utiliser les répétitions et les transformations d'unités musicales au sein d'une œuvre pour en réaliser la segmentation. Ce procédé se base sur deux critères : celui d'identité, et celui d'équivalence²¹. L'analyse paradigmatique rassemble autour d'un même paradigme les unités musicales semblables à un modèle, ainsi que celles dérivant de ce modèle. Cette notion est déterminante, surtout lorsqu'il s'agit d'adapter ce type d'analyse aux musiques électroacoustiques : « ... comme la répétition identique est un phénomène rare en musique électroacoustique, seule la transformation permet d'éclairer véritablement les rapports d'équivalence qui existent entre les unités. »²²

Etant donné la nature de l'apprentissage des réseaux de neurones, que nous allons étudier plus loin, et la manière dont ils sont intégrés dans le processus de réalisation

²⁰ Nicolas Ruwet, *Langage, musique, poésie*, Paris, Editions du Seuil, 1972.

²¹ Stéphane Roy, *L'analyse des musiques électroacoustiques : Modèles et propositions*, op. cit., p. 263.

²² Stéphane Roy, *L'analyse des musiques électroacoustiques : Modèles et propositions*, op. cit., p. 257.

sonore, nous allons voir que ce dernier modèle se prête plutôt bien à l'analyse du matériau musical produit par un système neuromimétique.

1.1.2. Lutherie numérique, langage de programmation et écriture musicale

Nous allons aborder ici certaines problématiques propres aux musiques électroacoustiques, concernant la lutherie numérique, la représentation du matériau musical, la programmation ou encore l'ergonomie des interfaces numériques de contrôle. Nous verrons au cours de notre réflexion que ces problématiques s'appliquent également aux installations musicales pour réseaux de neurones, c'est pourquoi nous souhaitons amorcer dès maintenant une réflexion sur le sujet.

Dans un premier temps, doit-on considérer les systèmes neuromimétiques appliqués à la création musicales comme des agents ou comme des instruments ? Selon Claude Cadoz, si l'énergie qui est à l'origine du résultat sonore parvenant aux tympanes n'est pas produite par l'homme, on ne peut parler d'instrument.

« Supposons [...] que l'on réussisse, grâce aux meilleurs algorithmes de synthèse [...] à simuler d'une façon telle qu'aucune expérience ne révèle l'artifice, un violon [...] Nous n'avons pas affaire à un instrument. En effet l'énergie du geste s'arrête au périphérique gestuel, aussi performant soit-il. Passé la frontière, il n'y a que de l'information, portée par des circuits qui tiennent leur énergie de l'alimentation secteur. »²³

A la conception de Claude Cadoz, nous opposerons une autre vision qui consiste à envisager l'instrument numérique comme un instrument à part entière, s'il obéit à certaines conditions : « Un ordinateur [...] s'il est muni d'une entrée son ou d'une interface gestuelle, d'un logiciel de synthèse ou de traitement et d'une sortie son, alors l'ensemble du dispositif peut être considéré comme un instrument de musique. »²⁴ Bruno Bossis, au cours d'une communication réalisée dans le cadre du colloque *Composer au XXIe Siècle – Processus et Philosophies* à Montréal en 2007, envisage les technologies numériques comme un nouvel outil de la lutherie, permettant de programmer le comportement de l'instrument, ses modalités de prise en main, sa production sonore. Ce caractère programmable donne lieu, selon lui, à ce qu'il nomme une « écriture de l'instrument ». L'instrument cesse donc d'être « ... un objet standardisé

²³ Claude Cadoz, « Musique, geste, technologie », dans *Les nouveaux gestes de la musique*, Marseille, Editions Parenthèses, 1999, p. 89.

²⁴ Bruno Bossis, « Ecriture instrumentale, écriture de l'instrument », dans *Actes du colloque international : Composer au XXIe Siècle – Processus et Philosophies*, Montréal, 28 février – 3 mars 2007, à paraître, PDF donné par l'auteur, p. 2.

dont les compositeurs, les interprètes et les mélomanes connaissent l'apparence, les possibilités virtuoses et le timbre.»²⁵ L'instrument devient donc un objet variable, programmable, dont le comportement, fixé par le compositeur, peut être évolutif au sein de l'œuvre.

« La morphologie de l'instrument dépend donc du projet esthétique du compositeur et non l'inverse. Et pour la première fois dans l'histoire de la musique, cette morphologie peut évoluer en un continuum au sein même de l'œuvre. L'interface et sa réponse acoustique ne sont plus fixées à l'avance, mais deviennent programmables et modifiables pendant le temps de l'œuvre. »²⁶

Nous ne pouvons pas véritablement assimiler les agents neuromimétiques à des instruments numériques. En effet, nous allons voir que ce n'est pas le réseau de neurones qui prend en charge la synthèse sonore, lorsqu'il est impliqué dans un processus de réalisation musicale. Le plus souvent, le réseau de neurones est formalisé au sein d'un module connexionniste, jouant un rôle d'intermédiaire chargé de traiter des données entre l'interface de contrôle et un module de synthèse sonore. En revanche l'ensemble du système connexionniste peut être envisagé comme un instrument numérique modulaire, dont l'écriture constitue une part du travail de composition :

« L'acte de composition implique donc l'écriture de l'instrument lui-même, de la qualité de l'interface homme/machine au même titre que les modules d'analyse, de traitement et de synthèse, le choix d'un fonctionnement en temps réel, ainsi que la capacité de la machine à mémoriser et à apprendre. »²⁷

Nous verrons que les programmes connexionnistes font en effet l'objet d'une écriture, mais nous préférons parler de système connexionniste plutôt que d'instrument. Les installations musicales pour réseaux de neurones intègrent généralement des programmes structurés de la manière suivante : interface de contrôle, module connexionniste et module de synthèse sonore. Même si cette architecture est semblable

²⁵ *Ibid.*, p. 6

²⁶ *Ibid.*, p. 7.

²⁷ « The act of composition thus involved the writing of the instrument itself, the quality of the human-machine interface as well as the analysis, treatment and synthesis modules, the choice of an operation in real time, and the ability of the machine it-self to memorize and learn. » Bruno Bossis, « Musicology and Communication Theories: Real Time and Interaction in Music understood as Circulation of Information », dans *Electroacoustic music – Technologies, aesthetics, and theories – A musicological challenge*, Essen, Editions Die Blaue Eule, 2008, p. 182.

à celle des instruments modulaires définis par Bruno Bossis, nous verrons qu'au sein des installations musicales pour réseaux de neurones, le statut du système connexionniste n'est pas celui d'un instrument, même si par certains aspects, son contrôle s'apparente au contrôle instrumental.

La notion d'écriture de l'instrument nous amène à nous interroger sur l'écriture et la composition dans le cadre des musiques électroacoustiques. L'apparition des technologies numériques dans la musique savante occidentale provoque une crise de l'écriture. « ... l'écriture n'est pas uniquement un moyen pour mémoriser des idées mais bien un générateur d'idées. »²⁸ La réalité sonore avec laquelle les compositeurs souhaitent travailler ne se laisse plus représenter par la notation traditionnelle. Le pouvoir d'abstraction de l'écriture, permettant de manipuler les sons à distance de la réalité sonore, n'est plus accessible. Ainsi, dans les premières œuvres électroniques, on constate que l'écriture n'est pas utilisée comme outil d'abstraction pour générer des idées, mais comme support permettant de les conserver :

« Dans ces œuvres électroniques, l'écriture est venue *après la conception*, soit pour guider des interprètes ou des chefs d'orchestre, soit pour donner une image plus ou moins graphique afin que l'on puisse suivre la partition à l'écoute. Et donc, il s'agit certes d'une représentation imagée, mais non d'une représentation *générationnelle*. »²⁹

Nous verrons, concernant les installations musicales pour réseaux de neurones, que la complexité du système ainsi que son caractère autonome rend extrêmement difficile toute notation, qu'elle soit générative ou non. Le comportement de l'agent connexionniste n'étant pas prévisible, les seuls éléments invariables pouvant faire l'objet d'une notation sont les paramètres du programme, ainsi que les éventuels patches ou lignes de code. Donc, si la représentation de la réalité sonore pose problème dans le cadre de la musique de synthèse, une représentation de l'état de l'instrument numérique à la source de cette réalité sonore est possible :

²⁸ Philippe Manoury, *La note et le son, Ecrits et entretiens 1981-1998*, Paris, Editions L'Harmattan, 1998, p. 24.

²⁹ Philippe Manoury, « Le stade pictographique de la musique électronique doit être dépassé », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999, p. 207.

« Les événements successifs ne correspondent plus à une texture sonore, mais à des états du comportement de l'instrument. La lecture des lignes de code ou des *patches* ne permettant pas une lecture aisée, linéaire et dans la temporalité musicale, la solution souvent adoptée par les compositeurs est d'ajouter des commentaires textuels adaptés à chaque cas particulier. Dans les logiciels de programmation orientés objet comme Max/MSP, PureData et Kyma, la réalisation de l'instrument se confond avec sa notation. Eventuellement, un graphique symbolisant le résultat sonore peut compléter ces « didascalies ».»³⁰

Nous envisagerons donc les possibilités de représentation du matériau musical et/ou de l'état des agents connexionnistes impliqués dans le processus de réalisation sonore.

L'aspect programmable de l'instrument entraîne également une conséquence au sein des processus de création. Si l'écriture de l'instrument devient l'un des aspects du travail de composition, le compositeur doit acquérir ce nouveau savoir-faire, ou se faire assister dans cette phase de son travail. Les compositeurs de musiques électroacoustiques ont en effet recours à des assistants quand la programmation devient trop virtuose pour leur niveau de compétence. Le processus de création devient le fruit d'un travail collectif :

« La malléabilité de l'instrument modulaire ou programmable rend nécessaire une écriture spécifique de cet instrument [...] Malgré les progrès des interfaces graphiques de programmation et de contrôle des logiciels, le haut degré de technicité de ces dispositifs rendent souvent nécessaire une collaboration avec un assistant musical. Ainsi, non seulement les techniques d'écriture changent, mais l'acte de création devient en partie collectif.»³¹

Nous verrons à cette occasion que les installations pour réseaux de neurones sont majoritairement développées en collaboration avec des assistants de création musicale ou par des compositeurs possédant des connaissances importantes en informatique.

D'ailleurs, dans le cadre de la programmation, le choix du langage ne se fait pas au hasard. Certains langages de programmation vont favoriser l'implémentation de certaines fonctions alors que d'autres ne s'y prêtent pas du tout. Yann Orlarey,

³⁰ Bruno Bossis, « Ecriture instrumentale, écriture de l'instrument », dans *Actes du colloque international : Composer au XXIe Siècle – Processus et Philosophies*, op. cit., p. 9.

³¹ *Ibid.*, p. 12.

Dominique Fober et Stéphane Letz parlent d'« ergonomie cognitive » du langage de programmation pour décrire cette «... facilité avec laquelle on va passer d'une idée à sa formulation dans le langage... »³² Le compositeur, seul ou assisté, se doit de parvenir à une conception claire de son projet musical afin de trouver le langage adapté à sa formalisation. Les réseaux de neurones peuvent en effet être formalisés dans différents langages, possédant chacun leurs spécificités et induisant chacun des conséquences particulières sur le processus de création. Nous verrons comment certains s'adaptent mieux que d'autres au projet du compositeur.

« L'utilisation d'un langage de programmation oblige le musicien à réfléchir sur le processus même de formalisation et lui évite de considérer l'ordinateur comme une boîte noire qui impose ses choix. Les langages de programmation offrent au compositeur une énorme liberté de décision en échange d'un effort dans la formulation et la conception. »³³

Michel Beaudouin-Lafon nous dit que l'instrument de musique traditionnel obéit à une logique interne : il est un objet soumis aux lois de la physique dont le comportement est connu et intériorisé par les compositeurs et les instrumentistes. Selon lui, les applications interactives se doivent également d'obéir à une logique interne, mais cette fois déterminée et écrite par le programmeur ou le compositeur, et, dans l'intérêt de l'utilisateur, cette logique doit se plier à des exigences de cohérence. Ainsi, une installation pour réseau de neurones faisant intervenir un utilisateur doit obéir à cette même exigence, notamment en ce qui concerne l'ergonomie de l'interface contrôle et son couplage avec le comportement du système connexionniste.

« ...les applications interactives doivent obéir à une logique interne suffisamment cohérente pour rendre leur apprentissage non seulement aisé, mais aussi gratifiant. Une interface que l'on « comprend », c'est une interface dont le modèle interne correspond au modèle mental de l'utilisateur. Or, pour que l'utilisateur constitue son modèle mental, encore faut-il que l'application ait un modèle interne. »³⁴

³² Yann Orlarey, Dominique Fober, Stéphane Letz, « Lambda-calcul et composition musicale », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999, p. 83.

³³ Gérard Assayag, « Du calcul secret au calcul visuel », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999, p. 52.

³⁴ Michel Beaudouin-Lafon, « Moins d'interface pour plus d'interaction », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999, p. 137.

Le compositeur doit donc bien souvent développer ses propres outils, ses propres applications et ses propres interfaces de contrôle au cours du processus de création. La réutilisation d'applications développées pour d'autres projets musicaux s'avère souvent être trop contraignante pour la formalisation du projet du compositeur. Nous verrons en effet, étant donné la multiplicité des formalisations possibles pour un réseau de neurones, que le compositeur doit généralement utiliser des modèles *ad hoc*, car il est particulièrement compliqué de réinvestir des modèles développés pour d'autres applications. Il existe d'ailleurs certains modèles à géométrie variable pour pallier ce problème.

« ... le travail de création ne peut se contenter exclusivement d'outils tout faits, même très bien faits. D'une part, parce que ces outils portent inévitablement en eux les *a priori* artistiques de leur concepteur, et par là même imposent une certaine marque esthétique. D'autre part, parce que la démarche d'instauration de l'œuvre, et donc l'élaboration des règles et des outils qui la sous-tendent, est partie prenante de l'œuvre d'art. »³⁵

³⁵ Yann Orlarey, Dominique Fober, Stéphane Letz, « Lambda-calcul et composition musicale », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, *op. cit.*, p. 70.

1.1.3. Cybernétique et interactivité : introduction aux réseaux de neurones

« Science constituée par l'ensemble des théories relatives au contrôle, à la régulation et à la communication dans l'être vivant et la machine. »³⁶ La cybernétique est un mouvement scientifique qui naît aux États-Unis dans les années 1940. Il s'intéresse aux mécanismes de traitement de l'information, non pas du point de vue de son contenu, mais de celui de sa forme et des moyens de sa transmission. Ce courant est à l'origine d'un certain nombre de théories qui vont nous intéresser pour mieux comprendre les réseaux de neurones.

Heinz Von Foerster³⁷, qui participa activement au développement de la cybernétique notamment dans le cadre des conférences de Macy, fonde la cybernétique de deuxième ordre. Contrairement à la cybernétique du premier ordre qui ne s'intéresse qu'aux systèmes observés, celle du second ordre se penche sur les systèmes observant et plus précisément sur ce que Foerster appelle « ... la boucle autoréférentielle initiée par l'observateur. »³⁸ Selon lui, les mécanismes de contrôle et de régulation de la communication opérants dans la première cybernétique, c'est à dire dans les systèmes observés, sont également impliqués dans les mécanismes d'observation : « ... il est circulairement impliqué comme partie du monde qu'il décrit, qu'il construit et qu'il transforme peu ou prou. »³⁹

On doit également à William Ross Ashby⁴⁰ et à Francisco Varela⁴¹ le développement d'une approche intéressante issue du mouvement cybernétique. Au lieu de se consacrer à comprendre les mécanismes permettant à un système de maintenir son équilibre, cette nouvelle approche se penche sur les processus d'auto-organisation dans les systèmes

³⁶ Paul Robert, Alain Rey, Josette Rey-Debove, *Le Nouveau Petit Robert de la langue française 2008*, Paris, Editions Le Robert, 2008, p. 605.

³⁷ Heinz Von Foerster, physicien de formation, théoricien transdisciplinaire dans le domaine des sciences cognitives, fondateur de la cybernétique des systèmes observant.

³⁸ Jacques Miermont, « Impertinents propos : Heinz von Foerster et les cliniciens », dans *Seconde cybernétique et complexité, Rencontres avec Heinz Von Foerster*, Paris, Editions l'Harmattan, 2006, p. 82.

³⁹ *Ibid.*, p. 82.

⁴⁰ William Ross Ashby, médecin, psychiatre et neurologue anglais.

⁴¹ Francisco Varela, biologiste, neurologue et philosophe chilien, développa le concept d'« autopoïèse » dans les systèmes complexes.

complexes. Francisco Varela et Humberto Maturana⁴² parlent d'autopoïèse pour définir cette propriété propre aux systèmes capables de se « produire » eux-mêmes. Le terme « poïésis » est étymologiquement dérivé du grec ancien *poiésis* qui signifie « faire » ou « produire ».

Ces différentes approches vont inspirer d'autres champs disciplinaires comme les sciences cognitives par exemple. Ainsi, l'autopoïèse de Varela et la seconde cybernétique de Foerster vont largement influencer le paradigme connexionniste à l'origine de la formalisation des réseaux de neurones artificiels.

Avant de décrire ces objets plus en détail, il convient de définir la notion d'interactivité : « L'interactivité est un principe dynamique sans fin qui pousse à obtenir de l'ordinateur des réponses de plus en plus subtiles et immédiates. »⁴³ Cette définition s'applique au domaine de l'informatique. Plus généralement l'interactivité se déploie dans toute activité de dialogue, impliquant des êtres ou des systèmes dans des mécanismes d'influence réciproque, induisant des changements de comportement. Un réseau de neurones étant programmé pour interagir avec son environnement, il s'inscrit nécessairement dans une situation d'interactivité l'unissant, dans un jeu d'influence réciproque, à cet environnement.

Nous allons distinguer deux formes d'interactivité, en nous appuyant sur la pensée de Couchot⁴⁴ : l'interactivité endogène et l'interactivité exogène.

« Il faut distinguer deux approches artistiques distinctes. La première concerne l'utilisation des modèles connexionnistes et génétiques dans des œuvres qui ne sont données à voir que sur des supports traditionnels non interactifs (films ou bandes vidéo). L'interactivité est alors strictement interne au programme (elle est dite endogène) [...] Dans la seconde approche, le chercheur propose des dispositifs interactifs dotés d'interfaces spécifiques grâce auxquelles le spectateur entre en interaction avec l'image en temps réel (l'interactivité est alors exogène). »⁴⁵

⁴² Humberto Maturana, biologiste, cybernéticien et philosophe chilien.

⁴³ Edmond Couchot, Norbert Hillaire, *L'art numérique*, Paris, Editions Flammarion, 2003, p. 97.

⁴⁴ Edmond Couchot, artiste français et théoricien de l'art contemporain.

⁴⁵ Edmond Couchot, Norbert Hillaire, *L'art numérique*, *op. cit.*, p. 101.

Nous serons amené à étudier des installations présentant l'une ou l'autre de ces formes d'interactivité, et nous aurons l'occasion de constater que cette distinction n'est pas hermétique, et que certaines installations relèvent d'une forme d'interactivité endogène par certains aspects et exogène par d'autres.

« L'ordinateur est capable de produire des objets virtuels qui ne se comportent plus comme de simples « choses » aux formes et aux propriétés immuables mais comme des sortes d'« êtres » artificiels plus ou moins sensibles, plus ou moins vivants, plus ou moins autonomes, voire plus ou moins « intelligents ». »⁴⁶

Les progrès réalisés en informatique durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle, notamment en termes de vitesse de calcul, permettent de formaliser des objets capables d'apprentissage, de mémoire, de généralisation, d'autonomie et présentant de fait un comportement imprévisible mais cohérent : c'est le cas des réseaux de neurones artificiels.

« A la base des réseaux neuronaux et des algorithmes génétiques, un même principe prévaut : celui d'une interactivité d'un haut niveau de complexité entre des éléments constitutifs de la vie ou de l'intelligence artificielles (gènes et neurones) qui, grâce à leur configuration, interagissent pour produire des phénomènes émergents. L'interactivité a atteint une étape supérieure en complexité et en autonomie. Elle suit en cela l'évolution de la cybernétique. Alors que la « première cybernétique » s'interrogeait plutôt sur les notions de contrôle et de communication (chez l'animal et dans la machine) et d'information, la seconde cybernétique s'interroge d'avantage sur les notions d'auto-organisation, de structures émergentes, de réseaux, d'adaptation et d'évolution. »⁴⁷

L'interactivité entre l'homme et la machine n'obéit plus à une simple interaction de commande : la machine est désormais capable, grâce à sa puissance de calcul, de simuler des comportements intelligents. On parlera donc d'interactivité intelligente ou d'interactivité de seconde génération pour décrire ces nouveaux rapports entre l'homme et la machine, que l'on retrouve dans les installations interactives pour réseaux de neurones.

⁴⁶ *Ibid.*, p. 98.

⁴⁷ *Ibid.*, p. 99.

1.2. Structure des réseaux de neurones artificiels, mémoire et apprentissage

1.2.1. Neurone formel, architecture neuronale et codage de l'information

En ce qui concerne les réseaux neuromimétiques, la première formalisation d'un neurone⁴⁸ est celle de McCulloch⁴⁹ et Pitts⁵⁰. Elle s'inspire du fonctionnement présumé du neurone biologique⁵¹. Cette première modélisation date des années 1940. Ce neurone formel ne possède que deux états d'activation : 1 ou 0. Si le neurone est activé, il produit un 1, si il ne l'est pas, il produit un 0. L'état d'activation est déterminé par la somme pondérée des signaux parvenant sur l'entrée du neurone. Si cette somme est supérieure à un certain seuil, que l'on nomme seuil d'activation, le neurone s'active et produit un 1. Dans le cas contraire, le neurone produit un 0.

La fonction d'activation du neurone détermine son comportement suivant la configuration de ses entrées. Selon la nature de cette fonction, le neurone réagira différemment aux informations lui parvenant, ce qui affectera le comportement global du réseau. Ainsi, la fonction de seuil du neurone formel de MacCulloch et Pitts en fait un séparateur linéaire⁵² : ce neurone effectue une séparation linéaire de l'espace des entrées⁵³. Un réseau de neurone constitué de deux couches, dont les fonctions d'activations sont de type binaire à seuil, ne peut donc pas apprendre un problème qui n'est pas linéairement séparable. Il s'avère que cette loi ne s'applique en réalité qu'aux réseaux à deux couches et le développement des réseaux multicouches permet de résoudre ce problème. Cependant, les réseaux multicouches exigent une stratégie d'apprentissage appropriée.

Cette non linéarité, due aux fonctions d'activations binaires à seuil, génère des capacités de généralisation. En effet, le fonctionnement des neurones en tout ou rien permet au réseau d'associer toutes les probabilités de réponses contenues entre les deux valeurs seuil de la fonction à l'une ou l'autre de ces valeurs. Nous verrons qu'il existe d'autres

⁴⁸ Voir Annexe 1, 2. Le neurone formel, p. 158.

⁴⁹ Warren McCulloch, chercheur américain en neurobiologie.

⁵⁰ Walter Pitts, scientifique américain étudiant la psychologie cognitive.

⁵¹ Voir Annexe 1, 1. Le neurone biologique, p. 157.

⁵² Voir Annexe 1, 4.3. Séparateur linéaire, p. 161.

⁵³ Voir Figure 5. Représentation des fonctions logiques ET et XOR, p. 161.

fonctions d'activations⁵⁴ permettant ainsi d'obtenir des réponses plus fines et permettant surtout de développer des algorithmes d'apprentissage pour les réseaux à plusieurs couches.

Il existe un nombre considérable de formalisation de réseau de neurones, cependant, nous pouvons déjà différencier deux types de réseaux parmi ces configurations : les réseaux à couches et les cartes topologiques.

Les réseaux à couches comme leur nom l'indique présentent une succession de couches neuronales. La présentation d'une information sur la couche d'entrée provoque une cascade d'activations vers la couche de sortie qui fournit une réponse. Chaque neurone d'une couche est connecté à l'ensemble des neurones de la couche suivante. A l'exception de certains réseaux qui présentent des *boucles*⁵⁵, un neurone situé sur une couche en aval ne peut envoyer d'activations à un neurone situé sur une couche en amont.

Les cartes topologiques aussi appelées cartes auto-organisatrices ou SOM (Self-Organizing Map) présentent une structure différente. Chaque neurone de la carte topologique est entièrement connecté à une première couche contenant autant de neurones que de valeurs dans le vecteur d'entrée. Cette première couche transmet le vecteur d'entrée à la carte topologique, qui va se structurer et former des zones de sensibilité aux différents vecteurs proposés. Les formalisations de SOM n'intègrent d'ailleurs que rarement la première couche. Le vecteur d'entrée est souvent transmis directement à l'ensemble des neurones de la carte topologique. On parle également de carte de Kohonen⁵⁶, en référence au statisticien qui développa ces modèles.

Les neurones biologiques possèdent la faculté de s'organiser en fonction de la nature des informations reçues par nos organes de perception. Notre cerveau s'organise donc en fonction du rapport que nous entretenons à notre environnement. Nos sens constituent l'interface permettant l'interaction entre deux systèmes : l'environnement extérieur et notre système nerveux. Un réseau de neurone artificiel obéit globalement au

⁵⁴ Voir Annexe 1, 3. Fonctions d'activation, p. 158.

⁵⁵ Jodouin, Jean-François, *Les réseaux de neurones, principes et définitions*, Paris, Editions Hermès, 1994, p. 15.

⁵⁶ Teuvo Kohonen, né en 1934, statisticien finlandais, fut le premier président de la « European Neural Networks Society » entre 1991 et 1992.

même fonctionnement : Il adapte sa structure interne en fonction des informations qu'il doit traiter.

Pour que le réseau puisse acquérir ces informations (stimulations, données d'un problème à résoudre), il est nécessaire de les coder. Ce codage consiste à transformer des données en vecteurs de scalaires pour permettre au réseau de les traiter. Ce codage s'effectue en deux étapes successives : la première est une étape de prétraitement qui consiste à éliminer du matériau présenté au réseau les données non déterminantes pour le problème et les éléments parasites : « Dans la grande majorité des problèmes, seule une partie des informations disponibles est pertinente pour la résolution ; un travail d'élimination s'impose alors, préalable à toute autre opération. »⁵⁷ Dans un second temps, une fois ce filtrage effectué, il faut coder les différentes données en vecteurs de scalaires. Dans le cadre des réseaux de neurones appliqués à la création musicale, nous verrons que cette phase est particulièrement déterminante dans le travail d'écriture du compositeur.

En sortie, il existe différentes possibilités. Dans le cadre d'un réseau à couches, les activations neuronales de la couche de sortie fournissent les valeurs pour constituer le vecteur de sortie. Si ce vecteur est de même taille et de même nature que le vecteur d'entrée, on parle de mémoire auto-associative, dans le cas contraire, on parle de mémoire hétéro-associative⁵⁸. Nous préciserons cette notion de mémoire associative dans la partie suivante. Une fois le vecteur de sortie obtenu, les valeurs qu'il contient peuvent être utilisées pour contrôler différents paramètres, comme de la synthèse sonore par exemple.

Un autre élément important à prendre en compte dans le processus de codage de l'information présentée au réseau est la structure statistique du matériau à apprendre. David E. Rumelhart et James L. McClelland nous montrent au cours d'une expérience en 1986⁵⁹ que la structure statistique d'un problème peut engendrer des phénomènes de sur-généralisation si un protocole de présentation des couples de vecteurs d'apprentissage adapté n'est pas défini. En essayant d'apprendre à un réseau de

⁵⁷ Jean-François Jodouin, *Les réseaux de neurones, principes et définitions*, op. cit., p. 93.

⁵⁸ François Blayo, Michel Verleysen, *Les réseaux de neurones artificiels*, Paris, Presses Universitaires de France, 1996, p. 38.

⁵⁹ Hervé Abdi, *Les réseaux de neurones*, Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble, 1994, p. 40.

neurones une règle accompagnée de cas particuliers, ils s'aperçoivent que le rapport statistique entre la règle et les exceptions engendre des problèmes de généralisation : le réseau applique la règle générale aux exceptions et inversement. On parle alors de sur-généralisation. Ce phénomène peut être compensé en « rappelant » au réseau certains exemples plusieurs fois au cours de la phase d'apprentissage.

1.2.2. Apprentissage, algorithmes et mémoire

Dans le cadre de l'étude des réseaux de neurones artificiels, l'apprentissage peut se définir ainsi : « Méthode permettant d'établir des connexions entre certains stimuli et certaines réponses.»⁶⁰ L'apprentissage va consister à modifier les forces de connexion entre les neurones, également appelées poids synaptiques par analogie avec le neurone biologique, afin que le réseau produise, suite à une stimulation donnée, une réponse comportementale adaptée. On distingue deux méthodes d'apprentissage : une méthode supervisée et une non supervisée.

L'apprentissage supervisé consiste à apprendre au réseau à établir un certain type de connexions entre un ensemble de stimuli et un ensemble de réponses. Le réseau utilise l'écart existant entre l'ensemble de réponses qu'il produit et l'ensemble de réponses attendues afin de corriger ses poids synaptiques et de rectifier ses erreurs. On parle donc d'apprentissage supervisé car cette méthode demande de présenter au réseau ce que l'on souhaite lui faire apprendre.

On parle de corpus d'apprentissage pour définir l'ensemble des couples de vecteurs entrée/sortie présentés au réseau dans le cadre d'un apprentissage supervisé. Ce dernier utilise ces données comme référence afin de calibrer la valeur de ses poids synaptiques au cours de la phase d'apprentissage, puis généralise ce qu'il a mémorisé à de nouveaux vecteurs d'entrée lors de son utilisation.

La seconde méthode, non supervisée, consiste à créer un réseau de type compétitif. Pour chaque vecteur d'entrée, le neurone dont le vecteur des poids synaptiques s'apparente le plus au vecteur d'entrée est choisi. Ce neurone gagnant va alors modifier ses poids synaptiques afin de ressembler encore davantage au vecteur d'entrée. Le neurone gagnant aura donc plus de chances à la prochaine présentation du même vecteur d'être activé. On parle donc ici de méthode non supervisée, car il n'y a pas de recours à l'exemple durant la phase d'apprentissage. Les réseaux de type LVQ (Learning Vector Quantization) fonctionnent sur ce principe. Les SOM fonctionnent également sur ce principe, mais contrairement aux réseaux compétitifs classiques, ils tiennent compte,

⁶⁰ Jean-Louis Amat, Gérard Yahiaoui, *Techniques avancées pour le traitement de l'information. Réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques*, op. cit., p. 105.

dans le processus de spécialisation, de la position des neurones entre eux. Au cours de cette phase d'apprentissage, « ... le réseau neuronal construit une topologie de l'espace des vecteurs d'entrée.»⁶¹ Pour chaque présentation d'un vecteurs d'entrée, le neurone gagnant exerce une influence sur ses voisins afin qu'ils deviennent également plus sensibles à ce vecteur. La spécialisation des neurones est graduée sur l'ensemble de la carte auto-organisatrice et sa structuration reflète l'espace des vecteurs d'entrée. Le réseau définit par lui même des catégories de ressemblance au sein de l'espace des données traitées. Le problème de cette approche réside dans la définition des critères de ressemblance. Ces critères dépendent du matériau à traiter, du codage des vecteurs, ainsi que des dimensions du réseau. Si le codage est mal réalisé, ou si le réseau n'a pas les dimensions adéquates, il se peut que les critères de ressemblance du réseau ne nous semblent pas pertinents. «L'apprentissage supervisé est donc mieux adapté aux problèmes où l'on désire «modéliser» notre subjectivité.»⁶²

En ce qui concerne l'apprentissage supervisé, il existe différentes méthodes dont nous allons tâcher de dresser un aperçu non exhaustif.

L'apprentissage de type supervisé consiste à « montrer » au réseau de neurones des exemples de couples de vecteurs entrée/sortie afin qu'il mémorise ces associations. Quand le réseau n'est pas encore éduqué, il produit, lorsqu'on lui présente un vecteur d'entrée, une réponse erronée. Le principe de minimisation itérative d'un critère de l'erreur en sortie consiste donc à modifier progressivement la configuration synaptique du réseau en fonction de l'écart existant entre la réponse erronée et la réponse attendue, ce qu'on appelle le critère de l'erreur ou la « fonction de coût »⁶³ de l'erreur. Cette démarche de minimisation de la fonction de coût de l'erreur demande de réitérer plusieurs fois la même situation, c'est pourquoi on parle de minimisation itérative. Le principe utilisé pour optimiser la fonction de coût de l'erreur porte le nom de « descente de gradient ».

La descente de gradient est un algorithme d'optimisation qui tend à trouver le minimum local d'une fonction, en l'occurrence, la fonction de coût de l'erreur. Ce principe

⁶¹ *Ibid.*, p. 110.

⁶² *Ibid.*, p. 110.

⁶³ *Ibid.*, p. 114.

préexiste aux réseaux de neurones. La descente de gradient utilisant les dérivées de fonctions, cette méthode était incompatible avec les réseaux neuromimétiques tant que les neurones formels utilisaient les fonctions d'activation en tout ou rien. Le développement de neurones formels utilisant des seuils « lissés »⁶⁴, par le biais de fonctions sigmoïdes par exemple, a rendu possible l'utilisation de la descente de gradient dans le processus d'apprentissage des réseaux de neurones. Ce procédé détermine l'implication de chaque poids synaptique dans la production de l'erreur et produit une correction. Comme cette analyse se fait en partant de la couche de sortie et se propage vers la couche d'entrée, afin de prendre en compte les couches cachées, on parle de rétro-propagation du gradient. Il existe différentes méthodes pour optimiser ce type d'apprentissage : la descente de gradient avec inertie⁶⁵, la descente de gradient stochastique⁶⁶ ou encore la technique du recuit simulé⁶⁷.

Dans le cadre de l'apprentissage supervisé, il est possible d'intervenir sur différents paramètres déterminants quant aux facultés d'apprentissage et de généralisation du réseau.

De nombreux paramètres du réseau dépendent de son architecture. On sait par exemple que plus il y a de coefficients synaptiques, plus le temps d'apprentissage sera long et plus les capacités de généralisation seront faibles : « On voit donc tout de suite qu'un trop gros réseau a toutes les chances de bien apprendre les exemples mais d'avoir de mauvaises performances en généralisation. »⁶⁸ On sait également que le nombre d'exemples nécessaires à l'apprentissage augmente généralement avec la quantité de coefficients synaptiques.

Pour une même association de vecteurs entrée/sortie, on peut atteindre la même approximation avec différentes architectures neuronales. « Dans le cas des réseaux à couches, un théorème mathématique démontre que, pour n'importe quelle forme de séparation du problème, il existe au moins un réseau neuronal à trois couches capable

⁶⁴ *Ibid.*, p. 117.

⁶⁵ *Ibid.*, p. 118.

⁶⁶ *Ibid.*, p. 119.

⁶⁷ *Ibid.*, p. 121.

⁶⁸ Jean-Pierre Nadal, *Réseaux de neurones, De la physique à la psychologie*, Paris, Editions Armand Colin, 1993, p. 106.

de réaliser cette séparation.»⁶⁹ S'il existe effectivement un réseau à trois couches permettant de résoudre un problème quelle que soit sa forme de séparation, un réseau comportant plus de trois couches sera lui capable de résoudre ce même problème plus rapidement. Il est donc important de trouver la configuration idéale du réseau, offrant un temps d'apprentissage et des capacités de généralisation optimum.

Un autre paramètre déterminant dans le processus d'entraînement du réseau est le pas d'apprentissage. L'évolution de la descente de gradient sur la surface d'erreur n'est pas continue : « ... la rétro-propagation procède par sauts discrets, dont la taille est réglée par un paramètre, le pas d'apprentissage. »⁷⁰ Ce paramètre peut avoir une incidence très importante sur le processus d'apprentissage : un pas trop grand peut empêcher la fonction de coût de se stabiliser sur un minimum et un pas trop petit peut ralentir considérablement le temps d'apprentissage et piéger la descente de gradient dans un minimum local.

L'ensemble des couples de vecteurs entrée/sortie utilisés pour la phase d'apprentissage constitue le corpus d'apprentissage. Il est nécessaire, afin que le réseau soit en mesure de généraliser correctement son apprentissage, de choisir un corpus représentatif du matériau à apprendre. Un corpus trop grand permettra au réseau d'apprendre par cœur mais diminuera ses capacités de généralisation, et un corpus trop petit l'empêchera de se représenter l'ensemble du matériau. Pour constituer un corpus d'apprentissage adéquat, il faut trouver le plus petit nombre d'exemples représentatifs du matériau à apprendre : « ... le problème essentiel est de trouver la taille minimum du corpus, si l'on désire s'assurer des capacités de généralisation du réseau. »⁷¹

En ce qui concerne les méthodes d'apprentissage non supervisées, nous avons vu que les réseaux de neurones réalisent un découpage topologique de l'espace des vecteurs d'entrée. Pour effectuer cette opération, le réseau doit être capable de traiter ces vecteurs selon des critères de ressemblance. Il va donc mesurer l'écart existant entre le vecteur d'entrée et le vecteur des poids synaptiques de chaque neurone. Cette mesure peut se faire grâce au produit scalaire entre les deux vecteurs ou par un calcul de

⁶⁹ Jean-Louis Amat, Gérard Yahiaoui, *Techniques avancées pour le traitement de l'information. Réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques*, op. cit., p. 112.

⁷⁰ Jean-François Jodouin, *Les réseaux neuromimétiques*, Paris, Editions Hermès, 1994, p. 57.

⁷¹ *Ibid.*, p. 44.

distance. Le neurone dont le vecteur des poids synaptiques est le plus proche du vecteur d'entrée est sélectionné et va modifier ses poids afin qu'ils ressemblent encore davantage au vecteur d'entrée. L'activation de ce neurone va influencer les neurones proches spatialement, afin qu'ils modifient également leurs coefficients synaptiques en fonction du vecteur d'entrée. Plus l'apprentissage avance et plus cette influence va se restreindre à un voisinage proche. Au final, le réseau structure sa topologie en répartissant graduellement le comportement des neurones sur la carte neuronale. Des groupes de neurones se définissent, et chaque groupe est sensible à une famille spécifique de vecteurs.

Dans le cadre de l'apprentissage non supervisé, il est possible d'intervenir sur un certain nombre de paramètres déterminants quant au comportement du réseau. Il est tout d'abord possible de faire varier le taux d'apprentissage qui va déterminer la vitesse à laquelle les neurones se spécialisent. Un taux d'apprentissage trop élevé peut entraîner des problèmes de non convergence, et un pas trop petit ne donne pas suffisamment de mobilité aux poids synaptiques des neurones ce qui peut également empêcher l'optimisation des performances du réseau⁷². En ce qui concerne les SOM, il est possible de modifier le voisinage pris en compte pour le neurone élu. Modifier ce paramètre permet d'influencer la construction topologique de la carte auto-organisatrice. Un grand voisinage permet de définir assez rapidement une topologie cohérente mais grossière. Un voisinage plus petit est nécessaire pour affiner la spécialisation de chaque neurone⁷³. Il est également possible de faire varier le biais qui va déterminer l'influence du neurone élu sur son voisinage. Si le taux d'apprentissage est le même pour le neurone élu et pour les neurones de son voisinage, le réseau ne parvient pas à s'auto-organiser. Il est donc indispensable de diminuer le taux d'apprentissage proportionnellement à la distance qui sépare un neurone du neurone élu⁷⁴.

Le type de mémoire que l'on rencontre dans les réseaux neuromimétiques possède deux propriétés fondamentales : on dit que cette mémoire est distribuée, et qu'elle est associative (ou adressable par le contenu).

⁷² *Ibid.*, p. 123.

⁷³ *Ibid.*, p. 129.

⁷⁴ *Ibid.*, p. 128.

« Un [...] moyen de récupérer de l'information dans une mémoire est de l'adresser par son contenu, c'est-à-dire par un code de même nature que l'information stockée elle-même. »⁷⁵ Comme nous venons de le voir, le processus d'apprentissage d'un réseau de neurones, quand il est supervisé, consiste à lui faire mémoriser des associations entre couples de vecteurs, c'est-à-dire à créer des connexions entre stimuli et réponses comportementales. Une fois l'apprentissage effectué, il faut, afin d'extraire une information mise en mémoire, présenter au réseau le vecteur d'entrée correspondant à cette information. Si le vecteur d'entrée est de même nature et de même dimension que le vecteur de sortie, on parle de mémoire auto-associative, dans le cas contraire, on parle de mémoire hétéro-associative.

On parle de mémoire distribuée parce que dans les réseaux de neurones, à l'inverse des mémoires locales où chaque donnée est localisée à un endroit précis, l'information est stockée par l'ensemble des synapses. La mémoire d'un réseau de neurone est la configuration générale de ses poids synaptiques : « ... chaque information est distribuée sur l'ensemble des éléments de corrélation que l'on appelle les synapses. »⁷⁶ Cette caractéristique est liée à la structure même du réseau, qui peut être qualifiée de « massivement parallèle »⁷⁷, et engendre la propriété fondamentale des réseaux neuromimétiques de « tolérance aux fautes »⁷⁸ En effet, la mémoire étant distribuée sur l'ensemble des poids synaptiques, la défaillance d'un neurone entraînera une baisse des performances du réseau, mais ne l'empêchera pas de fonctionner.

⁷⁵ François Blayo, Michel Verleysen, *Les réseaux de neurones artificiels*, op. cit., p. 36.

⁷⁶ *Ibid.*, p. 37.

⁷⁷ Jean-Louis Amat, Gérard Yahiaoui, *Techniques avancées pour le traitement de l'information. Réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques*, op. cit., p. 113.

⁷⁸ François Blayo, Michel Verleysen, *Les réseaux de neurones artificiels*, op. cit., p. 37.

1.2.3. Quelques exemples types de réseaux

Le Perceptron primitif⁷⁹ peut être considéré comme l'un des premiers réseaux de neurones et fut mis au point par Frank Rosenblatt⁸⁰ vers la fin des années 1950. Son principe de base repose sur la perception et la reconnaissance de stimuli. Rosenblatt voulait développer une méthode d'apprentissage afin que son réseau soit en mesure d'associer à une stimulation signifiante une réponse donnée. Sa structure est élémentaire et consiste en deux couches de neurones artificiels. La première appelée *rétine*, reçoit les informations provenant de l'environnement extérieur. En fonction de ces informations, la rétine transmet à la seconde couche, que l'on nomme *couche de sortie*, des messages susceptibles d'activer, selon leur importance, les neurones artificiels constituant cette seconde couche. Le réseau doit être configuré afin que la couche de sortie produise, en fonction d'une stimulation présentée sur la rétine, une réponse définie. Le modèle de neurone utilisé est celui de Mac Culloch et Pitts, ce qui fait de cette machine un séparateur linéaire, avec des capacités de généralisation intéressantes, mais ne pouvant résoudre les problèmes non linéairement séparables.

L'apprentissage du Perceptron primitif obéit à la règle de *Widrow-Hoff*, développée par Bernard Widrow⁸¹ et Ted Hoff⁸². Cette méthode s'applique à chaque neurone de la couche de sortie indépendamment des autres. Son application est simple : à chaque fois qu'un neurone se trompe, il modifie ses coefficients synaptiques pour tendre vers le bon état d'activation. L'ensemble des exemples d'apprentissage est présenté au réseau dans un ordre arbitraire, et chaque neurone va modifier indépendamment ses poids synaptiques suivant la réponse attendue.

Rosenblatt démontra dès 1962 que l'ajout de couches supplémentaires entre la rétine et la couche de sortie pouvait régler le problème de la non linéarité du Perceptron. On parle alors de Perceptron multicouche⁸³ ou PMC pour définir ce type d'architecture. Si l'ajout de couches cachées augmente les capacités du réseau, cela complexifie le

⁷⁹ Voir Annexe 1, 4. Le Perceptron, p. 160.

⁸⁰ Frank Rosenblatt, 1928-1971, ingénieur, a poursuivi de 1957 à 1961 une série de recherches à l'université de Cornell aux Etats-Unis sur les réseaux de neurones.

⁸¹ Bernard Widrow, né en 1929, professeur en ingénierie électronique à l'université de Stanford.

⁸² Edward Marcian Hoff, né en 1937, ingénieur en électronique, compte parmi les inventeurs du microprocesseur.

⁸³ Voir Annexe 1, 5. Le Perceptron multicouche, p. 162.

processus d'apprentissage. Il est en effet facile d'identifier les poids synaptiques responsables d'erreurs dans un réseau à deux couches. La tâche devient plus compliquée avec des réseaux multicouches.

La solution de ce problème d'apprentissage réside dans la fonction d'activation du neurone. La rétro-propagation du gradient de l'erreur qui permet de répartir la responsabilité de l'erreur sur l'ensemble des neurones du réseau (même cachés) ne peut être appliquée que si les neurones artificiels présentent des fonctions d'activation dérivables, ce qui n'est pas le cas des fonctions binaires. Il a fallu attendre le début des années 1980 pour voir se développer des réseaux utilisant des fonctions d'activation lissées, de type sigmoïde ou tangente hyperbolique, permettant ainsi la mise en place de méthodes d'apprentissage utilisant la rétro-propagation du gradient de l'erreur.

La méthode d'apprentissage utilisée pour les PMC est la minimisation itérative du critère de l'erreur en sortie. Le principe le plus couramment utilisé pour minimiser la fonction de l'erreur est la descente de gradient stochastique avec inertie.

Les PMC ont donc pu, grâce à cette nouvelle puissance de calcul et ce processus d'apprentissage efficace, investir certains champs d'application dans le domaine commercial : reconnaissance de forme, classification ou contrôle de processus.

Enfin, le modèle de Kohonen⁸⁴ est un réseau de type carte auto-organisatrice ou SOM (Self-Organizing Map). Teuvo Kohonen l'a développé en s'inspirant de la neurophysiologie animale. On observe en effet que certaines régions du cerveau se structurent en cartes topologiques, c'est à dire que le traitement de certaines informations spécifiques va être pris en charge par certaines zones spatialement identifiées.

La formalisation logicielle de ce phénomène donne lieu à des réseaux où des zones spatiales regroupent des neurones sensibles aux mêmes catégories de vecteurs. La « carte » neuronale se segmente en zones spécialisées, sensibles à certains stimuli particuliers.

⁸⁴ Voir Annexe 1, 6. Le réseau de Kohonen, p. 164.

L'apprentissage de ces réseaux est de type non supervisé. Comme nous l'avons vu, grâce à une mesure de l'écart existant, pour chaque neurone, entre le vecteur de ses poids synaptiques et le vecteur d'entrée, on renforce les connexions du neurone le plus réceptif, ainsi que celles de son voisinage. Ce type d'apprentissage permet donc de spécialiser certaines zones localisées afin qu'elles réagissent à certaines catégories de stimuli. Ainsi, la configuration synaptique du réseau reflète la topologie de l'espace des vecteurs d'entrée.

1.3. Réseaux de neurones et pratique musicale

1.3.1. Musique et connexionnisme

L'application des technologies neuromimétiques à l'univers musical est liée à certaines propriétés des réseaux de neurones : l'acquisition, la mémorisation, l'extraction et la généralisation.

L'acquisition est ce qui permet au réseau de neurones de percevoir son environnement. Il s'agit donc concrètement du codage de stimuli en vecteur d'entrée afin que le réseau puisse les percevoir et les traiter. La mémorisation est le processus permettant au réseau de modifier ses poids synaptiques afin de garder en mémoire des associations de vecteurs entrée/sortie ou les vecteurs d'entrée eux même. L'extraction est une manifestation extérieure de l'apprentissage du réseau, c'est à dire sa capacité à fournir une réponse apprise face à une stimulation donnée. Enfin, la généralisation du réseau constitue sa capacité à appliquer son apprentissage à des situations inconnues. Michel Bret⁸⁵ et Marie-Hélène Tramus⁸⁶ décrivent ce phénomène, lors d'un entretien publié dans la revue *Nouvelles de Danses*, concernant leur installation *Le funambule virtuel*⁸⁷. Dans ce dispositif, le spectateur interagit, au moyen d'un capteur de mouvements, avec un funambule virtuel projeté sur un écran face à lui. Ses mouvements déstabilisent le funambule virtuel qui cherche à retrouver son équilibre au moyen de postures préalablement mémorisées :

« Il y a une certaine connexion de neurones qui conduit vers la solution qu'on lui a apprise. Donc il n'y a aucun mouvement qui soit stocké en mémoire, mais il y a une configuration neuronale qui représente l'exemple appris et qui va actionner tout le corps et ses muscles virtuels, pour aller vers une solution gestuelle, et celle-ci n'est jamais exactement la même bien qu'elle s'approche de l'exemple appris et c'est cette variabilité qui nous a attirés. »⁸⁸

⁸⁵ Michel Bret, professeur émérite au département arts et technologies de l'image à l'université Paris 8.

⁸⁶ Marie-Hélène Tramus, professeur au département arts et technologies de l'image à l'université Paris 8.

⁸⁷ Marie-Hélène Tramus, Michel Bret, *Le Funambule*, Issy-les-Moulineaux, Festival 1^{er} contact, 2002.

⁸⁸ Patricia Kuypers, Florence Corin, « L'interactivité intelligente, Entretien avec Michel Bret et Marie-Hélène Tramus », dans *Contredanse*, n°52, 2004.

L'ensemble de ces propriétés forme ce qu'on appelle l'émergence, c'est à dire le phénomène à l'origine de l'apparition de nouvelles propriétés, de nouveaux comportements chez le réseau de neurones.

« Par le biais de l'architecture, le réseau doit donc organiser son calcul en un comportement cohérent par rapport à l'environnement. On nomme *émergent* ce comportement global du réseau, composé du comportement individuel et local de ses neurones. »⁸⁹

Appliquer la technologie neuromimétique au domaine de la création musicale suppose donc de faire émerger d'un réseau de neurones des comportements pertinents d'un point de vue musical. Il s'agit d'utiliser les propriétés des systèmes neuromimétiques, afin de traiter un matériau sonore. Pour ce faire, le système connexionniste peut traiter différents types de données ou de matériau : hauteur, registre, durée, timbre, intensité, harmonicité, densité spectrale, enveloppe d'amplitude. Tout paramètre permettant de contrôler de la synthèse sonore ou faisant sens d'un point de vue musical constitue un ensemble de données potentiellement traitables par un réseau de neurones.

La difficulté consiste à coder correctement ces paramètres. Une hauteur peut être codée de différentes manières : par une valeur de fréquence (La3 = 440), par une valeur numérique, correspondant à une note de la gamme chromatique (Do-1 = 1, Do#-1 = 2, etc.), ou bien par douze valeurs binaires correspondant chacune à une note de la gamme chromatique (Do = 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0), accompagnées d'une valeur de registre (0 = registre grave, 0.5 = registre medium, 1 = registre aigu). Une note MIDI⁹⁰ est par exemple relativement facile à coder, trois valeurs suffisent : la hauteur, la vélocité ainsi que la durée. Coder une succession de notes MIDI demande simplement d'ajouter aux trois valeurs précédentes une valeur indiquant la durée séparant une note de la suivante. Coder le spectre d'un son complexe s'avère beaucoup plus délicat. Cela suppose, pour chaque partiel, de coder la hauteur, l'énergie ainsi que la durée. La taille du vecteur d'entrée devient alors considérable dans un tel cas de figure. Ainsi, les compositeurs se doivent d'élaborer des stratégies de codage parfois relativement

⁸⁹ Jean-François Jodouin, *Les réseaux de neurones, principes et définitions*, op. cit., p. 20.

⁹⁰ « Musical Instrument Digital Interface », protocole de communication via un signal numérique standardisé.

complexes afin d'obtenir des comportements neuromimétiques intéressants d'un point de vue musical.

Nous allons distinguer trois domaines différents faisant appel aux technologies neuromimétiques dans une activité liée à l'univers musical. Premièrement, les applications neuromimétiques utilisées comme système d'aide à la composition. Les réseaux de neurones sont en effet capables de mémoriser certaines caractéristiques du style d'un compositeur et ainsi constituer une force de proposition pour la composition d'une œuvre. Deuxièmement, nous verrons que les réseaux de neurones peuvent être utilisés comme modèles permettant de mieux comprendre la cognition musicale. A travers différentes expériences, reposant notamment sur les capacités d'apprentissage et de généralisation de ces systèmes, les réseaux de neurones ont montré qu'ils pouvaient expliquer certains phénomènes psycho-acoustiques. Enfin, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux installations musicales électroacoustiques intégrant un système neuromimétique dans le processus de réalisation sonore de l'œuvre.

1.3.2. Applications musicales : aide à la composition et modèles de cognition

Dans son ouvrage, *Composition musicale et sciences cognitives, Tendances et perspectives*, Jocelyne Kiss décrit le fonctionnement d'un réseau de neurones développé par Mark Dolson, chercheur au département de recherche linguistique de Californie, pouvant offrir une aide à la composition⁹¹. Ce réseau est programmé pour reconnaître et choisir, parmi diverses propositions, les cellules rythmiques appartenant à un certain style. Il s'agit de développer chez lui une capacité de jugement dans une activité de discrimination sans avoir à détailler l'ensemble règles qui sous-tendent ce jugement. Les cellules rythmiques proposées sont d'une durée totale identique : une mesure à 4/4 ne contenant pas de durées inférieures à celle d'une croche, ainsi, il n'y a que huit positions temporelles possibles au sein de la mesure pouvant contenir une attaque ou un silence.

Cet exemple illustre donc un premier enjeu de la rencontre entre musique et connexionnisme. Néanmoins, l'élaboration d'un système d'aide à la composition nécessite :

« ... une connaissance intime des éléments caractéristiques du style de l'œuvre à réaliser, non pas seulement par l'entremise d'une mise en évidence de lois compositionnelles, mais aussi par l'élaboration d'une classification des éléments sonores perceptibles récurrents ou émergents. »⁹²

Les éléments stylistiques particuliers échappant aux règles compositionnelles générales, mais n'en restant pas moins déterminants dans l'esthétique générale de l'œuvre, doivent être pris en considération avec le plus grand intérêt dans le développement dans ce genre d'outils. Ainsi, beaucoup de réseaux connexionnistes de ce type ont été conçus pour assister la composition de musiques savantes « traditionnelles », étant donné l'étendue des connaissances en analyse concernant cette musique.

⁹¹ Jocelyne Kiss, *Composition musicale et sciences cognitives, Tendances et perspectives*, op. cit., p. 293.

⁹² *Ibid.*, p. 315.

Toujours dans le même ouvrage, Jocelyne Kiss se propose de développer un réseau de neurones artificiels capable d'imiter le style des *Klavierstück*⁹³ I à IV de Stockhausen⁹⁴. Le principe qu'elle utilise est le suivant : un générateur de rythmes propose au réseau de neurones différentes cellules, et ce dernier doit identifier, en fonction de son apprentissage, quelles sont les cellules qui appartiennent au style des études pour piano de Stockhausen.

L'architecture du réseau comporte trois couches. C'est un réseau non récurrent. La première couche est constituée de dix-neuf neurones, correspondant aux différentes possibilités rythmiques que l'on peut rencontrer dans les *Klavierstück*. La couche de sortie n'est composée que d'un seul neurone, étant donné que le but de ce filtre est d'identifier parmi les rythmes proposés, ceux qui s'apparentent au style de Stockhausen. Enfin, la couche cachée comporte cinq neurones. Cette configuration est le résultat d'une loi dite « loi pyramidale »⁹⁵, qui nous dit que si un réseau comporte n entrées et m sorties, alors le nombre optimal de neurones dans la couche cachée est égal à la racine de $m \times n$. L'apprentissage du réseau est de type supervisé et se fait de la manière suivante : cent quarante-quatre temps de mesures en 3/8 sont élaborés. Quatre-vingt-cinq d'entre eux vont servir pour la phase d'apprentissage et les cinquante-neuf restants seront utilisés pour la phase de test. Comme le réseau a pour objectif d'effectuer de la reconnaissance de forme, le processus d'apprentissage choisi est la minimisation itérative d'un critère de l'erreur en sortie par rétro-propagation. Après 110000 itérations avec un taux d'apprentissage de 0.45, le réseau parvient à un taux de reconnaissance de 78% sur de nouveaux vecteurs.

Une autre approche consiste à développer des automates connexionnistes comme modèles de cognition musicale : « On peut donc séparer [...] les réseaux neuronaux entre ceux qui servent comme modèles psychologiques de la cognition humaine et ceux qui

⁹³ Etudes pour piano composées par Karlheinz Stockhausen entre 1952 et 1953, créées à Darmstadt le 21 août 1954.

⁹⁴ Karlheinz Stockhausen, 1928 – 2007, compositeur allemand.

⁹⁵ Jocelyne Kiss, *Composition musicale et sciences cognitives, Tendances et perspectives*, op. cit., p. 337.

servent à construire des machines intelligentes. »⁹⁶ Jamshed J. Bharucha⁹⁷ et Katherine Olney⁹⁸ imaginent, dans *La musique et les sciences cognitives*, un automate capable de nous livrer des indices sur la manière dont un occidental perçoit la musique indienne. Ils éduquent un réseau afin qu'il puisse déterminer la nature de la tonalité à laquelle appartient une gamme diatonique majeure ou mineur harmonique. Une fois la phase d'apprentissage effectuée, le réseau est testé avec une série de rûgas⁹⁹ indiens. Ainsi, l'automate va associer à chacun de ces modes indiens une tonalité occidentale. Cette expérience nous permet de comprendre comment « l'oreille occidentale » se comporte face à la musique indienne, les associations que le cerveau effectue étant donné la contrainte du référentiel tonal. Ces résultats sont néanmoins à prendre avec précaution, étant donné le caractère extrêmement rudimentaire et limité de la modélisation de l'activité perceptive réalisée dans cette installation. Des expériences informelles réalisées avec des musiciens occidentaux ont cependant obtenu des résultats corroborant l'analyse effectuée à l'aide du réseau :

« ... les intuitions de musiciens occidentaux à l'écoute de *Bhairav* suggèrent que *Sa* est entendue plus comme une dominante que comme une tonique, et que *Ma* est la tonique qu'ils préfèrent [...] En accord avec les intuitions de nos informateurs occidentaux, *Bhairav* a activé un mode mineur avec *Ma* comme tonique. »¹⁰⁰

Cet exemple nous montre donc que les réseaux de neurones sont à même de nous livrer des indices permettant de faire avancer la compréhension de la cognition musicale. L'utilisation des automates connexionniste dans ce domaine dépasse évidemment le cadre de cette simple expérience et s'étend par exemple à l'étude de la construction de

⁹⁶ Jamshed J. Bharucha, Katherine Olney, « La cognition tonale, l'intelligence artificielle et les réseaux neuronaux », dans *La musique et les sciences cognitives*, Liège, Editions Pierre Mardaga, 1989, p. 480.

⁹⁷ Jamshed J. Bharucha, vice-président de l'université de Tufts aux Etats-Unis, professeur de psychologie au département de neurosciences, musique et psychologie.

⁹⁸ Katherine Olney, professeur pour le département de psychologie au Dartmouth College, Etats-Unis.

⁹⁹ « Mode de la musique savante de l'Inde, comprenant une échelle mélodique précise ayant un état « ascendant » et un état « descendant », ainsi qu'un ensemble de caractéristiques applicables à ses degrés, correspondant à un état d'esprit particulier ». Frédéric Platzer, *Petit lexique des termes musicaux*, Paris, Editions Ellipses, 2002, p. 100.

¹⁰⁰ Jamshed J. Bharucha, Katherine Olney, « La cognition tonale, l'intelligence artificielle et les réseaux neuronaux », dans *La musique et les sciences cognitives*, op. cit., p. 480.

schémas cognitifs chez l'auditeur, aux attentes musicales engendrées par ces schémas ou encore au caractère inné ou acquis de certains aspects de l'activité perceptive.

Toujours dans le domaine de la simulation d'activités cognitives, les réseaux de neurones peuvent également être utilisés pour effectuer de la reconnaissance de hauteur. Ian Taylor et Mike Greenhough, dans leur article « Modelling pitch perception with adaptative resonance theory artificial neural networks »¹⁰¹, nous proposent un système de reconnaissance de hauteur basé sur les réseaux de neurones. La méthode utilisée porte le nom d' « Adaptative Resonance Theory System » et consiste à présenter à un réseau de neurones la structure spectrale d'un son complexe extraite d'une transformé de Fourier¹⁰². Le réseau de neurones utilisé dans le présent article est baptisé ARTMAP, il s'agit d'une carte auto-organisatrice à apprentissage supervisé. Les deux auteurs nous expliquent que ces systèmes peuvent proposer un modèle plus performant que les modèles issus des théories récentes sur la reconnaissance de hauteur :

« Les réseaux de neurones, quand à eux, offrent une manière originale de construire des modèles harmoniques plus robustes. En entraînant le réseau avec une large variété de différents modèles spectraux, l'information nécessaire au processus de détermination de hauteur peut être extraite. Grâce à cet entraînement avec une large variété de hauteurs issues de différents instruments, le réseau de neurone peut devenir insensible aux variations de spectre, donc de timbre, pendant la détermination de hauteur. »¹⁰³

Les réseaux de neurones peuvent également être utilisés comme modèle de perception mélodique. Michael Page dans son article « Modelling the perception of musical sequences with self-organizing neural networks »¹⁰⁴ cherche à démontrer comment les

¹⁰¹ Ian Taylor, Mike Greenhough, « Modelling pitch perception with adaptative resonance theory artificial neural networks », dans *Musical networks*, Cambridge, Editions MIT Press, 1999.

¹⁰² Outil mathématique d'analyse permettant d'extraire le contenu fréquentiel d'un signal.

¹⁰³ « ANN's, on the other hand, offer an original way of constructing a more robust harmonic template. This is achieved by training the ANN with a wide variety of spectrally different patterns, so that the information relevant to the pitch-determination process can be extracted. Through this interaction with a large variety of pitches taken from different musical instruments the ANN can learn to become insensitive to spectral shape and hence timbre when determining pitch. » Ian Taylor, Mike Greenhough, « Modelling pitch perception with adaptative resonance theory artificial neural networks », dans *Musical networks*, op. cit., p. 7

¹⁰⁴ Michael P. A. Page, « Modelling the perception of musical sequences with self-organizing neural networks », dans *Musical networks*, Cambridge, Editions MIT Press, 1999.

technologies neuromimétiques peuvent constituer un modèle de perception de cellules mélodiques. En optimisant un système développé par A. L. Nigrin en 1992, le réseau SONNET 1, il nous explique la pertinence de l'approche connexionniste comme modèle de perception musicale. Selon lui, les réseaux de neurones de type cartes auto-organisatrices constituent de très bons modèles de perception : « Les réseaux auto-organisés à apprentissage non supervisé se prêtent bien à la modélisation de processus de perception. »¹⁰⁵

Ainsi, nous pouvons constater que les réseaux de neurones sont à même de mémoriser certains traits musicaux, comme le style d'un compositeur ou d'un genre musical, et ainsi de constituer un outil d'aide à la composition, et s'avèrent également capables de modéliser l'activité perceptive d'un sujet, permettant ainsi d'apporter des éléments de réponse aux interrogations concernant la cognition musicale.

¹⁰⁵ « Self-organizing networks that perform unsupervised learning are well suited to the modelling of perceptual processes. » Michael P. A. Page, « Modelling the perception of musical sequences with self-organizing neural networks », dans *Musical networks*, op. cit., p. 179.

1.3.3. Réseaux de neurones et processus de réalisation sonore

Une troisième pratique consiste à intégrer le réseau de neurones au sein du processus de réalisation sonore de l'œuvre. Cette pratique peut se décliner de nombreuses manières étant donné qu'il est possible de faire intervenir un traitement neuromimétique selon des modalités très variées, en différents lieux de la chaîne de production du matériau sonore, tout en sachant que cette dernière peut prendre des formes sensiblement différentes selon les dispositifs électroacoustiques. Cependant, l'étude de cette pratique révèle un certain nombre d'éléments récurrents, structurant plus ou moins les œuvres dont nous avons connaissance. Nous allons donc dresser un aperçu, non exhaustif, de différentes installations musicales pour réseaux de neurones afin d'illustrer cette pratique.

Prenons tout d'abord l'exemple de l'œuvre *Amplification/Synaptique*¹⁰⁶, réalisée par Frédéric Voisin et Jean-Luc Hervé. Cette pièce se décompose en trois parties. La première est la création de l'œuvre instrumentale *Amplification* de Jean-Luc Hervé, à Valence le 7 juin 2008. La seconde, est une diffusion de sons électroacoustiques dans le massif du Diois, obtenus par analyse/re-synthèse de chants d'oiseaux grâce à des réseaux de neurones de type cartes auto-organisatrices récurrentes oscillatoires ou ROSOM (Recurrent Oscillatory Self-Organizing Map). La dernière partie, qui a débuté le 18 novembre 2008, est une vaste analyse/synthèse en temps réel, à partir de la partition de la pièce musicale de Jean-Luc Hervé, réalisée par un noyau synaptique constitué de divers réseaux de neurones (SOM, ROSOM et PMC) ayant pour but de mémoriser les différents aspects stylistiques de l'œuvre, afin de la re-synthétiser. Apprentissage et synthèse ont lieu en même temps. La synthèse sonore est réalisée sur internet et une carte permettant de visualiser l'activation des neurones l'accompagne. Ce processus est prévu pour se déployer sur une année entière.

*Symphonie des machines*¹⁰⁷, est une seconde installation illustrant cette pratique, réalisée à Sophia Antipolis, par Frédéric Voisin et Robin Meier. Dans cette installation en plein air, des réseaux de neurones de type SOM sont programmés pour réaliser de la synthèse

¹⁰⁶ Frédéric Voisin, Jean-Luc Hervé, *Amplification / Synaptique*, Annecy, Festival des Musiques Inventives d'Annecy, 18 novembre 2008.

¹⁰⁷ Frédéric Voisin, Robin Meier, *Symphonie des machines*, Sophia Antipolis, Festival de la 4^{ème} dimension, 2006.

sonore en fonction de rythmes lumineux déclenchés par les auteurs du dispositif, et du comportement des autres réseaux. On retrouve un principe quasi identique dans l'installation *Caresses de marquises*¹⁰⁸, réalisée par les mêmes auteurs en 2004 à Paris¹⁰⁹. Chaque réseau de neurones de ce dispositif possède une architecture neuronale qui lui est propre. Durant l'exécution de l'œuvre, les réseaux neuromimétiques vont réagir à des rythmes lumineux projetés sur les marquises de la gare¹¹⁰. La réponse comportementale de chaque réseau, se manifestant ici sous forme de synthèse sonore, va également affecter le comportement des autres réseaux.

Nous pouvons ensuite citer l'installation *Last manœuvres in the dark*¹¹¹, à laquelle Frédéric Voisin et Robin Meier ont collaboré. Le dispositif se compose de trois cents microprocesseurs dotés de neurones artificiels, dissimulés dans des répliques de masques de *Darth Vader*¹¹², connectés à un ordinateur central. Cette installation consiste en un système génératif capable, à partir d'un catalogue d'environ deux cents morceaux de musique « pop-rock », de réaliser transcriptions, analyses, mixages, ainsi que d'apprendre les règles implicites contenues les morceaux susmentionnés, afin de réaliser la synthèse du « tube le plus sombre de tous les temps »¹¹³.

Frédéric Voisin a également réalisé *Préludes aux préludes*¹¹⁴, une performance au cours de laquelle un ROSOM apprend en temps réel à imiter le style de Laurence Coeytaux-Richard qui improvise au piano. Des capteurs MIDI installés sur le piano fournissent les données que l'agent connexionniste doit traiter. Au sein de ce dispositif, la pianiste interagit avec le réseau, elle est la source des réactions et de l'apprentissage de celui-ci. De plus, les modalités de cette interaction évoluent au cours du temps étant donné que le réseau apprend en temps réel. La représentation permet d'entendre les

¹⁰⁸ Frédéric Voisin, Robin Meier, *Caresses de Marquises*, Paris Gare de l'Est, Festival Nuit Blanche, 2004.

¹⁰⁹ Voir Annexe n°3, *Caresses de Marquises*, p. 171.

¹¹⁰ Voir Figure 10. Quais de la gare de l'Est à Paris, site de l'installation *Caresses de marquises*, p. 171.

¹¹¹ Fabien Giraud, Raphaël Siboni, *Last manœuvres in the dark*, Paris, Palais de Tokyo, Exposition Superdome, Été 2008.

¹¹² Voir Figure 13. Installation de *Last manœuvres in the dark*, p. 177.

¹¹³ Frédéric Voisin, <http://www.fredvoisin.com>, site administré par Frédéric Voisin, consacré à ses recherches et réalisations dans l'informatique musicale, mis à jour le 25/03/2010, consulté le 25/03/2010.

¹¹⁴ Frédéric Voisin, Laurence Coeytaux-Richard, *Préludes aux préludes*, Audincourt, Studio des trois oranges, 25 avril 2008.

improvisations du réseau prendre une certaine cohérence et se rapprocher du modèle d'apprentissage que constituent les improvisations de la pianiste.

Une collaboration entre la chorégraphe Myriam Gourfink¹¹⁵, le compositeur Kasper Toeplitz¹¹⁶ et Frédéric Voisin a donné lieu à la performance *L'écarlate*¹¹⁷. Dans cette œuvre, un réseau auto-associatif de type LVQ, ayant préalablement mémorisé les gestes d'une partition chorégraphique écrite par Myriam Gourfink, envoie à un réseau de type PMC, des données correspondant à la ressemblance entre l'interprétation effectuée par deux danseuses, et la partition de Gourfink. Les données concernant l'interprétation des deux danseuses sont saisies en temps réel par Laurence Marthouret via une interface numérique, et transmises au LVQ. Le PMC ayant préalablement appris des associations entre différentes données de ressemblance et la composition musicale de Toeplitz, contrôle de la synthèse sonore.

Nous citerons enfin *For Alan Turing*¹¹⁸ de Robin Meier¹¹⁹. Cette installation met en jeu deux agents neuromimétiques de type SOM. L'activité musicale du premier influence celle du deuxième qui cherche à l'imiter. La production musicale de chaque SOM est diffusée sur un haut-parleur distinct.

Le principe d'encodage, permettant de transcrire un matériau en vecteurs de scalaire, permet aux réseaux de neurones de traiter indifféremment n'importe quelles données, pourvu qu'elles soient codées correctement, et ainsi d'investir des tâches très diverses au sein de dispositifs électroacoustiques. Cependant, nous pouvons d'ores et déjà identifier certaines récurrences concernant ces installations. Les réseaux de neurones sont en effet systématiquement intégrés au cœur de programmes complexes, en tant que modules connexionnistes, afin de traiter des données provenant d'autres modules de ce programme. De manière générale, le module connexionniste joue un rôle d'intermédiaire entre une interface de contrôle produisant un matériau d'entrée, et un module de synthèse sonore récupérant les vecteurs de sortie du module connexionniste.

¹¹⁵ Myriam Gourfink, née en 1968, artiste chorégraphe française, directrice du Centre de Recherche et de Composition Chorégraphique (CRCC) à la Fondation Royaumont.

¹¹⁶ Kasper Toeplitz, né en 1960, compositeur français d'origine polonaise.

¹¹⁷ Myriam Gourfink, Kasper Toeplitz, Frédéric voisin, *L'écarlate*, Paris, Ircam, Festival Agora, 6 et 7 juin 2001.

¹¹⁸ Robin Meier, *For Alan Turing*, Nice, Festival MANCA, novembre 2004.

¹¹⁹ Voir annexe 2, *For Alan Turing*, p. 167.

Dans certaines installations, au sein du module connexionniste, différents agents neuromimétiques sont amenés à communiquer entre eux. Dans ce cas, les vecteurs de sortie d'un réseau de neurones peuvent être utilisés comme vecteurs d'entrée par d'autres réseaux. Le module de synthèse récupère les vecteurs de sortie provenant du module connexionniste et utilise les valeurs contenues dans ces vecteurs pour contrôler de la synthèse sonore.

Nous allons maintenant nous intéresser aux conséquences poïétiques induites par l'utilisation de systèmes neuromimétiques dans le processus de réalisation sonore d'une œuvre.

**2. Conséquences poïétiques induites par l'utilisation
d'agents neuromimétiques au sein du processus de
réalisation sonore d'une œuvre musicale**

2.1. Systèmes connexionnistes et processus de réalisation sonore

2.1.1. Ecriture du module connexionniste

Le module connexionniste impliqué dans le processus de réalisation sonore d'une installation musicale exige un travail d'écriture au même titre que l'instrument numérique. Nous avons vu qu'il existe différents modèles de réseaux de neurones possédant chacun différentes propriétés. Le compositeur doit donc penser la structure et le fonctionnement de son module connexionniste en relation étroite avec son idée musicale. Il doit déterminer le nombre de réseaux de neurones impliqués dans le traitement des données, leur type, leur taille, leur processus d'apprentissage ainsi que leurs modalités d'interaction. Ces choix sont définis par le type de traitement que le compositeur souhaite voir effectuer par le module connexionniste. Il doit donc également penser le codage des données que vont traiter les agents neuromimétiques, et la forme du vecteur de sortie qui fournira les valeurs nécessaires au contrôle de la synthèse sonore.

« J'aimerais insister ici sur une différence cruciale dans notre utilisation des SOM par rapport aux utilisations classiques. Contrairement à une démarche classique où on essaie d'obtenir un SOM qui a appris de façon optimale et dont on se sert afin d'analyser et de classifier ces données ce qui nous intéresse est le SOM en tant que mémoire dynamique soumise à une évolution continue : sa façon d'apprendre, sa façon d'oublier, ses incapacités d'imitation dans certains cas, ses effets d'interpolation lors de l'apprentissage, tout est exploitable musicalement et constitue un terrain vaste d'exploration empirique. »¹²⁰

Le développement de systèmes d'aide à la composition, de modèles de cognition ou de perception exige l'utilisation de systèmes neuromimétiques optimisés au maximum. Il en va de même en ce qui concerne l'utilisation des réseaux de neurones dans d'autres domaines comme la classification de données ou la reconnaissance de formes. Impliquer un réseau de neurones au sein du processus de réalisation sonore d'une œuvre suppose d'utiliser ces systèmes d'une manière sensiblement différente. L'intérêt ici, comme le

¹²⁰ Robin Meier, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, Paris, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de l'EHESS, dirigé par Jérôme Dokic, sous la tutelle de Frédéric Voisin alors responsable de la recherche sur le projet « Neuromuse » au CIRM, Centre National de Création Musicale, 2007, p. 91.

souligne Robin Meier, est de parvenir à créer des dynamiques d'apprentissage, de mémorisation et d'oubli, afin de proposer un matériau suffisamment riche. Montrer qu'un réseau de neurones a la possibilité de reproduire parfaitement un matériau sonore ne présente pas un grand intérêt esthétique. Explorer le matériau sonore qu'un système neuromimétique est capable de proposer tout au long de son processus d'apprentissage offre une richesse musicale nettement plus intéressante. Au cours d'un entretien¹²¹ avec Frédéric Voisin, ce dernier nous expliquait qu'il cherchait dans ses créations à diminuer la vitesse d'apprentissage des SOM, étant donné que l'efficacité de l'algorithme à la base de ces réseaux les amenait à optimiser leurs performances trop vite.

Dans cette optique, les compositeurs sont donc amenés à développer des modules connexionnistes, visant, par leur structure et leur fonctionnement, la diversité du matériau musical, plutôt que les performances de traitement du système.

Prenons l'exemple de *Caresses de marquises*. Le module connexionniste de cette installation se compose d'une population d'agents neuromimétiques, eux même composés de deux SOM, capables de communiquer l'un avec l'autre, grâce à une boucle rétroactive¹²². Le module connexionniste peut donc fonctionner de manière autonome, mais des paramètres de contrôle permettent d'influencer le comportement des deux réseaux. Ainsi, en jouant sur les rythmes lumineux, sur les paramètres du filtre perceptif, sur les lignes de retard, ainsi que sur les paramètres des deux SOM (taux d'apprentissage, voisinage, température), il est possible de créer des dynamiques d'apprentissage variées, et ainsi de modifier le comportement de la population d'agents neuromimétiques¹²³.

For Alan Turing de Robin Meier repose sur un système quasi équivalent¹²⁴. Le module connexionniste dans cette œuvre se compose d'un neurone seul fonctionnant sur le principe d'un SOM, dont la sortie est envoyée à un autre SOM de 25 neurones. Une série de vecteurs d'entrée est mise en boucle et transformée par le taux d'apprentissage et les poids synaptiques du premier neurone. Le second SOM doit imiter la sortie du neurone

¹²¹ Entretien avec Frédéric Voisin, Paris, 19/03/2010.

¹²² Voir Annexe 3, 3.1. Structure et fonctionnement de agents neuromimétiques, p. 173.

¹²³ Voir Annexe 3, 4. Paramètres de contrôle et comportement des agents, p. 174.

¹²⁴ Voir Annexe 2, 2. Principe de l'installation, p. 167.

isolé. En jouant sur le taux d'apprentissage du premier neurone, on fait varier la ressemblance entre la boucle des vecteurs d'entrée et celle des vecteurs de sortie. En jouant sur les paramètres du deuxième SOM, on lui permet d'imiter de manière plus ou moins proche la boucle des vecteurs de sortie du premier neurone¹²⁵. Le traitement consécutif des deux réseaux permet donc d'obtenir en sortie, en fonction des paramètres du module connexionniste, un matériau relativement éloigné du matériau d'entrée. C'est cette distance potentielle qui permet d'exploiter des dynamiques d'apprentissage intéressantes et ainsi obtenir un résultat sonore suffisamment riche et varié. Les vecteurs d'entrée constitués de trois valeurs (hauteur, vitesse, durée entre deux notes successives) codent pour une succession de notes MIDI. Dans ce cas, Robin Meier a fait le choix d'accorder la même importance à ces trois paramètres. Ainsi, le traitement effectué par le module connexionniste est réparti de manière égale sur chacun de ces trois paramètres. Il est cependant possible d'accorder plus d'importance à un paramètre, si l'on souhaite que le traitement effectué par le réseau l'affecte davantage, en faisant apparaître plusieurs fois sa valeur au sein du vecteur :

« Il est possible de donner plus d'importance à un paramètre en changeant la structure des vecteurs d'entrée pour le SOM. Par exemple, en encodant plusieurs fois la valeur pour la hauteur un poids statistiquement plus lourd peut être donné à ce paramètre particulier d'une note : [64, 64, 64, 50, 1242] : (3 fois la valeur 64 pour un mi, vitesse 50 et durée 1.242 secondes). »¹²⁶

Considérons enfin le cas de *Last Manœuvres in the dark*. Le module connexionniste de cette installation se compose tout d'abord d'un SOM ayant mémorisé parfaitement un large corpus de vecteurs d'entrée¹²⁷. La sortie de ce premier réseau est envoyée vers une population de 300 agents neuromimétiques. Chaque agent neuromimétique repose sur un réseau de neurones de type ROSOM¹²⁸. Ces réseaux particuliers ont la capacité de repérer et de reproduire des structures temporelles contenues dans un matériau. Des groupes d'agents sont définis afin de prendre en charge certaines catégories de vecteurs, et contrôlent ainsi différents synthétiseurs. Chaque groupe de ROSOM traite ainsi une catégorie de vecteurs correspondant à un instrument spécifique, et peut ainsi proposer

¹²⁵ Voir Annexe 2, 3. Paramètres du réseau et dynamiques d'apprentissage, p. 168.

¹²⁶ Robin Meier, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, op. cit., p. 90.

¹²⁷ Voir Annexe 4, 4.1. Segmentation de la base de donnée musicale et encodage, p. 179.

¹²⁸ Voir Annexe 4, 3. La carte auto-organisatrice récurrente oscillatoire ou ROSOM, p. 179.

en sortie une interprétation de la ligne instrumentale reçue en entrée, dont la ressemblance dépend des paramètres des agents neuromimétiques.

Dans ce module connexionniste, l'encodage permet de découper la base de données musicale en différents éléments remarquables. Le traitement du premier SOM, grâce à sa structure topologique permet de recomposer une entité musicale par mesure de ressemblance entre les vecteurs. La population d'agents neuromimétiques permet de traiter cette entité musicale recomposée et d'en proposer une interprétation plus ou moins proche. Ce module fait donc appel à différentes propriétés neuromimétiques propres à différents types de réseau : la structuration topologique et la capacité de catégorisation des SOM, les capacités de mémorisation des structures temporelles des ROSOM, les capacités de variation par rapport à un modèle propres à la plupart des réseaux de neurones.

Ces premiers exemples nous permettent d'illustrer les choix qui s'offrent au compositeur lors du développement d'un module connexionniste. Chaque réseau possède différentes propriétés qui induisent des contraintes spécifiques dont il faut tenir compte lors du travail de composition. Réciproquement la nature de la tâche que l'on souhaite voir effectuée par le module connexionniste engendre également des contraintes dans la programmation et l'élaboration d'une structure adaptée lui permettant de réaliser la tâche en question. Il existe donc une très forte relation d'interdépendance entre la composition et l'élaboration du module connexionniste mis en œuvre dans une installation. Nous avons pu constater que les installations citées en exemple font exclusivement intervenir des réseaux de neurones de type SOM, en considérant que le ROSOM en est une déclinaison. L'algorithme à la base de ces réseaux est en effet particulièrement performant. Les SOM peuvent converger très vite lors de la phase d'apprentissage, ce qui en fait des systèmes réactifs, qui demandent moins de puissance de calcul pour leur fonctionnement que d'autres réseaux. Ainsi, les SOM s'adaptent très bien au temps réel, ce qui en fait des outils privilégiés dans les installations musicales intégrant un système connexionniste dans le processus de réalisation sonore. La faible puissance de calcul qu'ils requièrent permet également de les intégrer en nombre au sein d'un module connexionniste, afin de créer des interactions entre les agents neuromimétiques, et ainsi de développer des dynamiques d'apprentissage plus complexes. Le travail de composition au sein de cette pratique

consiste donc à écrire, dans un premier temps, le processus d'apprentissage des agents neuromimétiques constituant le système connexionniste, et dans un deuxième temps les dynamiques d'apprentissage du système autorisées par les interactions entre les agents.

2.1.2. Ecriture du programme : interface de contrôle et module de synthèse sonore

Comme nous l'avons vu dans notre premier chapitre, les technologies numériques constituent un nouvel outil de la lutherie permettant au compositeur de créer et de programmer le comportement d'un instrument. Les réseaux de neurones s'intègrent dans ce nouvel « outillage » à la disposition du compositeur. Mais un réseau de neurones ne constitue pas à lui seul un instrument, il est généralement intégré au sein d'un dispositif informatique plus vaste, au sein duquel il collabore avec d'autres applications ou modules afin de produire une création musicale. Nous avons vu que de manière générale, le module connexionniste s'inscrit au sein de l'installation comme un intermédiaire entre une interface de contrôle et un module de synthèse sonore. Ces deux éléments font l'objet d'une écriture au même titre que le module connexionniste et doivent être pensés en étroite relation avec ce dernier.

L'utilisation d'agents connexionnistes au sein du processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale rend indissociable les connaissances scientifiques, techniques et artistiques. « Tout en faisant partie du cadre objectif, il faut que la technologie entretienne une dialectique très serrée avec les structures psychologiques du créateur, pour que l'œuvre puisse voir le jour. »¹²⁹ L'artiste est amené à trouver un compromis entre ce que son œuvre exige d'un point de vue technique, ses connaissances en informatique musicale et le résultat esthétique auquel il aspire. « La conception technique est inséparable de la création artistique, en ce sens que nous procédons « interactivement » par des échanges constants entre l'étude théorique, la programmation technique et l'expérimentation artistique. »¹³⁰

Dans les installations intégrant un traitement connexionniste dans le processus de réalisation sonore de l'œuvre, on peut distinguer deux types d'interfaces. Une première qui permet à un utilisateur de contrôler certains paramètres du module connexionniste.

¹²⁹ Ricardo Mandolini, « L'idéologie numérique, vers une uniformité d'expression ? », dans *Musiques, arts et technologies, Pour une approche critique*, Paris, Editions L'Harmattan, 2004, p. 178.

¹³⁰ Alexandre Gherban « Entretien avec Michel Bret », <http://www.automatesintelligents.com/art/2002/nov/bret.html>, Novembre 2002, site administré par les rédacteurs en chef Jean-Paul Baquiast, membre du bureau de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA), et Christophe Jacquemin, docteur en géophysique, enseignant à l'Université de Paris VII, consacré à la transmission et à la vulgarisation des travaux concernant les automates intelligents, mis à jour le 03/12/2007, consulté le 25/03/2010.

Une seconde qui constitue l'outil permettant l'acquisition de stimulations provenant de l'environnement extérieur, et leur transcription en matériau analysable par le module connexionniste sous forme de vecteurs d'entrée. Nous parlerons d'interface d'acquisition pour définir cette seconde catégorie. Les interfaces d'acquisition, à la différence des interfaces de contrôle ne sont pas nécessairement interactives. Cependant, le déclenchement des stimuli amenés à être traités par l'interface d'acquisition peut être intégré à l'interface de contrôle.

Elles peuvent être inexistantes, comme c'est le cas dans *Last manoeuvres in the dark*, où le processus permettant de présenter un vecteur d'entrée au module connexionniste est automatisé. Les réglages des paramètres de contrôle des réseaux de neurones sont également automatisés. L'œuvre est ainsi entièrement autonome et ne subit aucune influence de l'environnement extérieur. L'environnement avec lequel interagit le module connexionniste est préalablement codé sous forme de vecteurs et stocké dans le système.

Lorsqu'elles sont présentes, les fonctions des interfaces de contrôle et d'acquisition sont déterminées par les aspirations du compositeur. Il compose les possibilités d'interaction avec le système, en donnant la possibilité à son utilisateur d'intervenir sur différents paramètres. Leur écriture est d'ailleurs en grande partie déterminée par les sujets qui vont être amenés à interagir avec le système.

L'écarlate est une performance intéressante en ce qui concerne les interfaces de contrôle et d'acquisition. Les données fournies au module connexionniste proviennent d'une interface d'acquisition, développée en Lisp¹³¹ pour l'occasion, appelée « masque de saisie », dans laquelle Laurence Marthouret note en temps réel les résultats de son analyse du mouvement des deux danseuses. En revanche, en ce qui concerne les paramètres des réseaux de neurones, aucune interface de contrôle spécifique n'est développée. Frédéric Voisin intervient donc directement dans le code des deux réseaux afin de modifier leurs paramètres¹³². En ce qui concerne cette performance, on peut constater que l'écriture des interfaces de contrôle et d'acquisition est déterminée par leurs utilisateurs. La transcription des données provenant de l'analyse de Laurence

¹³¹ Langage de programmation impératif.

¹³² Entretien avec Frédéric Voisin, Paris, 19/03/2010.

Marthouret en vecteurs d'entrée nécessite une interface d'acquisition ergonomique lui permettant intuitivement de transmettre les résultats de son analyse au module connexionniste. En revanche, le contrôle des paramètres des réseaux de neurones étant effectué par le programmeur du système lui-même, à savoir Frédéric Voisin, une interface de contrôle adaptée n'est pas indispensable, étant donné que ses connaissances lui permettent d'intervenir directement dans le code du programme.

En ce qui concerne les installations *Caresses de marquises* et *Symphonie des machines*, le fonctionnement des interfaces de contrôle et d'acquisition est identique. L'interface de contrôle permet dans ces deux installations de contrôler les lumières disposées sur les marquises de la gare. Chaque projecteur fonctionne comme un oscillateur et clignote une fois par cycle. Il est donc possible de régler la fréquence, la phase et l'intensité de chaque oscillateur. De fait, interface de contrôle et interface d'acquisition sont mêlées étant donné que l'interface permettant de modifier les paramètres des rythmes lumineux envoie dans le même temps au module connexionniste des vecteurs correspondant à cette activité lumineuse. L'environnement du module connexionniste est donc contrôlé par les artistes, qui contrôlent également les paramètres des agents neuromimétiques, à savoir : taux d'apprentissage, voisinage, température, filtre perceptif, lignes de retard, ainsi que l'horloge interne des agents déterminant la vitesse à laquelle ces derniers perçoivent et traitent les vecteurs d'entrée. Dans la performance *Préludes aux préludes*, une interface de contrôle permet à Frédéric Voisin de contrôler les paramètres du ROSOM : température, et paramètres liés à l'apprentissage. Les improvisations de Laurence Coeytaux-Richard constituent l'environnement du module connexionniste qui est perçu grâce à une interface d'acquisition matérialisée ici par des capteurs MIDI installés sur les touches du piano.

L'écriture du module de synthèse sonore s'approche plus selon Robin Meier d'un travail de création musicale traditionnel¹³³. Il s'agit en effet de trouver une transcription sonore intéressante des vecteurs de sortie du module connexionniste. Les valeurs contenues dans le vecteur de sortie vont en effet permettre de contrôler certains paramètres de synthèse sonore, il faut donc trouver «... un mapping musicalement intéressant... »¹³⁴. Ce

¹³³ Robin Meier, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, op. cit., p. 102.

¹³⁴ *Ibid.*, p. 102.

mapping, cette transcription doit donc permettre de rendre compte d'un point de vue sonore, du comportement du module connexionniste.

Dans *For Alan Turing*, les valeurs contenues dans les vecteurs de sorties codent, comme pour les vecteurs d'entrée, une succession de notes MIDI. Le vecteur comporte trois valeurs : une pour la hauteur, une pour la vélocité et une pour la durée séparant une note de la suivante. Dans *l'Ecarlate*, les vecteurs de sortie obtenus du module connexionniste permettent de contrôler la fréquence et l'amplitude d'oscillateurs, ainsi que la durée des sons produits via ces oscillateurs. Les vecteurs de l'installation *Last manœuvres in the dark*, codent pour la hauteur d'une note, le registre associé à cette note, ainsi que la position et la durée de la note dans une mesure à 4/4. Chaque vecteur est ainsi exprimé musicalement via une version logicielle d'un synthétiseur numérique. Les vecteurs utilisés pour l'installation *Caresses de marquises* permettent de contrôler différents types de synthèse sonore selon les agents neuromimétiques : synthèse additive, synthèse par modulation de fréquence, déclenchement d'échantillons préparés et resynthèse vocale. Dans notre projet pratique¹³⁵, nous utilisons un vecteur constitué de dix valeurs pour coder des fréquences d'oscillateurs, des enveloppes d'amplitude ainsi que les durées de ces enveloppes afin de contrôler de la synthèse additive. La synthèse sonore effectuée dans la troisième partie *d'Amplification / Synaptique* est réalisée par modulation de fréquences via trois synthétiseurs *ad hoc* développés sous Puredata¹³⁶.

Ainsi nous pouvons voir que les interfaces de contrôle et les modules de synthèse sonore font l'objet d'un travail d'écriture au même titre que le module connexionniste. La programmation du module de synthèse sonore s'apparente d'ailleurs fortement au travail d'écriture de l'instrument défini par Bruno Bossis. C'est en effet l'écriture du comportement de ce module qui définit le potentiel esthétique de l'œuvre. Nous avons vu que la programmation de ces deux modules était fortement dépendante du module connexionniste. Les interfaces de contrôle que l'on rencontre dans cette pratique permettent généralement de contrôler les paramètres des agents neuromimétiques, et éventuellement de transmettre directement des vecteurs d'entrée au module

¹³⁵ Voir Volume des Annexes, 4.3. Le module de synthèse sonore.

¹³⁶ Logiciel de programmation à interface graphique développé par Miller Puckette.

connexionniste. Lorsque les vecteurs d'entrée ne sont pas déclenchés par un utilisateur, les stimuli provenant d'un environnement défini par le compositeur sont codés et transmis aux agents neuromimétiques via une interface d'acquisition. Le module de synthèse sonore quant à lui constitue le programme permettant d'exprimer musicalement les différents comportements du module connexionniste. La transcription du vecteur de sortie en matériau sonore doit se plier à une double exigence : elle doit refléter les dynamiques d'apprentissage des réseaux de neurones et présenter un intérêt esthétique.

2.1.3. Langage de programmation, expérimentations et optimisation

L'écriture d'un système composé d'une interface de contrôle, d'un module connexionniste et d'un module de synthèse sonore suppose de faire des choix en termes de langage de programmation. Chaque langage informatique possède une ergonomie qui lui est propre et induit certaines conséquences quant à la formalisation d'un programme. Nous allons voir que les compositeurs élaborent différentes stratégies de programmation dans le cadre de la création d'œuvres musicales impliquant un module connexionniste dans le processus de réalisation sonore de l'œuvre.

La nature des réseaux de neurones amène souvent les programmeurs à utiliser des langages de programmation orientés objet¹³⁷(C++ ou Max/MSP¹³⁸ par exemple). L'automate développé par Jocelyne Kiss dans son ouvrage, *Composition musicale et sciences cognitives, Tendances et perspectives*, est programmé en C++¹³⁹. Ce choix est motivé par deux raisons. Premièrement, la volonté de réaliser un automate composé de différents modules a conduit le développement vers un langage de programmation orienté objet. La programmation orientée objet consiste en une fonction principale constituée d'un assemblage d'objets obéissants à des fonctions secondaires. Deuxièmement, le C++ est un langage répandu et très documenté. Pour cette réalisation, Jocelyne Kiss s'inspire d'ailleurs de l'ouvrage suivant : *Object-oriented Neural Networks in c++*¹⁴⁰ de Joey Rogers. La première motivation obéit donc aux exigences techniques de l'œuvre, tandis que la seconde obéit aux compétences du développeur en informatique.

Il est cependant possible d'utiliser d'autres langages de programmation pour développer un réseau de neurone. Dans *L'Ecarlate* et *Amplification / Synaptique*, les réseaux de neurones sont programmés en Lisp. Robin Meier a développé un SOM à géométrie variable sous Jitter (« jit.robosom ») dans Max/MSP qui est utilisé dans *For Alan Turing* et *Caresses de marquises*. Dans *Symphonie des machines*, les agents

¹³⁷ Langage de programmation basé sur le développement d'applications par mise en relation d'objets, c'est à dire de briques logicielles possédant un certain nombre de propriétés.

¹³⁸ Langage de programmation à interface graphique.

¹³⁹ Jocelyne Kiss, *Composition musicale et sciences cognitives, Tendances et perspectives*, op. cit., p. 331.

¹⁴⁰ Joey Rogers, *Object-oriented Neural Networks in c++*, San Diego, Editions Academic press INC, 1997.

neuromimétiques sont développés en Lisp et en Python¹⁴¹. Les ROSOM utilisés dans *Last manoeuvres in the dark* sont programmés en C¹⁴².

En ce qui concerne les interfaces de contrôle et les modules de synthèse sonore, on retrouve majoritairement les logiciels Max/MSP et Puredata. Ces deux logiciels de programmation à interface graphique permettent effectivement de développer, de manière assez intuitive, des applications interactives destinées à contrôler des données audio, vidéo ou MIDI. Les interfaces de contrôle ainsi que les modules de synthèse sonore de *For Alan Turing* et *Caresses de marquises* sont réalisées dans Max/MSP. Les interfaces de contrôle de *Symphonie des machines* sont réalisées dans Puredata et Max/MSP, le module de synthèse sonore sous Max/MSP. Le module de synthèse sonore d'*Amplification / Synaptique* est réalisé sous Puredata. L'interface de contrôle ainsi que le module de synthèse sonore de *Préludes aux préludes* est réalisé dans Max/MSP. Seule *L'écarlate* présente une exception, étant donné que l'interface d'acquisition est programmée en Lisp. Aucune interface ne permet de contrôler les paramètres des réseaux, le contrôle se fait donc en intervenant directement dans le code source. Le module de synthèse sonore est quant à lui réalisé sous Max/MSP.

L'utilisation d'agents neuromimétiques au sein d'un dispositif de musique électroacoustique suppose de nouvelles stratégies de production. Mandolini Ricardo¹⁴³ distingue deux étapes dans la poïésis de l'œuvre électroacoustique. Une première consistant à établir une représentation interne de l'œuvre, porteuse d'un certain nombre d'objectifs. Une seconde visant à formaliser cette représentation interne par le biais de l'expérimentation : « Il y a d'abord un cadre objectif de conditions préalables qui sert de point d'appui à l'imagination, où le projet d'œuvre se tisse. Il y a ensuite un temps d'incorporation de ce cadre, à travers l'expérimentation et la pratique. »¹⁴⁴

¹⁴¹ Langage de programmation orienté objet.

¹⁴² Langage de programmation impératif.

¹⁴³ Ricardo Mandolini, né en 1950, compositeur italo argentin résidant en France, professeur des Universités, responsable du Studio de Musique Électroacoustique du Nord du Département d'Études Musicales (Université Lille III) et Chercheur associé au Centre d'Etude des Arts Contemporains.

¹⁴⁴ Ricardo Mandolini, « L'idéologie numérique, vers une uniformité d'expression ? », dans *Musiques, arts et technologies, Pour une approche critique*, op. cit., p. 177.

L'utilisation de réseaux de neurones dans ce type d'installations induit donc certains changements dans cette seconde étape de la création qui consiste à formaliser l'œuvre à travers l'expérimentation. Une fois la représentation interne de l'œuvre établie, le fonctionnement général du programme imaginé, la structure du module connexionniste choisie, la formalisation informatique de ces différents éléments suppose un temps d'expérimentation, qui constitue l'une des difficultés de cette entreprise. La complexité des réseaux de neurones, le temps nécessaire à leur apprentissage ne facilitent pas les expérimentations et l'optimisation de ces outils en cas de résultats non satisfaisants. Nous allons voir que le choix du langage de programmation est alors déterminant.

Nous avons pu constater, lors du développement de notre projet, que la formalisation d'un réseau de neurones comporte un certain degré d'inertie. En d'autres termes, une fois le système fonctionnel, certaines formalisations permettent de modifier plus facilement la structure du réseau que d'autres. Ce degré d'inertie est déterminant durant la phase d'expérimentation du système connexionniste. Il existe différents moyens de gérer ce phénomène, notamment en choisissant un langage de programmation adéquat.

Il est ainsi possible de développer des réseaux de neurones à géométrie variable. C'est le cas du SOM développé sous Jitter par Robin Meier¹⁴⁵ et utilisé dans l'installation *Caresses de marquises* : « Les Avatit étaient réalisés dans l'environnement Jitter de MaxMSP (Cycling'74) qui, s'il n'était pas optimal en termes de calcul, en facilitait l'expérimentation au sein d'un environnement de production musicale. »¹⁴⁶ La formalisation d'un réseau de neurones sous Max/MSP Jitter n'est effectivement pas le meilleur choix en termes de vitesse de calcul, mais cet environnement se prête plutôt bien au développement de modèles à géométrie variable, étant donné l'aspect graphique et interactif de la programmation. Ainsi, l'objet « jit.robosom » développé par Meier permet d'expérimenter différentes tailles de réseau, différentes tailles de vecteurs et de contrôler assez facilement les paramètres du réseau (température, taux d'apprentissage et voisinage). Ces propriétés permettent au compositeur d'expérimenter différentes configurations de son système avant de choisir la configuration idéale.

¹⁴⁵ « jit.robosom » : carte auto-organisatrice à géométrie variable développée sous Jitter par Robin Meier sous forme d'abstraction MaxMSP.

¹⁴⁶ Robin Meier, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, op. cit., p. 98.

Les formalisations neuromimétiques via des langages de programmation en lignes de code (Python, Lisp, ou C), comme on en trouve dans *Last manœuvres in the dark* et *Symphonie des machines*, se prêtent beaucoup moins aux expérimentations étant donné qu'ils présentent un degré d'inertie plus élevé. Il est possible d'implanter ces réseaux sous forme de module dans Max/MSP afin d'en contrôler les paramètres (taux d'apprentissage, température, voisinage) via une interface de contrôle, comme c'est le cas dans *Symphonie des machines*, mais modifier leur architecture suppose d'en modifier le code. Ainsi, utiliser ce type de formalisation suppose pour le compositeur d'être déjà familiarisé avec ce type de systèmes, et de posséder de bonnes connaissances en informatique, afin de pouvoir effectuer des modifications dans le code du réseau de manière assez intuitive. C'est par exemple le cas de Frédéric Voisin dans *l'Ecarlate*, où ses connaissances du langage Lisp, qui s'avère être un langage relativement souple, lui permettent d'intervenir en temps réel dans le code des réseaux de neurones pour en modifier les paramètres.

Les langages de programmation en lignes de code s'avèrent en revanche beaucoup plus intéressants en termes de vitesse de calcul, et quasiment incontournables au sein de modules connexionnistes présentant une large population d'agents neuromimétiques. C'est par exemple le cas de *Last manœuvres in the dark* et *Symphonie des machines*. Il est d'ailleurs intéressant de voir que pour l'installation *Caresses de marquises*, réalisée en 2001, les agents neuromimétiques sont formalisés grâce au « jit.robosom » de Meier, et que pour l'installation *Symphonie des machines*, réalisée en 2006, reprenant le même système que *Caresses de marquises* avec une population d'agents neuromimétiques considérablement plus élevée, le codage est réalisé en Lisp et en Python. Les dimensions de la deuxième réalisation exigent une puissance de calcul plus élevée, donc un langage de programmation en lignes de code. Les difficultés en termes d'expérimentation que peuvent poser les réseaux de neurones programmés en lignes de code, surtout compte tenu de la taille de la population d'agents neuromimétiques dans cette installation, est relativisée étant donné que nos deux auteurs ont déjà expérimenté ce système.

Il existe également des modèles de réseaux de neurones programmés en ligne de code dont l'architecture est à géométrie variable. Joey Rogers, dans son ouvrage *Object-oriented Neural Networks in c++*, dont s'inspire Jocelyne Kiss pour développer son réseau de neurones, propose une méthode pour programmer des réseaux dont la structure, la

taille et les modalités d'apprentissage peuvent être modifiés selon les résultats obtenus : « Il était en effet, important de pouvoir modifier les caractéristiques générales du (ou des) réseau(x) lié(s) à l'exemple, en cas d'échec flagrant de sa (leur) mise en œuvre ; cette constatation imposait donc la donnée d'une architecture à géométrie variable... »¹⁴⁷.

Ainsi, nous avons pu voir que la phase d'expérimentation, concernant les installations musicales intégrant un traitement connexionniste au sein du processus de réalisation sonore de l'œuvre, constitue une difficulté potentielle dans le processus poïétique étant donné que la complexité des systèmes neuromimétiques peut engendrer une certaine inertie dans cette phase du travail du compositeur. Nous avons cependant constaté que les modèles à géométrie variable pouvaient apporter une solution à ce problème, même si sur le long terme, le travail avec les systèmes neuromimétiques suppose d'acquérir des connaissances, tant sur la théorie de cette technologie, que sur les langages de programmation permettant de la formaliser. Nous avons effectivement vu dans notre première partie qu'il était primordial pour le compositeur de s'approprier l'outil technologique, afin que ce dernier soit au service du discours musical, et ne constitue pas une contrainte. A ce titre, l'étude des applications musicales des réseaux de neurones est un travail de longue haleine :

« Les expériences de la Nuit Blanche et du Festival de la quatrième dimension ont montré la nécessité de répéter et de conduire des expériences *in situ* à grande échelle afin de pouvoir évaluer et apprendre à contrôler les dynamiques complexes de ces systèmes. Nous nous retrouvons ici dans la situation similaire à celle d'un musicien travaillant son instrument, même si malheureusement les contraintes temporelles et budgétaires souvent ne nous permettent pas d'y consacrer suffisamment de temps. Pour cette raison, Frédéric Voisin et moi-même travaillons actuellement à la mise en place d'un *cluster* constitué d'un vingtaine d'ordinateurs de bureau dans une cave en banlieue de Paris. »¹⁴⁸

Frédéric Voisin nous expliquait, lors de notre entretien, qu'il envisageait sa pratique musicale avec les réseaux de neurones, qu'il expérimente depuis bientôt dix ans, comme un travail de recherche visant comprendre les particularités des différentes

¹⁴⁷ Jocelyne Kiss, *Composition musicale et sciences cognitives, Tendances et perspectives*, op. cit., p. 338.

¹⁴⁸ Robin Meier, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, op. cit., p. 119.

formalisations neuromimétiques possibles et l'intérêt que présentent ces différents modèles au sein d'une application musicale, afin de développer des systèmes neuromimétiques plus riches, induisant des dynamiques d'apprentissage et des applications sonores plus variées.

2.2. Installations musicales pour réseaux de neurones : nouveaux enjeux au sein du dispositif

2.2.1. Apprentissage neuromimétique et systèmes compositionnels : spécificité des musiques électroacoustiques

L'apprentissage des automates connexionniste, étant donné leur nature, ne nécessite pas l'énumération exhaustive de l'ensemble des règles auxquelles ces derniers sont soumis. Il se trouve donc que les réseaux de neurones se prêtent plutôt bien à la modélisation de processus compositionnels ne permettant pas de dégager un ensemble complet de règles opérantes, comme c'est parfois le cas dans la musique électroacoustique :

« Lorsque l'on tente d'élaborer ce type de modélisation en vue de reproduire un élément du processus compositionnel dans un genre [...] qui appartiendrait à celui de la musique contemporaine, l'impossibilité de proposer une théorie ou parfois même une ébauche d'analyse, suggère l'utilisation des outils connexionnistes. »¹⁴⁹

Les réseaux de neurones semblent donc à même de modéliser des processus poïétiques pour lesquels le corpus d'analyse est relativement restreint. Cependant, les systèmes connexionnistes sont à même de révéler des éléments indésirables, sous-jacents mais récurrents au sein de ces processus poïétiques. L'analyse du matériau modèle, sans être nécessaire, s'avère malgré tout déterminante, à condition de ne pas se limiter à un seul modèle d'analyse, afin d'établir un corpus de vecteurs d'entrée adéquat.

Dans le cadre du développement de systèmes d'aide à la composition ou d'expériences sur la cognition musicale, l'optimisation des agents neuromimétiques est indispensable. La constitution d'un corpus d'apprentissage pour de tels automates peut s'avérer très difficile. Plus l'œuvre est hétérogène et complexe, d'un point de vue stylistique, plus il est difficile de constituer un corpus représentatif de ses spécificités remarquables :

¹⁴⁹ Jocelyne Kiss, *Composition musicale et sciences cognitives, Tendances et perspectives*, op. cit., p. 327.

« Ainsi faudra-t-il en effet, que l'œuvre présente un trait général « d'homogénéité », c'est à dire que pour des choix musicologiques donnés [...] il n'y ait pas trop de « singularités » [...] de nature à dérouter le réseau au cours de sa tâche de discrimination. »¹⁵⁰

Le réseau que Jocelyne Kiss se propose de développer dans son ouvrage à pour but d'imiter le style des quatre premiers *Klavierstück* de Stockhausen. Le choix de ces pièces n'est pas innocent. En effet, ces pièces sont toutes pour piano et l'unité du timbre permet de réduire la liste des paramètres musicaux à prendre en compte. En ce qui concerne le système de composition utilisé par Stockhausen, les séries de hauteurs sont variées selon un principe de changement d'octave, ce qui apporte une simplification dans l'élaboration du corpus d'apprentissage. Ensuite, le régime des durées se construit sur un principe arithmétique, ce qui diminue encore une fois la quantité de paramètres à considérer.

En ce qui concerne les installations intégrant un traitement connexionniste dans le processus de réalisation sonore de l'œuvre, la problématique est généralement différente. Les problèmes de non-convergence du système neuromimétique, de sur-généralisation ou d'oubli peuvent être à l'origine de situations musicales très intéressantes :

« Dès que nous nous intéressons à ces dynamiques d'un réseau de neurones, des valeurs traditionnelles telles que l'erreur changent de signification et cessent d'être des critères d'évaluation pertinents pour la "fitness". Suivant le contexte musical, un grand taux d'erreur peut engendrer des comportements tout à fait souhaitables et intéressants. »¹⁵¹

La difficulté que constitue la modélisation de processus compositionnel n'intervient dans ce type d'installation que lorsque le système connexionniste est développé afin d'imiter le style d'une ou plusieurs œuvres. C'est le cas par exemple de *Préludes aux préludes*, ou un ROSOM est développé afin d'imiter les improvisations d'une pianiste dans un style de musique tonale. C'est également le cas de *Last manœuvres in the dark* où le système connexionniste est amené à produire des improvisations musicales dans un style défini par une base de données musicale constituée de morceaux de musique « pop-rock ». Dans ces deux installations, la rigueur liée au style de la musique tonale

¹⁵⁰ *Ibid.*, p. 328.

¹⁵¹ Robin Meier, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, op. cit., p. 92.

mesurée induit un travail d'analyse et d'encodage très lourd du matériau musical à imiter.

En revanche, des installations comme *l'Ecarlate*, *Caresses de marquises*, et *Symphonie des machines* sont des œuvres issues d'un processus poïétique original, développé spécialement pour l'occasion. Le compositeur est donc plus libre dans son processus compositionnel étant donné que le matériau qui va influencer le comportement du module connexionniste n'est pas défini à l'avance. Dans *l'Ecarlate*, l'environnement du module connexionniste est défini par des critères de ressemblance entre une chorégraphie et une partition de gestes chorégraphiques. Dans *Caresses de marquises*, et *Symphonie des machines*, le matériau à traiter par le module connexionniste est un environnement lumineux. Ces installations permettent donc d'exploiter de manière plus libre les dynamiques d'apprentissage du système neuromimétique, étant donné qu'il n'y a pas d'attentes esthétiques préalables, pas de modèle à imiter.

2.2.2. Contrôle des paramètres du système connexionniste : contrôle instrumental ?

« Le temps réel réintroduit l'interprète dans la musique électroacoustique : il ouvre de nouvelles possibilités d'interactivité, mais il ne facilite pas nécessairement les opérations de composition. »¹⁵² La musique comme phénomène acoustique se déploie dans le temps, et le temps constitue l'un des paramètres dont dépend le matériau musical. Les progrès de l'informatique nous permettent de dialoguer avec la machine de manière instantanée, nous donnant ainsi accès à l'interactivité. Les possibilités de contrôle de synthèse sonore en temps réel permettent à l'interprète d'investir le domaine des musiques électroacoustiques. Le sujet, dans un rapport à la machine proche du contrôle instrumental, peut, grâce à une interface de commande, contrôler de la synthèse sonore en temps réel.

Qu'en est-il d'un sujet interagissant avec un système connexionniste formalisé sur le principe d'un instrument numérique. Il est tout à fait possible d'imaginer un instrument numérique reposant sur la même structure que les installations que nous avons étudiées jusqu'ici : une interface de contrôle, un module connexionniste et un module de synthèse sonore. Dans un tel instrument, une interface d'acquisition permettrait au module connexionniste de traiter les commandes de l'utilisateur, et une interface de contrôle lui permettrait éventuellement de modifier les paramètres du module connexionniste. On retrouve plus ou moins cette situation dans *Caresses de marquises* et *Symphonie des machines*. Dans ces deux installations, les auteurs stimulent la population d'agents neuromimétiques au moyen de rythmes lumineux tout en contrôlant les paramètres de ces agents, afin de créer différentes dynamiques d'apprentissage et d'aboutir à des situations musicales riches et inédites.

Cependant, cette pratique ne peut pas se plier aux exigences de la lutherie numérique « traditionnelle » en termes d'interactivité et de gestion du temps musical. Nous entendons par lutherie numérique « traditionnelle » les instruments numériques fonctionnant sur le principe de l'interactivité de commande et ne présentant aucune forme d'autonomie comportementale. Le contexte temporel de l'œuvre constitue un ensemble de paramètres musicaux, il semble donc cohérent de vouloir en confier la

¹⁵² Jean-Claude Risset, « Evolution des outils de création sonore », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999, p. 17.

gestion aux agents neuromimétiques au même titre que les hauteurs, les timbres, l'harmonicité, la densité spectrale, ou d'autres paramètres sonores. Mais la gestion du contexte temporel par le module connexionniste peut compromettre le dialogue sur le mode de l'instantanéité entre le sujet et la machine, l'interactivité de commande que l'on rencontre dans les instruments numériques « traditionnels ». Assimiler le fonctionnement des systèmes connexionnistes à la base d'installations comme *Caresses de marquises* et *Symphonie des machines* au fonctionnement d'un instrument numérique suppose donc d'assouplir la définition que nous avons faite de la lutherie numérique dans notre première partie. Dans le cadre d'un système connexionniste, le contrôle instrumental s'apparenterait plus au contrôle des paramètres du module connexionniste et de son environnement afin de faire émerger des comportements musicaux. Frédéric Voisin nous expliquait d'ailleurs au cours de notre entretien l'importance et la nécessité des répétitions avant le concert, afin de se familiariser avec le système neuronal et d'être capable d'anticiper les réactions des agents neuromimétiques suite à la modification de tel ou tel paramètre.

Dans une installation comme *Caresses de marquises*, faire varier la réactivité des agents neuromimétiques permet de garantir une richesse rythmique du résultat sonore. Chaque agent neuromimétique de ce système contient en effet une horloge interne, contrôlée par les deux auteurs, déterminant la vitesse à laquelle il perçoit et traite les vecteurs d'entrée. Des lignes de retard permettent également de retenir les vecteurs entre les deux SOM des agents neuromimétiques afin de diversifier leur comportement rythmique. Ainsi, dans le cadre d'une telle installation, les interventions des auteurs n'obtiennent pas nécessairement de réponses instantanées, à cause du traitement effectué par le module connexionniste, mais c'est ce qui constitue la richesse de ces systèmes :

« A cause d'une accélération du cycle des lumières, les deux Avatit jouent des notes de plus en plus aiguës. Mais au lieu que les violons suivent linéairement l'accélération des lumières, on a, à l'écoute, l'impression que quelque chose retient cette montée. Cet effet musical de tension est là engendré par le SOM2 qui a ici un taux d'apprentissage inférieur

à celui du SOM1 et réagit donc plus lentement aux changements dans l'environnement. »¹⁵³

Cet exemple concret, concernant *Caresses de marquises*, illustre le décalage potentiel entre la commande et la réponse sonore du module connexionniste dans ce type d'installation. Cette légère entorse à l'instantanéité de la réponse comportementale, normalement nécessaire au contrôle instrumental, est ici la clé de la richesse musicale de l'installation.

« Le temps réel permet donc de mettre en œuvre de nouvelles possibilités d'interaction, pouvant brouiller les frontières entre interprétation et composition. L'adéquation du contrôle en temps réel au propos musical est essentielle. »¹⁵⁴ Le contrôle en temps réel est présent dans une installation comme *Caresses de marquises* et *Symphonie des machines*, les données envoyées au module connexionniste sont transmises en temps réel, mais c'est le propre du système neuronal que de ne pas nécessairement répondre instantanément à ces données, notamment si ces données concernent le contexte temporel de l'œuvre. La richesse rythmique de la production musicale est en partie garantie par le traitement connexionniste des données liées aux durées des événements sonores ainsi qu'à leurs déclenchements. Ce type d'installation ne pouvant garantir l'instantanéité de la réponse sonore, nous préférons parler de système connexionniste plutôt que d'instrument, même si le contrôle de ce système peut s'apparenter au contrôle instrumental. Il est alors important de se poser la question du statut du sujet interagissant avec un tel système : « L'autonomie, même partielle, de l'instrument remet en cause le statut de l'interprète. »¹⁵⁵

Si le compositeur prescrit à l'utilisateur du système connexionniste, au moyen d'une quelconque notation, des gestes à réaliser, des déclenchements à effectuer ou bien un résultat sonore à obtenir, on se trouve dans une situation semblable à celle de l'interprétation au sens traditionnel. On retrouve une situation similaire dans *Ecarlate*, en ce qui concerne le rôle de Laurence Marthouret. C'est en effet cette dernière qui

¹⁵³ Robin Meier, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, op. cit., p. 107.

¹⁵⁴ Jean-Claude Risset, « Evolution des outils de création sonore », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, op. cit., p. 32.

¹⁵⁵ Bruno Bossis, « De l'amplification à l'autonomie de l'instrument : ruptures électroniques et conséquences esthétiques », dans *Analyse musicale*, n°61, décembre 2009, p. 101.

contrôle l'environnement du module connexionniste via le masque de saisie, mais elle le fait en obéissant à certaines contraintes. Elle utilise cette interface d'acquisition pour noter les résultats d'une analyse chorégraphique. Elle n'explore pas librement les possibilités d'interaction avec le module connexionniste. A cette différence près que Laurence Marthouret ne connaît pas le comportement du système neuronal, qui de plus est modifié en temps réel par Frédéric Voisin.

Si on laisse par contre ce même sujet interagir librement avec le système connexionniste et découvrir les modalités de cette interaction, on le place dans une activité de création en temps réel et d'expérimentation proche de l'improvisation ou de la performance. C'est le cas des installations comme *Caresses de marquises* et *Symphonie des machines*.

2.2.3. Synthèse sonore par traitement connexionniste : musique écrite ?

L'interactivité de seconde génération nous semble être le véritable intérêt que constituent les technologies neuromimétiques. Le véritable enjeu de l'interaction entre un sujet et une machine autonome, dont les réponses sont adaptées mais imprévisibles, réside dans le fait que le sujet adapte son comportement et ses choix en fonction du comportement de la machine. Cependant, l'interactivité ne laisse pas véritablement de place à la composition, car la composition est une activité hors temps.

« Composition : la production de structures musicales hors temps. Nous admettons que l'improvisation, lorsqu'elle cherche à ignorer l'existence d'une telle production, prend le risque de se soumettre plus brutalement encore aux schémas dont elle feint de s'affranchir. »¹⁵⁶

La situation d'interactivité entre le système neuronal et son utilisateur, l'aléa de la réponse comportementale des agents neuromimétiques suggèrent généralement que le résultat sonore produit par ce type d'installations est une forme peu maîtrisée de musique improvisée. Cependant, nous avons vu qu'un système connexionniste fait l'objet d'une écriture, au même titre que l'instrument numérique, à travers la programmation des différents modules qui le composent, permettant ainsi de déterminer son comportement. Le compositeur élabore un système neuronal, chargé d'un certain potentiel esthétique, qu'un sujet a la possibilité d'explorer en interagissant avec lui. Le discours musical est plus le résultat de la prise en main de ce système, ou d'un dialogue avec lui, que celui de la production de structures musicales en temps réel, car cette production échappe en partie à son utilisateur.

Il semble donc que le travail de composition réside ici dans la programmation, dans l'écriture du système connexionniste, mais également dans la détermination du potentiel esthétique de ce système. Le compositeur a la possibilité grâce à l'outil que constituent les technologies neuromimétiques de définir le comportement de son module connexionniste et les modalités de l'interaction permettant à l'utilisateur de dialoguer avec lui. Le discours musical découle donc de la rencontre entre un système plus ou moins autonome, pourvu de mémoire, programmé par les soins du compositeur

¹⁵⁶ Hugues Genevois, « Geste et pensée musicale : de l'outil à l'instrument », dans *Les nouveaux gestes de la musique*, Marseille, Editions Parenthèses, 1999, p. 38.

ou de son assistant, et son utilisateur, produisant les stimulations nécessaires à la production d'une réponse sonore. Au delà de l'écriture du module connexionniste, de la programmation du système dans sa globalité, le compositeur doit écrire les modalités de l'interaction unissant ce système à son utilisateur. Pour ce faire, il doit définir la part de contrôle qu'il laisse à cet utilisateur, et la part d'aléa qui résultera des traitements du ou des agents neuromimétiques.

Il va programmer son réseau afin de déterminer certaines limites esthétiques au delà desquelles les réponses comportementales du module connexionniste ne pourront aller. L'utilisateur aura donc le loisir de faire émerger cet univers esthétique en interagissant avec le système connexionniste. La possibilité d'intervenir sur les paramètres du réseau, comme le taux d'apprentissage ou la température, permet de faire évoluer les modalités de l'interaction entre le système connexionniste et son utilisateur au cours de la pièce. Le compositeur va donc devoir définir les règles de cette interaction. Ce système possède en lui, par son écriture, un espace musical en puissance, que l'utilisateur pourra « matérialiser » à certaines conditions, et c'est l'écriture de ces conditions qui nous intéresse ici. Afin de créer une véritable situation d'interactivité de seconde génération, il faut que l'utilisateur perçoive la prise en compte de ses intentions par le système neuronal. La production sonore du module connexionniste doit, malgré son imprévisibilité, être significative pour l'utilisateur, et refléter les dynamiques d'apprentissage des agents neuromimétiques. C'est là que le travail de transcription des vecteurs de sortie du module connexionniste en données musicales pour le module de synthèse sonore est déterminant. Il faut donner à l'utilisateur la possibilité de conduire un discours musical obéissant à une logique floue, faite de contours, d'espaces, de gestes plutôt que de durées, de hauteurs ou de timbres déterminés.

Ainsi, nous avons pu déterminer que dans la création d'une œuvre musicale interactive, intégrant un traitement neuromimétique dans le processus de réalisation sonore, l'écriture consiste, de manière assez générale, à déterminer la part de contrôle que l'on laisse à l'utilisateur du système neuronal, et les paramètres dont on laisse le contrôle aux agents neuromimétiques, subissant de ce fait un traitement aléatoire. Ce travail suppose d'effectuer dans un premier temps des choix concernant la structure et le fonctionnement du module connexionniste, de l'interface de contrôle et du module de synthèse sonore. La programmation de ces divers éléments doit se faire dans un souci

d'ergonomie cognitive, afin de créer les conditions d'une interactivité de seconde génération entre l'instrument et son utilisateur. Dans un deuxième temps, la composition s'inscrit dans un travail d'écriture de l'interactivité entre l'utilisateur et le système. Une fois le potentiel esthétique de l'œuvre défini, le compositeur doit définir les modalités permettant aux utilisateurs du système d'explorer ce potentiel.

2.3. Discussion

2.3.1. Composition et écriture, instrument et exécutant : nouveaux statuts et nouveaux rapports

« Les compositeurs ne sont pas les seuls créateurs, il faut partir de ce constat. Ce qui s'est passé avec la technologie, c'est que justement elle a été promue, du fait même de la complexité des systèmes, au rang de création. Je pense même qu'à notre époque, le statut de créateur du compositeur de musique est fortement diminué, terriblement invalidé, et qu'il n'est plus grand-chose en tant que créateur. »¹⁵⁷

Les technologies numériques ont sensiblement modifié le travail de composition. Dans un premier temps, l'absence d'écriture générative, c'est à dire d'écriture permettant de manipuler les sons à distance de la réalité sonore, a provoqué certains changements dans la poïésis de l'œuvre. Le passage de la représentation interne d'une œuvre à sa formalisation suppose d'avoir recours à l'expérimentation. Les nouvelles possibilités offertes par les technologies numériques donnent lieu à une écriture de l'instrument, dont le comportement est programmable. Le temps réel permet de rétablir l'interprète au sein de la musique électroacoustique mais son statut est étroitement lié au comportement de l'outil ou de l'instrument qu'il utilise : « Avec l'informatique, la combinatoire et la présence de mémoires permettent de relayer l'instrumentiste dans ses fonctions de déclenchement et de commande, et donc d'instaurer des modes plus complexes de contrôle en temps réel du rendu musical. »¹⁵⁸

Une œuvre électroacoustique pour système connexionniste déplace encore ces rapports existant entre compositeur, interprète et instrument dans la musique électroacoustique. Le travail du compositeur, au delà de la représentation interne de l'œuvre, ne consiste plus seulement en une écriture de l'instrument, mais en l'écriture du processus d'apprentissage du système neuronal. Les propriétés du module connexionniste ne sont pas la conséquence directe de la programmation du compositeur, mais émergent d'un processus d'auto-organisation des structures internes des agents neuromimétiques qui

¹⁵⁷ François Bayle, « Table ronde », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999, p. 233.

¹⁵⁸ Jean-Claude Risset, « Evolution des outils de création sonore », dans *Interfaces homme-machine et création musicale, op. cit.*, p. 29.

le composent. Le travail du compositeur consiste à écrire ce processus d'auto-organisation. Il devient le luthier d'un système autonome, en devenir, en puissance.

La nature du traitement effectué par le réseau de neurones induit un aléa dans le comportement du système connexionniste. L'œuvre n'est donc pas un objet figé, auquel on accède en exploitant les possibilités d'un instrument dont on connaît le comportement. Ce n'est pas non plus une œuvre ouverte au sens traditionnel, c'est à dire une œuvre intégrant des opérations de hasard dans son processus de création ou bien une œuvre dont la notation laisse à l'exécutant la liberté de faire certains choix dans son interprétation. L'aléa de la production sonore est le fait du système neuronal lui même, de son autonomie, de sa capacité à fournir des réponses imprévisibles mais adaptées. Le travail du compositeur consiste donc à écrire quelle sera la part d'autonomie et quelle sera la part de contrôle du système en définissant les modalités de l'interaction avec son utilisateur. « Le compositeur doit donc consigner dans un programme l'ensemble de ses processus de composition... »¹⁵⁹ Jean-Claude Risset fait cette remarque à propos de l'utilisation de l'ordinateur dans le processus de composition musicale. En ce qui concerne le système connexionniste, c'est dans l'écriture de l'interaction entre l'utilisateur et le système que le compositeur doit consigner ses processus de composition. Pour reprendre à nouveau les termes de Jean Claude Risset, le compositeur ne fait que « ... circonscrire de multiples réalisations possibles... »¹⁶⁰, et l'interaction sujet/système connexionniste en réalise une proposition. C'est dans cette coopération qu'intervient le processus d'interprétation. En fonction des stimulations de l'utilisateur, le système propose une lecture possible de l'espace sonore circonscrit par le compositeur. Plus précisément, l'interprétation serait liée aux choix qu'effectue le module connexionniste, et ces choix seraient orientés par les interventions de l'utilisateur.

« Si l'on admet qu'on peut qualifier d'interprétation ce balayage aléatoire des chemins non interdits, l'interprète ordinateur possède une qualité : [...] il ne sera pas orienté ou inhibé par des habitudes ou des préjugés. Mais c'est une qualité qu'on peut mettre à son passif : si, même implicitement, un schéma variant fait appel [...] aux conventions stylistiques

¹⁵⁹ Jean-Claude Risset, « Quelques remarques sur les musiques pour ordinateur et l'interprétation », dans *Musique en jeu*, n°3, 1971, p. 5.

¹⁶⁰ *Ibid.*, p. 6.

assimilées par un interprète, il sera vain d'espérer qu'un choix opéré par l'ordinateur à partir d'un processus mathématique simple de décision puisse conduire à une réalisation bénéficiant de ce riche contexte. »¹⁶¹

C'est précisément la limite que tendent à dépasser les réseaux de neurones en modélisant une activité de choix basée non sur l'énumération d'interdictions, mais sur la mémorisation de comportements musicaux. Ainsi, on peut donc considérer qu'un système connexionniste est à la fois le support de processus compositionnels, et l'interprète permettant d'en proposer une réalisation. Que devient donc le statut de l'utilisateur de cet instrument ?

Considérons la situation où le sujet est laissé libre d'explorer et d'expérimenter ce dialogue en interaction avec le système. Dans ce cas, que l'utilisateur soit un instrumentiste, un spectateur ou bien le compositeur lui même, son statut n'est plus celui d'un interprète, car il effectue ses choix de son propre chef, sans indications extérieures, en fonction des réponses comportementales des agents neuromimétiques. La réalité sonore à laquelle donne accès le système connexionniste est mouvante, son utilisateur n'est donc plus le seul responsable du déplacement au sein de cette réalité sonore. Il se retrouve dans une situation de découverte, de dialogue avec un système, qui consiste à comprendre comment interagir avec lui pour orienter le discours musical. Le système connexionniste n'est pas un simple vecteur, qui permet de matérialiser, via l'interprète, la pensée musicale du compositeur, notée sur la partition. Il porte dans sa structure la mémoire d'une esthétique, d'un système compositionnel, qu'il interprète en fonction des stimulations de l'utilisateur. Le compositeur devient en quelque sorte l'auteur d'un paradigme compositionnel, le luthier d'un système autonome, capable d'apprentissage et de mémoire, au sein duquel il consigne un potentiel de comportements musicaux. Le rôle de l'utilisateur consiste à diriger le système, à l'influencer en interagissant avec lui, à la manière d'un chef d'orchestre qui n'aurait pas de partition devant les yeux, devant se fier à ses habitudes, à son goût, et au comportement de ses instrumentistes pour conduire le discours musical. Le système neuronal devient donc, à la manière d'un instrumentiste, l'interprète des stimulations de

¹⁶¹ *Ibid.*, p. 6.

l'utilisateur, qu'il exprime musicalement via son instrument que constitue de module de synthèse sonore.

2.3.2. La synthèse sonore ou l'esthétique de la démonstration

Même si le matériau musical à lui seul ne suffit pas à exprimer tout l'enjeu de la pratique qui nous intéresse, il est malgré tout important d'envisager les différentes stratégies adoptées par les compositeurs en termes de synthèse sonore. La création musicale dans ce type d'installations évolue en fonction des vecteurs de sortie proposés par le module connexionniste. Les données contenues dans ces vecteurs fournissent au module de synthèse sonore les variables permettant de faire évoluer les paramètres du matériau musical. Il est ainsi possible d'utiliser ces variables de différentes manières. Pour contrôler différents types de synthèses par exemple : synthèse additive, soustractive ou par modulation. Ces variables peuvent également permettre de contrôler les paramètres d'effets sur un matériau musical : modification de hauteur, de durée, réverbération, etc. Il est enfin possible de s'en servir pour contrôler le déclenchement d'échantillons préparés.

La nature de ce matériau musical est en partie déterminée par les aspirations esthétiques du compositeur. Frédéric Voisin et Robin Meier nous disent à ce sujet que cette étape de la réalisation est certainement celle qui s'approche le plus d'un travail de composition musicale au sens traditionnel. Elle permet en effet de déterminer le comportement du module de synthèse sonore et ainsi de définir la nature du matériau musical produit par le système. Nous avons également remarqué que les installations pour réseaux de neurones ont vocation à faire démonstration de leur potentiel. L'esthétique du matériau musical qu'elles produisent, porte les traits d'une pratique qui cherche à justifier son intérêt. Il y a en effet plus qu'un aspect monstratif dans les installations pour systèmes neuromimétiques, il y a un aspect démonstratif. Ces installations cherchent à mettre en avant l'intérêt esthétique que peut constituer le traitement connexionniste. Les œuvres engendrées par cette pratique sont à la fois des objets d'art autonomes, et des expérimentations permettant d'améliorer la compréhension des systèmes neuronaux, afin d'optimiser leur potentiel esthétique.

Prenons l'exemple de l'installation *Last manoeuvres in the dark*. Dans un article intitulé « On Analytical vs. Schizophrenic Procedures for Computing Music »¹⁶², Robin Meier et Frédéric Voisin nous disent ceci : « Le principal facteur qui influence le style musical produit par l'orchestre d'agents neuromimétiques, dans l'installation *Last manoeuvres in the dark*, est la base de données musicale... »¹⁶³ Dans cette installation, le style du matériau musical est largement déterminé par la base de données musicale dont le système connexionniste doit s'inspirer. C'est donc l'aspect démonstratif de l'installation qui oriente dans un premier temps l'esthétique de l'œuvre. Les deux auteurs nous disent également que « Le second facteur impliqué dans le style musical est l'environnement sonore – synthétiseurs et effets – développé afin de restituer les activités neuronales. Pour l'installation *Last manoeuvres in the dark*, nous étions supposés générer, durant des mois, un matériau musical dans une sorte de style « gothique » moderne aussi « sombre » que possible. »¹⁶⁴ Cet aspect de l'esthétique du matériau musical dépend cette fois-ci des aspirations des artistes. Le résultat sonore de l'installation est donc produit via six synthétiseurs *ad hoc* développés par Olivier Pasquet, chargés de réaliser de la synthèse sonore dans ce style « gothique » et « sombre ».

Dans la pièce *For Alan Turing* de Robin Meier, l'esthétique du matériau musical est également déterminée d'une part par les choix esthétiques du compositeur, ainsi que par la tâche que doit effectuer le système connexionniste. Dans cette installation, un premier SOM doit imiter l'activité musicale d'un second. Le matériau musical produit par le premier SOM est une variation plus ou moins importante de thèmes composés par Robin Meier. Ce travail d'écriture est donc déterminé par les aspirations du compositeur. A partir de ce modèle, démontrer le potentiel d'imitation, ou de variation, d'un système connexionniste suppose pour une lecture claire de l'œuvre d'utiliser le

¹⁶² Frédéric Voisin, Robin Meier, « On Analytical vs. Schizophrenic Procedures for Computing Music », *Contemporary Music Review*, Londres, Editions Routledge, n°28, Avril 2009, p 205 – 219, PDF donné par l'auteur.

¹⁶³ « The main factor influencing the musical style produced by the cluster for the LMD installation is its song database... ». Frédéric Voisin, Robin Meier, « On Analytical vs. Schizophrenic Procedures for Computing Music », *Contemporary Music Review*, *op. cit.*, p. 214.

¹⁶⁴ « The second factor involved in the musical style is the sound environment – synthesizers and effects – provided to render the neural activities. For LMD installation, we were supposed to generate, for months, music in a sort of modern « Gothic » style, as « dark » as possible. » Frédéric Voisin, Robin Meier, « On Analytical vs. Schizophrenic Procedures for Computing Music », *Contemporary Music Review*, *op. cit.*, p. 214.

même type de matériau musical pour le modèle et pour l'imitation. Ainsi, l'activité musicale des deux SOM est exprimée en notes MIDI. Cette unité du matériau musical est donc le résultat d'une volonté de démonstration des capacités du système développé.

Enfin, dans l'installation *Caresses de marquises*, l'intention des auteurs est de montrer différentes expressions possibles, d'un point de vue musical, des dynamiques comportementales d'un système neuronal. Ainsi, chaque agent neuromimétique est associé à un instrument numérique spécifique permettant d'exprimer musicalement son comportement. Une grande variété de synthèses sont donc utilisées : synthèse additive, synthèse par modulation de fréquence, resynthèse vocale, déclenchements d'échantillons. On trouve parmi les comportements musicaux un agent neuromimétique contrôlant un échantillonneur contenant des échantillons d'alto joué pizzicato, un autre agent contrôlant un échantillonneur contenant des échantillons de violons jouant *sul ponticello*, ou encore un agent contrôlant de la synthèse par modulation de fréquence visant à imiter un chant d'oiseau. Encore une fois, le propos artistique, lié à une volonté de démonstration du potentiel esthétique de ces systèmes, détermine de manière significative les choix réalisés en termes de synthèse sonore.

2.3.3. Dispositifs électroacoustiques pour réseaux de neurones artificiels : Enjeux, limites et perspectives

« Le problème sur lequel on bute actuellement est donc le suivant : comment représenter un contexte musical qui ne soit pas fait que de hauteurs précises, mais qui puisse être d'un autre type ? Le problème est purement pratique car il ne concerne pas les aspects conceptuels de la composition, mais seulement le suivi ou la reconnaissance d'une forme gauchie par un interprète afin qu'un synthétiseur puisse le suivre comme le ferait un chef d'orchestre pour un soliste. »¹⁶⁵

Le potentiel considérable des réseaux de neurones repose sur la possibilité qu'a le compositeur de circonscrire un espace sonore qu'un utilisateur peut explorer en interagissant avec le réseau. L'utilisation d'un tel outil permet de s'affranchir de la représentation musicale, étant donné que la notation dans sa fonction de représentation suppose l'interprétation, et comme nous l'avons vu, le système connexionniste est le propre interprète des processus compositionnels que le compositeur lui fait apprendre. Son potentiel ne repose pas tant sur sa capacité de mémoire que sur sa faculté à apprendre ou à oublier. Il est facile de programmer un instrument numérique qui obéit à un certain nombre de règles préétablies et mémorisées, il est plus difficile de programmer un système capable de développer des dynamiques d'apprentissage selon les situations et de simuler une activité de choix face à des situations inconnues. C'est cette capacité à développer différentes dynamiques d'apprentissage qui permet au réseau d'explorer différentes situations musicales inscrites au sein d'un espace délimité par le compositeur. La difficulté consiste pour le compositeur à circonscrire cet espace. Pour ce faire, son travail d'écriture va consister à trouver l'architecture adéquate pour son système connexionniste et surtout les modalités permettant d'interagir avec lui.

L'utilisation des réseaux de neurones intégrés au processus de réalisation sonore permet donc d'inscrire des processus compositionnels au sein d'un système qui obéit à une logique floue. Ainsi, le système connexionniste peut fournir différentes lectures d'un système compositionnel mis au point par le compositeur. Les technologies neuromimétiques permettent, non pas de représenter, mais d'intégrer dans une

¹⁶⁵ Philippe Manoury, « Le stade pictographique de la musique électronique doit être dépassé », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, op. cit., p. 211.

machine un contexte musical qui ne se constitue pas de valeurs absolues, et pouvant ainsi faire l'objet de différentes réalisations sonores. Cette propriété permet de contourner le problème de la représentation des musiques électroacoustiques :

« Actuellement l'ordinateur reconnaît les notes réelles, ce qui est trop contraignant. Il devrait pouvoir identifier un contour, un silence... Il faut tendre vers une logique floue. Dans une caricature, on reconnaît le modèle. Le suiveur de partition devrait reconnaître une caricature du texte. On ne doit pas se contenter d'identifier les hauteurs absolues mais aussi reconnaître des formes. Une première étape est d'identifier des hauteurs relatives. Si un trait est constitué de quatre notes qui montent, ce ne sont pas tant les hauteurs définissant cette succession de quatre notes qu'il s'agit de caractériser que la figure, la « Gestalt », qu'elles forment – même si elles sont légèrement fausses. »¹⁶⁶

Plutôt que de chercher à représenter un contexte musical par des valeurs relatives, par un contour, ou un geste, il est possible de programmer un système connexionniste capable à partir d'un matériau d'entrée, constitué de valeurs absolues, de produire un discours musical aléatoire mais orienté par ce matériau. Un réseau de neurones est en quelque sorte capable de proposer plusieurs caricatures à partir d'un même modèle.

Le comportement du système connexionniste dépend de l'interaction avec son utilisateur. La réception de la production sonore du système par l'utilisateur est intégrée au processus compositionnel. Au delà de l'écriture de l'apprentissage du module connexionniste, une œuvre pour système neuronal suppose l'écriture des conditions de l'interactivité entre le système et son utilisateur. Le résultat sonore est donc le produit d'une interactivité intelligente, et l'écriture de cette interactivité constitue l'un des enjeux de l'utilisation des technologies neuromimétiques intégrées dans le processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale. Le système connexionniste dans son ensemble, de son interface de contrôle à son module de synthèse sonore en passant par son module neuromimétique, doit être pensé en fonction de son utilisateur. Etant donné que c'est la réponse comportementale des réseaux de neurones qui oriente les choix et le comportement de l'utilisateur, il y a une importante réflexion à mener, au delà de la question de la prise en main du système, sur l'ergonomie cognitive de celui-ci. Il est

¹⁶⁶ *Ibid.*, p. 211.

nécessaire de créer les conditions d'une compatibilité entre l'utilisateur et le système connexionniste.

Un autre élément déterminant dans la poïésis d'une œuvre pour système connexionniste est la possibilité d'intégrer à l'œuvre le processus d'apprentissage du système. Ce type de dispositif suppose d'intégrer le processus d'apprentissage des agents neuromimétiques au sein de l'œuvre. Ces réseaux permettent de créer une interactivité intelligente entre le système connexionniste et son utilisateur, et plus encore, une interactivité générative, c'est à dire une forme d'interactivité dont les modalités évoluent au cours du temps, selon l'interaction qui unit le sujet à la machine. L'apprentissage du module connexionniste, ou son adaptation, se fait donc en temps réel pendant le déroulement de l'œuvre. Cette forme d'interactivité est très intéressante, tant du point de vue de la cognition musicale, que de celui de l'interaction homme/machine.

L'une des principales difficultés de cette pratique concerne à notre sens les installations ayant recours aux systèmes connexionnistes pour modéliser des processus poïétiques appartenant à d'autres œuvres musicales. C'est le cas notamment de *Last manoeuvres in the dark*, où le système connexionniste a pour but d'effectuer de la synthèse sonore inspirée par une base de données musicale. Le modèle à imiter constitue en effet une contrainte dans l'exploitation musicale des différentes dynamiques d'apprentissage des agents neuromimétiques. Il induit de nombreuses exigences dans la réalisation technique étant donné la contrainte du système compositionnel dont il est issu, et limite ainsi les possibilités en terme d'interactivité. En effet, pour la modélisation de processus poïétiques appartenant à une autre œuvre musicale, la constitution d'un corpus d'apprentissage peut s'avérer particulièrement difficile. Plus le style d'une œuvre est complexe plus il est délicat de trouver un corpus d'apprentissage représentatif de toutes ses spécificités stylistiques. Le travail d'encodage nécessaire pour de telles installations est particulièrement complexe. C'est le cas par exemple de *Last manoeuvres in the dark* où le corpus d'apprentissage atteint presque un millier de vecteurs. La nature du processus d'apprentissage des réseaux de neurones contraint donc à réaliser des œuvres présentant une certaine homogénéité stylistique.

A partir du moment où le comportement musical d'un système connexionniste doit tendre, ou même ne serait-ce que s'apparenter à un matériau musical source, alors les notions d'erreurs et d'optimisation des performances du réseau prennent un sens

musical, ce qui limite le potentiel esthétique de l'œuvre, étant donné qu'une trop grande distance entre les deux matériaux sera perçue comme un manque de performance du système connexionniste. De fait, les possibilités d'interactions d'un utilisateur avec le système sont plus limitées, étant donné que le comportement attendu du système est plus ou moins contraint.

Au contraire, dans une installation où le matériau utilisé pour constituer l'environnement du module connexionniste n'est pas musical, il n'y a pas d'attentes préalables en termes de résultat sonore ce qui permet d'explorer davantage de situations musicales, davantage de comportements sonores et de dynamiques d'apprentissage. C'est le cas par exemple de *Caresses de marquises* et de *Symphonie des machines*. L'environnement des agents neuromimétiques étant un environnement lumineux, la problématique des artistes n'est pas de parvenir à un apprentissage parfait ou optimum des agents neuromimétiques. Il s'agit au contraire d'exploiter le maximum de situations sonores possibles en faisant varier l'environnement lumineux des agents et leurs paramètres de contrôle. Les possibilités d'interactions entre les utilisateurs, à savoir ici les deux auteurs, et le système neuronal sont beaucoup plus vastes. Ainsi, en considérant que le compositeur inscrit ses processus compositionnels au sein du système connexionniste, les réseaux de neurones intégrés dans le processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale se prêtent mieux à la modélisation de processus compositionnels *ad hoc*.

Enfin, les systèmes connexionnistes impliqués dans le processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale posent la question de la nature de leur contrôle. Nous avons vu que dans certaines installations comme *Caresses de marquises* et *Symphonie des machines*, la gestion des paramètres du système connexionniste, et de son environnement, pouvait s'apparenter au contrôle instrumental de la lutherie numérique. Nous avons cependant noté que le traitement connexionniste des données liées au contexte temporel de l'œuvre ainsi que le fonctionnement même des agents neuromimétiques pouvaient affecter la réactivité du système. Au même titre que les autres paramètres traités par le système connexionniste, l'instantanéité de la réponse du système numérique obéit désormais à un certain aléa. L'interactivité de seconde génération, étant donné l'autonomie des systèmes, remet en cause l'immédiateté de la réponse obtenue dans le cadre de l'interactivité de commande. De la même manière, la

lutherie numérique, lorsqu'elle acquière une part d'autonomie comportementale, intégrant ainsi le cadre de l'interactivité de seconde génération, remet en cause l'instantanéité du contrôle instrumental.

3. Conséquences esthétiques induites par l'utilisation d'agents neuromimétiques au sein du processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale

3.1. Esthétique des installations musicales pour systèmes neuromimétiques : ouverture, générativité, interactivité intelligente

3.1.1. Esthétique de l'ouverture et aléatoire programmable

Les automates connexionnistes amènent les compositeurs à utiliser l'aléatoire comme un paramètre musical à part entière. Cependant, l'intégration de processus aléatoires dans la composition et l'exécution de musiques savantes n'est pas un phénomène nouveau.

Le paramètre aléatoire peut intervenir dans un premier temps au sein du processus d'interprétation de l'œuvre, en laissant une part, plus ou moins contrôlée, de libre arbitre à l'interprète dans son exécution. La première remarquée d'une œuvre utilisant ce type de forme fut la création de *Klavierstück XI*¹⁶⁷ de Karlheinz Stockhausen à New York en 1957 par David Tudor¹⁶⁸. La partition de l'œuvre contient dix-neuf sections séparées. L'interprète doit choisir l'enchaînement des sections selon les aléas du placement de son regard. On parle aussi de « forme ouverte » pour définir ce procédé, Stockhausen préfère parler de « forme polysémique »¹⁶⁹.

La seconde moitié du 20^{ème} siècle voit également se développer de nouvelles formes de notations graphiques. Ces notations non musicales au sens traditionnel induisent de fait une part d'indétermination dans l'interprétation de l'œuvre. L'interprète est donc amené à faire des choix déterminants quant à la réalisation de la pièce proposée, on parle d'une « écriture ouverte »¹⁷⁰. Cage se penche sur cette notion d'indétermination liée à la notation notamment dans *Winter Music*, œuvre pour un à vingt pianistes, créée en 1957 à Brooklyn par David Tudor et John Cage lui même.

Le phénomène aléatoire peut également intervenir dans la genèse de l'œuvre. En 1952, John Cage, Earl Brown ainsi que Louis et Bébé Barron réalisent *William Mix*, une pièce pour huit magnétophones monophoniques. Le procédé compositionnel consiste en une

¹⁶⁷ Etude pour piano composée en 1956, qui constitue l'une des premières œuvres ouvertes de la musique occidentale.

¹⁶⁸ David Tudor, 1926-1996, pianiste et compositeur américain de musique contemporaine.

¹⁶⁹ Célestin Deliège, *Cinquante ans de modernité musicale : De Darmstadt à l'IRCAM*, Sprimont, Editions Mardaga, 2003, p. 259.

¹⁷⁰ *Ibid.*, p. 259.

base de donnée de sons répartis selon une typologie particulière. Le choix de tel ou tel son une fois la base de données constituée est fait au hasard en utilisant un procédé s'inspirant d'un volume chinois de divination : le « I Ching » (Livre des mutations).

Il existe aujourd'hui dans la plupart des outils numériques utilisés dans le domaine de la composition musicale des fonctions de « randomisation », permettant par exemple de générer des suites de nombres aléatoires, faisant ainsi de l'imprévisibilité un paramètre musical de plus en plus facile à intégrer dans la composition des musiques électroacoustiques. Il est toutefois important de noter que si cette dernière approche est très intéressante du point de vue de la genèse des œuvres, le rendu esthétique n'en reste pas moins limité et le recours à ce genre de procédés compositionnels est parfois vivement critiqué pour son manque de maîtrise.

Dans *Last manoeuvres in the dark*, la production sonore réalisée par les agents neuronaux est aléatoire. Cet aléa est lié d'une part au traitement connexionniste, c'est à dire aux paramètres liés à l'apprentissage du réseau, et d'autre part, à des processus aléatoires programmés liés notamment au choix du vecteur d'entrée du réseau ainsi qu'à la structure formelle de la production sonore. On constate avec cet exemple que l'aléa de la production sonore n'est pas exclusivement lié au traitement connexionniste et donc par conséquent que l'intérêt esthétique de ce traitement ne réside pas dans sa capacité à produire des formes aléatoires. La capacité de ce système à générer de manière quasi-autonome des formes aléatoires, mais obéissant à certaines exigences stylistiques, constitue la force esthétique de cette installation.

L'utilisation de l'aléatoire comme paramètre musical n'est donc pas un élément nouveau, et le fait de vouloir y recourir ne justifie pas l'utilisation de réseaux de neurones. L'intérêt esthétique que présentent les technologies neuromimétiques se situe à un autre niveau, celui de l'autonomie : « ... la clôture opérationnelle d'éléments situés à des niveaux séparés produit un enchevêtrement des niveaux pour constituer une nouvelle unité [...] L'autonomie surgit à cet entrecroisement. »¹⁷¹

¹⁷¹ Francisco J. Varela, *Autonomie et connaissance, Essai sur le Vivant*, Paris, Editions du Seuil, 1989, p. 22.

Les réseaux de neurones, étant donné leur architecture, leur capacité d'apprentissage, ainsi que leur clôture opérationnelle, constituent des agents autonomes, ou quasi-autonomes. C'est la situation d'interactivité entre ces systèmes autonomes et leur environnement qui va nous intéresser, et non leur seule capacité à produire des réponses imprévisibles.

L'aléatoire fait donc partie de l'esthétique des œuvres musicales pour réseaux de neurones, mais ces derniers ne l'ont pas introduit comme paramètre musical. Cependant, nous allons voir que l'aléatoire et l'ouverture de l'œuvre sont à la base d'un élément central de l'esthétique des installations musicales intégrant des agents connexionnistes. Il s'agit de l'interactivité : « Ainsi la participation du spectateur, l'œuvre ouverte, la combinatoire, le récit non linéaire peuvent être perçus comme des antécédents particuliers des potentialités ouvertes par l'interactivité, sans pour autant coïncider avec elles. »¹⁷²

¹⁷² Jean-Louis Boissier, *La relation comme forme, l'interactivité en art*, Genève, Editions Mamco, 2004, p. 12.

3.1.2. Réseaux de neurones : systèmes génératifs

Afin de mieux comprendre les enjeux esthétiques liés à l'interactivité dans les installations pour réseaux de neurones, il est important de mentionner que ces installations sont des systèmes génératifs, c'est à dire des systèmes où le matériau artistique s'élabore au sein de l'installation, dans le temps de la création, selon des modalités qui dépendent du contexte au sein duquel se trouve le système connexionniste.

« Une approche générative particularise un mode spécifique d'apparition de la production artistique, du texte de l'art, à la fois dans son contexte technique et dans son contexte perceptif. En effet, contrairement aux autres modalités d'intervention, le texte généré n'est pas seulement défini et placé dans ses contextes, mais il s'y élabore et, parfois, comme dans la simulation, en construit lui-même une part. Dans la générativité, les relations texte/contextes sont ainsi tout à fait particulières. »¹⁷³

Dans *Caresses de marquises* et *Symphonie des machines*, le matériau musical s'élabore au sein de l'installation, en fonction des rythmes lumineux projetés sur les agents, et par la communication des activations neuronales entre eux. Les agents connexionnistes se structurent donc en fonction de leur environnement, adaptent leur comportement, et engendrent une production musicale déterminée par leur état d'activation. Le matériau musical, c'est à dire le texte artistique, est donc étroitement lié à l'environnement des agents, ce que Jean Pierre Balpe appelle le contexte de l'œuvre. Ainsi, nous pouvons voir en quoi les installations pour réseaux de neurones constituent des œuvres génératives.

Jean Pierre Balpe nous explique que ces installations sont donc intrinsèquement mobiles, instables ou du moins n'offrant de stabilité provisoire qu'entre chaque actualisation de la structure interne du système génératif. Il définit ainsi la structure des systèmes génératifs : des données, un moteur de traitement et un modèle. L'articulation de ces trois éléments s'effectue ainsi :

« Les modèles définissent des micromondes relationnels disant comment les données doivent se comporter. Le moteur de traitement, en fonction d'un certain nombre de règles, interprète les informations que contiennent les données, les comparent à celles des

¹⁷³ Jean-Pierre Balpe, *Contextes de l'art numérique*, Paris, Editions Hermès Science, 2000, p. 192.

modèles et, en fonction de ces doubles impératifs, constituent les données finies que le système va donner à percevoir. »¹⁷⁴

L'analogie avec les réseaux de neurones nous apparaît donc comme évidente, tant du point de vue de leur structure que de leur fonctionnement. Les réseaux de neurones constituent un moteur de traitement, qui analyse des données, des stimuli, à partir d'un certain nombre de modèles mémorisés antérieurement. De ce fait, les propriétés esthétiques des installations pour systèmes génératifs sont communes à celles des installations pour réseaux de neurones. Systèmes neuromimétiques comme systèmes génératifs sont ainsi capables de fonctionner de manière totalement autonome. Ils peuvent, à la convenance du concepteur, intégrer un utilisateur ou non :

« Une œuvre générative est ainsi toujours plus ou moins ouverte. Suivant la densité des interactions qu'elle autorise, le perceuteur peut s'en sentir exclu ou, au contraire, comme dans les environnements de réalité virtuelle, s'y sentir complètement impliqué. »¹⁷⁵

Une installation interactive pour réseaux de neurones suppose donc nécessairement un degré d'ouverture qui définit en partie l'esthétique de l'œuvre. Le compositeur doit donc déterminer dans un premier temps le potentiel esthétique de l'œuvre, c'est à dire les limites d'un univers sonore que le système génératif va explorer. Dans un second temps, il doit déterminer les modalités d'exploration de ce potentiel sonore, et choisir d'y impliquer ou non un utilisateur.

Dans *Last manœuvres in the Dark*, l'installation n'implique pas le spectateur, on peut même considérer qu'il en est complètement exclu étant donné qu'il ne peut même pas percevoir les données que traite le réseau, c'est à dire le corpus de musique « pop-rock ». Dans *Caresses de marquises* et *Symphonie des machines*, le spectateur n'est toujours pas impliqué, mais le caractère visuel des rythmes lumineux projetés sur les agents, ainsi que le panneau permettant de voir les activations neuronales dans *Caresses de marquises*, tendent à rapprocher le spectateur du processus à l'œuvre au sein de ces installations. Cependant, les deux auteurs interagissent avec le système en contrôlant son environnement et les paramètres des agents neuromimétiques. Un tel système connexionniste autorise donc un utilisateur à interagir avec lui, mais dans sa mise en

¹⁷⁴ *Ibid.*, p. 193.

¹⁷⁵ *Ibid.*, p. 196.

scène, seuls les auteurs sont intégrés comme utilisateurs du système. Enfin dans *Préludes aux préludes*, une pianiste est invitée à interagir, en improvisant dans un style classique, directement avec un agent connexionniste, qui cherche à imiter le style de ces improvisations. Dans ce dernier exemple, la pianiste est complètement impliquée dans l'œuvre, elle fait même partie de la proposition artistique. Le spectateur quant à lui en est exclu, mais le comportement du réseau peut être compris, étant donné que le lien entre le modèle devant être imité et la réponse comportementale du système neuronal est plus ou moins évident. Le spectateur étant capable de comprendre le processus à l'œuvre dans cette performance, il s'y sent davantage impliqué.

« Un concepteur de programme génératif se trouve donc toujours confronté au choix entre divers degrés d'ouverture qui font partie intégrante du langage technique sur lequel il va devoir s'appuyer et qui, conditionnant l'image qu'il donne à sa création, relèvent de son langage esthétique, de son style. »¹⁷⁶

Les installations pour réseaux de neurones, en tant que systèmes génératifs, autorisent la présence comme l'absence d'interactions avec un utilisateur. L'interactivité n'est donc pas un élément esthétique déterminant dans les œuvres génératives, c'est un potentiel, que le compositeur peut exploiter ou non :

« L'œuvre générative exemplifie l'interactivité. Pouvant à tout instant la solliciter, elle affirme dans le même temps qu'elle peut s'en passer et que le recours à l'intervention d'un agent n'est qu'un mode d'inscription parmi d'autres dans une stratégie expressive d'ensemble. »¹⁷⁷

Ainsi, les installations qui vont nous intéresser sont donc plus que de simples systèmes génératifs, étant donné que l'élément qui constitue le point central de leur esthétique est l'interactivité. Comme nous l'avons vu précédemment, l'ouverture se définit, d'un point de vue esthétique, comme un antécédent de l'interactivité, sans pour autant en constituer l'essentiel.

¹⁷⁶ *Ibid.*, p. 198.

¹⁷⁷ *Ibid.*, p. 198.

3.1.3. L'interactivité intelligente

Comme nous venons de le voir, un réseau de neurones est un moteur de traitement de données. De ce fait, il interagit nécessairement avec un ensemble d'éléments qui constitue son environnement. Lorsque les éléments de cet environnement sont produits de manière consciente par un sujet, ou lorsque ce dernier contrôle les paramètres du système neuronal, il y a alors interactivité entre ce sujet et l'agent neuromimétique. L'interactivité constitue l'élément déterminant de l'esthétique des installations pour réseaux de neurones : « Ainsi l'interactivité n'est pas la simple médiation de l'accès à l'œuvre, elle est partie intégrante de l'œuvre. »¹⁷⁸ Plus précisément, nous allons nous intéresser à l'interactivité intelligente ou interactivité de seconde génération.

L'interactivité intelligente est fondamentalement liée à l'autonomie des systèmes informatiques qu'il est aujourd'hui possible de développer. Le caractère autonome d'un système apparaît lorsque sa totalité permet de produire des propriétés plus riches que celles de ses éléments pris isolément. Un système autonome est clos d'un point de vue organisationnel et tout changement au sein de ce système est le résultat d'un processus permettant de maintenir son identité. On considère le changement comme le résultat d'un processus d'auto-organisation lui permettant de maintenir son équilibre : « Les machines autopoïétiques sont autonomes : tous leurs changements sont subordonnés au maintien de leur propre organisation, même lorsque les processus de maintien entraînent des transformations profondes de la machine. »¹⁷⁹

L'interactivité intelligente constitue donc cette situation d'interaction entre un individu et un système informatique autonome qui se régit selon ses propres lois. La particularité de ces systèmes est liée au fait qu'il n'est pas possible de prévoir à coup sûr leur réponse face à une stimulation. « Il y a interactivité "intelligente" dès que ces acteurs sont dotés d'une certaine autonomie, c'est à dire dès que leur comportement n'est plus déterminé par un algorithme. »¹⁸⁰ On parle donc d'interactivité intelligente pour décrire la situation d'interaction entre utilisateurs et réseaux de neurones artificiels étant donné que ces derniers constituent des systèmes autonomes :

¹⁷⁸ Jean-Louis Boissier, *La relation comme forme, l'interactivité en art*, op. cit., p. 10.

¹⁷⁹ Francisco J. Varela, *Autonomie et connaissance, Essai sur le Vivant*, op. cit., p. 46.

¹⁸⁰ Alexandre Gherban, « Entretien avec Michel Bret », op. cit.

« J'ai contribué à élaborer une nouvelle forme d'interactivité, que nous avons qualifiée d' "intelligente", en dotant les œuvres interactives d'une certaine "autonomie", au sens de l'autopoïèse de Varela, en développant des systèmes adaptatifs construits autour de réseaux neuronaux et d'algorithmes génétiques. »¹⁸¹

Ce principe d'interaction d'un nouveau genre est caractérisé par l'incertitude de la réponse donnée par le système, qui ne réagit plus à coup sûr mais répond de façon autonome. Cette part d'aléa dans le dialogue entre l'homme et la machine est un phénomène nouveau.

De ce fait, nous allons distinguer deux éléments, afin de mieux comprendre les enjeux de l'interactivité intelligente dans le cadre des installations musicales pour réseaux de neurones : l'interactivité endogène et l'interactivité exogène.

L'exemple le plus typique d'interactivité endogène est celui de *Last manœuvres in the dark*. Au sein de cette installation, le spectateur est totalement exclu du processus d'interactivité à l'œuvre entre le système connexionniste et le corpus d'œuvres. Pourtant, les agents neuromimétiques effectuent de manière autonome le traitement des données qui lui sont proposées, afin de produire une réponse comportementale aléatoire mais adaptée, sous forme de production sonore. Si d'un point de vue poétique, cette installation représente une réelle performance, l'intérêt esthétique est quant à lui plus limité, étant donné qu'il est tout à fait possible de réaliser ce type de production sonore à l'aide d'autres systèmes d'aléatoire programmé tout aussi efficace comme les chaînes de Markov, les algorithmes génétiques ou la logique floue.

D'un autre côté, nous avons dans la performance *Préludes aux préludes* qui constitue, si l'on se place du point de vue de la pianiste, un exemple concret d'interactivité exogène. La pianiste interagit directement avec un réseau de neurones, via une interface de contrôle qui est ici son piano, afin d'amener le réseau à produire une création sonore. La situation d'interactivité est alors évidente, la pianiste est impliquée dans la proposition artistique, ses gestes induisent un changement de comportement du réseau qui s'adapte et apprend de cette interaction.

¹⁸¹ Alexandre Gherban, « Entretien avec Michel Bret », *op. cit.*

Entre ces deux exemples, il existe différents degrés d'interactivité. Prenons l'exemple de *Symphonie des machines* et *Caresses de marquises*. L'interactivité mise en œuvre au sein de ces deux installations est à la fois de type endogène et exogène. En effet, les auteurs de l'installation interagissent directement avec les agents neuromimétiques, en projetant des rythmes lumineux sur ces derniers, afin d'induire une réponse comportementale sous forme de production sonore. Il y a donc interactivité exogène. Cependant, les agents s'influencent mutuellement par le biais d'un processus interne, leur permettant de transmettre leurs activations neuronales, ce qui relève de l'interactivité endogène.

Enfin, si l'on revient sur la performance *Préludes aux préludes*, en se plaçant cette fois-ci du point de vue du spectateur, on devrait considérer l'interactivité comme endogène étant donné que ce dernier n'interagit pas directement avec l'agent connexionniste, mais observe la pianiste qui interagit avec lui. Pourtant, étant donné le lien évident qui existe entre les improvisations de Laurence Coeytaux-Richard et la production sonore du réseau, l'interactivité est parfaitement perceptible pour le spectateur. La distinction entre interactivité endogène et exogène est donc un outil conceptuel fort utile, mais qui connaît certaines limites dans la pratique.

Pour conclure, que l'interactivité soit endogène ou exogène, on ne se trouve pas ici face à une interaction de commande, comme c'est le cas dans l'utilisation d'un programme conventionnel. Le système utilisé est capable d'apprendre par lui-même, en interagissant avec son environnement, grâce à un processus d'auto-organisation de ses éléments constitutifs (les poids synaptiques), et ainsi de produire face à une stimulation donnée, une réponse comportementale non apprise mais adaptée. Il y a donc dans l'interaction qui se crée entre l'agent autonome et son environnement une certaine imprévisibilité, un certain aléa. C'est cette part de hasard, cette situation inédite qui caractérise l'interactivité intelligente.

3.2. Au cœur de l'interactivité

3.2.1. La relation aléatoire

Nous avons vu que face à une stimulation donnée, un agent neuromimétique fournit une réponse imprévisible mais influencée par cette stimulation. Pour le spectateur ou l'utilisateur d'une installation interactive pour réseau de neurones, il y a une part de hasard dans la réponse comportementale du système. Nous allons donc nous intéresser maintenant, au sein de l'interactivité, à cette relation « hasardeuse » qui unit l'homme à la machine.

« Que rend incertain, dans l'avenir, l'intervention du hasard. »¹⁸² Le concept d'aléatoire est en réalité plus difficile à appréhender. Cette définition est celle du sens commun que l'on associe généralement au terme « aléatoire », qui vient du latin, *alea*, qui signifie « dé » ou « hasard ». Jacques Lorigny dans son ouvrage, *Les systèmes autonomes, Relation aléatoire et sciences de l'esprit*, définit le hasard comme un « joker causal » inventé par l'homme pour nommer la cause d'un phénomène dont il ne perçoit pas les déterminismes. Le hasard ne peut donc pas être considéré comme la propriété objective de la cause d'un événement, mais comme une propriété propre au sujet observant cet événement. L'observateur projette le hasard sur la cause de l'évènement. Il nous dit ceci :

« Le monde physique est régi par un principe d'interdépendance générale et le hasard n'existe pas. C'est au niveau des « apparences » qu'il faut se situer, au niveau de la relation impliquant un ou plusieurs sujets connaissant pour qu'apparaisse le hasard qui est donc bien conçu comme un artéfact... »¹⁸³

Cette conception du hasard vient donc bousculer la première définition que nous avons citée. Il apparaît donc que l'aléatoire existe dans le rapport que l'homme entretient aux évènements dont il ne perçoit pas la cause.

Ainsi, le hasard n'existe pas en soi, mais il existe pour soi, dans l'interaction avec un système complexe dont nous ne percevons pas le déterminisme causal. Certains

¹⁸² Paul Robert, Alain Rey, Josette Rey-Debove, *Le nouveau Petit Robert de la langue française 2008, op. cit.*, p. 63.

¹⁸³ Jacques Lorigny, *Les systèmes autonomes, Relation aléatoire et sciences de l'esprit*, Paris, Editions Dunod, 1992, p. XI.

systèmes complexes peuvent créer l'illusion du hasard par un processus que l'on nomme « effet papillon ». Cette métaphore est souvent employée pour vulgariser le phénomène de « sensibilité aux conditions initiales » découvert par Henri Poincaré¹⁸⁴ à la fin du 19^{ème} siècle. Ce phénomène désigne l'instabilité fondamentale d'un système déterministe et dynamique, qui peut rendre ce dernier non prédictible sur le long terme. Cette non prédictibilité est causée par « ... l'amplification macroscopique d'une perturbation initiale microscopique. »¹⁸⁵ Le système nerveux, étant donné sa complexité neurophysiologique, obéit à ce type de phénomènes.

Les réseaux de neurones artificiels peuvent également présenter un certain degré d'imprévisibilité selon les situations. Au cours de la phase d'apprentissage, l'entropie du système varie selon les paramètres des agents neuromimétiques, comme le taux d'apprentissage ou la température, de ce fait, les réponses comportementales du système connexionniste ne peuvent être anticipées de manière précise. Dans certaines situations, un système connexionniste peut converger vers un taux d'erreur nul, et devenir ainsi totalement prédictible, mais la problématique des ingénieurs qui cherchent avec ce type de systèmes à obtenir un apprentissage parfait ou optimum n'est pas celle des artistes. Frédéric Voisin, dans *Symphonie des machines, Caresses de marquises* ou encore *Préludes aux préludes*, modifie en temps réel les paramètres des agents neuromimétiques afin de produire des réponses comportementales riches et inattendues. Il existe donc un certain degré d'instabilité dans les réseaux de neurones artificiels, étant donné que l'on ne maîtrise pas l'ensemble des déterminismes à l'œuvre au sein de la chaîne neuronale, et qu'il est possible de jouer avec certains paramètres afin d'augmenter ou de réduire cette instabilité. L'agent neuromimétique crée donc l'illusion du hasard, et peut entrer en relation aléatoire avec son environnement extérieur.

« Entre les deux parties constitutives de ce système englobant, il existera [...] une relation d'un genre particulier, la *relation aléatoire*. »¹⁸⁶ C'est précisément dans cette interaction entre le système englobant et le système autonome que va se construire la relation aléatoire.

¹⁸⁴ Henri Poincaré, 1854-1912, mathématicien, physicien et philosophe français.

¹⁸⁵ Jacques Lorigny, *Les systèmes autonomes, Relation aléatoire et sciences de l'esprit, op. cit.*, p. 24.

¹⁸⁶ *Ibid.*, p. 3.

Jacques Lorigny nous dit également qu'il existe « ... un indéterminisme véritable, scientifique, mais qui ne réside pas dans le mouvement matériel [...] et dans l'ignorance où le sujet se trouve de son issue finale. »¹⁸⁷ Cet indéterminisme véritable prend forme dans les modalités d'interaction entre l'homme et l'agent autonome : « La relation aléatoire est dans l'acceptation par les acteurs humains des termes du jeu qui les unit. »¹⁸⁸ Prenons l'exemple de l'installation *Le funambule*, de Miche Bret et Marie-Hélène Tramus. L'aléa des rétablissements du funambule virtuel n'existent que parce que le spectateur se prête au jeu et accepte les modalités du dialogue qui l'unit à la machine. Sans cette acceptation, la réponse comportementale du funambule n'est que pur déterminisme. La relation aléatoire n'existe donc que dans l'interaction.

¹⁸⁷ *Ibid.*, p. 24.

¹⁸⁸ *Ibid.*, p. 24.

3.2.2. Perception de l'autonomie et intentions de l'utilisateur

Les réponses aléatoires d'un système neuromimétique sont liées au fait que ce dernier présente un certain degré d'autonomie. Cette autonomie est liée au processus d'apprentissage, de mémorisation et de généralisation des réseaux de neurones. Nous venons de voir à l'instant qu'il est primordial de prendre au jeu l'utilisateur dans une installation interactive pour réseaux de neurones. Pour ce faire, nous allons montrer ici qu'il est nécessaire de permettre à l'utilisateur de percevoir l'autonomie du système, ainsi que l'influence qu'ont ses actions sur le comportement de ce système.

« L'autonomie, et, plus généralement, le comportement d'un système ne pouvant être caractérisé que dans les relations de celui-ci avec son environnement, l'étude d'un système autonome conduira de façon générale à considérer le système englobant celui-ci et son environnement. »¹⁸⁹

Ce n'est que dans l'interaction entre le système étudié et son environnement qu'émerge l'autonomie. Ainsi, dans le cadre de l'interactivité endogène, si un individu extérieur n'a pas la possibilité « d'observer » et de comprendre le rapport existant entre un réseau de neurones et son environnement, il ne peut percevoir son autonomie. Ainsi, d'un point de vue esthétique, la perception de l'autonomie est primordiale dans les installations interactives pour réseaux de neurones, ce qui suppose de mettre en place les conditions d'une interactivité adéquate.

Dans le cadre d'une interactivité endogène, comme c'est le cas dans l'installation *Last manoeuvres in the dark*, la perception de l'autonomie des réseaux de neurones est limitée étant donné que le modèle de la production sonore n'est pas entendu. L'auditeur comprend à l'écoute que les propositions musicales sont aléatoires et obéissent à une certaine esthétique, mais ne saisit pas l'autonomie de cette installation.

En revanche, dans la performance *Préludes aux préludes*, il y a interactivité exogène entre l'agent autonome et la pianiste. Ainsi, il est possible d'entendre le réseau de neurones adapter sa production sonore en fonction des improvisations de Laurence

¹⁸⁹ Marie-José Barbot, Giovanni Camatarri, *Autonomie et apprentissage, L'innovation dans la formation*, Paris, Editions Presses Universitaires de France, 1999, p. 3.

Coeytaux-Richard. Etant donné que le système neuromimétique tend vers une imitation du matériau proposé par la pianiste, la situation d'interactivité devient perceptible.

Dans le cadre d'une interactivité exogène, l'autonomie de l'agent connexionniste est plus facilement perceptible étant donné que l'œuvre produite est mobile, imprévisible, au regard de l'utilisateur qui interagit avec elle. Cependant, une exigence s'ajoute à la première situation. Comme nous l'avons vu plus haut, la relation aléatoire suppose de prendre au jeu l'utilisateur du système aléatoire, ce qui implique donc de mettre en place une situation d'interaction entre la machine et son utilisateur en fonction des intentions de ce dernier. Même si la réponse comportementale du système connexionniste est imprévisible, elle doit, dans la mesure du possible, faire sens pour son utilisateur.

Reprenons l'exemple de *Préludes aux préludes*. Etant donné que le réseau a pour but d'imiter un matériau, et que ce matériau est perceptible, la situation d'interactivité devient intelligible d'un point de vue qualitatif. La pianiste ainsi que les spectateurs sont en mesure de comprendre en quoi le matériau musical provenant du piano modifie le comportement du ROSOM. Ainsi, le lien entre stimuli et modification comportementale devient suffisamment signifiant pour la pianiste, afin qu'elle se prête à ce jeu d'interactions et explore les possibilités sonores de ce dialogue, et pour les spectateurs, qui comprennent ainsi l'intérêt esthétique de cette performance.

« ... dans la réalité électronique des systèmes, il est souvent nécessaire de ralentir les processus des ordinateurs car leur temps de réaction est beaucoup plus rapide que celui de la perception. En ce sens, un système interactif fonctionne toujours sur l'illusion [...] La réalité de cette relation action/réaction importe donc moins que sa construction conceptuelle. »¹⁹⁰

D'un point de vue esthétique, la perception que l'utilisateur a d'un système autonome est plus importante que son autonomie réelle. Il est donc primordial d'intégrer dans le processus d'interactivité, à travers les réponses comportementales du système connexionniste, une certaine satisfaction des attentes de l'utilisateur. Ce dernier doit être en mesure de comprendre en quoi son comportement affecte celui de la machine :

¹⁹⁰ Jean-Pierre Balpe, *Contextes de l'art numérique*, op. cit., p. 160.

« Si les acceptions de l'interactivité diffèrent d'un auteur à un autre, il n'en demeure pas moins qu'elles s'accordent à la considérer comme la capacité d'un système technique à répondre et à intégrer dans sa logique technique les supposés besoins d'échange homme/machine de l'utilisateur. »¹⁹¹

¹⁹¹ Céline Baron, *À la recherche de l'interactivité*, Rennes, Mémoire de Maîtrise, 1996, p. 69.

3.2.3. Mise en forme de l'interactivité

La situation d'interactivité qu'autorise un système interactif, intégré au sein d'un dispositif artistique, peut être mise en scène de différentes manières. En d'autres termes, le statut de l'utilisateur amené à interagir avec l'œuvre peut changer d'une installation à l'autre, et induit de fait certaines conséquences esthétiques.

« L'interactivité en art peut prendre des sens exagérément extensifs. Tout en cherchant à inscrire les principes d'interactivité dans une tradition d'étude de la place du spectateur, de l'organisation de l'interaction avec l'œuvre, il convient de ne pas perdre de vue le sens technique que lui donne l'informatique. Pour ma part, j'ai tenté de cerner en quoi l'interactivité technologique imposait de nouvelles modalités au processus de l'œuvre. »¹⁹²

Nous avons vu que dans les installations musicales interactives intégrant un système connexionniste dans le processus de réalisation sonore, deux éléments principaux permettaient d'interagir avec l'œuvre : l'environnement du système connexionniste, c'est à dire le déclenchement des vecteurs d'entrée présentés aux agents neuromimétiques, ainsi que leurs paramètres d'apprentissage. Nous allons voir que les situations d'interactivité qu'autorisent ces installations peuvent être mises en forme de différentes manières au sein de l'œuvre.

La première situation que nous retiendrons est celle de *Caresses de marquises* et *Symphonie des machines*. Au sein de ces deux installations, ce sont les auteurs qui sont amenés à interagir avec les systèmes neuronaux. Frédéric Voisin et Robin Meier contrôlent en effet l'environnement lumineux des modules connexionnistes ainsi que leurs paramètres d'apprentissage afin de générer des comportements musicaux. Les systèmes connexionnistes développés dans ces deux installations autorisent une forme d'interactivité, et imposent, pour reprendre les termes de Jean-Louis Boissier, de nouvelles modalités au processus de l'œuvre. Cependant, si nous nous intéressons à la place du spectateur, nous constatons qu'il n'est en mesure de comprendre ni la situation d'interactivité qui unit les auteurs aux systèmes connexionnistes, ni la nature du traitement réalisé par ces systèmes.

¹⁹² Jean-Louis Boissier, *La relation comme forme, l'interactivité en art*, op. cit., p. 180.

Si nous nous intéressons maintenant à une installation comme *Préludes aux préludes*, nous pouvons constater que la mise en scène de la situation d'interactivité propre à cette œuvre est sensiblement différente. Deux utilisateurs sont en effet amenés à interagir avec le système connexionniste. Une pianiste, qui crée et modifie en temps réel, en improvisant au piano, l'environnement de l'agent neuromimétique, et Frédéric Voisin qui en modifie les paramètres d'apprentissage. Cette performance repose sur une singularité esthétique étant donné que c'est la seule, parmi celles que nous avons citées, à intégrer un instrument traditionnel comme source du comportement sonore du système connexionniste. Le résultat sonore de cette installation est donc de la musique mixte, et la relation existant entre les deux sources sonores de l'œuvre est partiellement explicitée par la mise en scène de la situation d'interactivité entre la pianiste et le système connexionniste. L'œuvre fait intervenir son auteur ainsi qu'une interprète professionnelle pour interagir avec le système, le spectateur n'est donc toujours pas convié à participer au processus de création. Cependant, la mise en scène de la performance permet aux spectateurs de comprendre la situation d'interactivité qu'autorise ce système neuromimétique.

« L'œuvre interactive réactive en effet la notion d'interprétation, au sens de l'artiste interprète de l'œuvre théâtrale, ou plutôt musicale, c'est-à-dire sur partition. Le travail esthétique de l'interactivité s'exprime dans une partition, un livret, un argument. C'est à dire qu'il ne saurait se dispenser d'interprète, interprète désigné d'ailleurs lui-même, d'ordinaire, comme artiste, dans le sens où, pour le public, les artistes, ce sont d'abord les interprètes. »¹⁹³

Il nous semble qu'il serait intéressant à l'avenir de développer des installations musicales interactives pour systèmes connexionnistes permettant aux spectateurs de se faire les interprètes de l'œuvre. Afin d'exploiter pleinement ce potentiel que constitue l'interactivité intelligente, il faut « ouvrir » davantage les installations et intégrer les spectateurs dans le processus de création. Une œuvre comme *Le funambule* pourrait trouver son écho dans le monde musical, en permettant aux spectateurs d'orienter le comportement musical d'un système connexionniste, en modifiant son environnement ainsi que ses paramètres, via une situation d'interactivité exogène.

¹⁹³ *Ibid.*, p. 24.

3.3. Discussion

3.3.1. Intérêt esthétique des installations musicales pour réseaux de neurones

Les installations pour réseaux de neurones, en tant que pratique à part entière de l'art informatique, ne présente pas qu'un simple intérêt poïétique. Elles s'affirment au sein du paysage de l'art numérique comme une entité autonome, capables de produire un texte artistique d'intérêt certain, dépassant l'image péjorative d'art expérimental que l'on peut en avoir :

« L'art informatique a longtemps été identifié à une démarche cybernétique, à des notions de variabilité, de combinatoire, d'aléatoire. Ce faisant, on privilégiait le processus contre le résultat, on escomptait la beauté du logiciel. Cette dimension conceptuelle reste d'une grande puissance esthétique. Mais elle nous force précisément à constater l'émergence de produits complexes, hybrides, mais autonomes, propres à vivre une confrontation avec un public. »¹⁹⁴

Le principe d'aléa contrôlé est au cœur de l'esthétique des œuvres pour réseaux de neurones. Ce qui se joue dans l'interactivité intelligente est justement de l'ordre du contrôle. Quelle est la part de contrôle dont dispose l'utilisateur ? Quelle est la part de contrôle dont dispose le système informatique ? Ce rapport contrôle/autonomie devient un paramètre à part entière qui détermine l'esthétique de l'œuvre, et c'est de son écriture que dépend la qualité de la situation d'interactivité entre l'utilisateur et la machine.

« L'aléatoire en effet donne à la rigueur algorithmique des degrés de liberté. Il introduit de l'improbables dans le programmable. Il constitue ainsi un élément majeur du péritexte de l'art numérique car il pose, de façon esthétique et en tant que matériau à travailler, la question du contrôle [...] Se situant dans une lignée plus contemporaine de l'art, dans l'art numérique, l'artiste accepte de perdre le contrôle mais, paradoxalement, c'est en jouant sur la perte et sur la maîtrise, en donnant une forme au hasard et non en s'y abandonnant, qu'il situe une part de son art. »¹⁹⁵

L'interactivité de l'œuvre est à l'origine d'une esthétique du potentiel. Le compositeur élabore un univers en puissance dont il fixe les limites que l'utilisateur va pouvoir

¹⁹⁴ Jean-Louis Boissier, *La relation comme forme, l'interactivité en art, op. cit.*, p. 122.

¹⁹⁵ Jean-Pierre Balpe, *Contextes de l'art numérique, op. cit.*, p. 148.

découvrir en interagissant avec les agents connexionnistes. De fait, au delà de cette idée d'un univers musical en puissance, l'utilisateur du système connexionniste ainsi que le protocole de dialogue les unissant intègrent l'esthétique de l'œuvre. Utilisateur, interface, système connexionniste, interactivité et production sonore sont autant d'éléments du texte artistique :

« On peut ainsi décrire une œuvre interactive comme une entité virtuelle à explorer, à manipuler ou même à révéler ou faire naître par l'intermédiaire d'une interface. Mais il est plus juste de désigner comme œuvre tout cet ensemble, précisément. Le spectateur, pris dans le jeu des interactions, fait lui même partie intégrante de la proposition artistique. »¹⁹⁶

A travers cette situation d'interactivité, l'utilisateur a la possibilité d'expérimenter plusieurs expressions, plusieurs lectures de l'œuvre musicale. La question qu'il convient alors de se poser est la suivante : qu'est ce qui fait œuvre ? Est-ce l'univers potentiel défini par le compositeur, ou bien les différentes lectures proposées par les utilisateurs ? Il est a priori possible d'envisager ces deux possibilités, selon le point de vue que l'on adopte. Nous pouvons nous attacher à la finalité de l'installation qui est de proposer une production mobile, aléatoire mais obéissant à certains critères esthétiques, ou bien nous intéresser à l'interaction entre un utilisateur et l'installation qui ne propose qu'une lecture de l'œuvre, mais développe différentes dynamiques comportementales au sein de la représentation : « L'interactivité « locale » (dialogue homme/machine) est ainsi opposée à l'interactivité « globale » (sens, finalité de l'échange)... »¹⁹⁷

¹⁹⁶ Jean-Louis Boissier, *La relation comme forme, l'interactivité en art, op. cit.*, p. 222.

¹⁹⁷ Céline Baron, *A la recherche de l'interactivité, op. cit.*, p. 13.

3.3.2. Rapport œuvre/utilisateur : la dramaturgie de l'interactivité intelligente

L'implication d'un utilisateur au sein de l'installation en tant que puissance de décision modifie le rapport que ce dernier entretient à l'œuvre : « Déjà, parler d'œuvre interactive pose la contradiction apparente d'un auteur et d'un spectateur, [...] d'un auteur et d'un lecteur qui se disputeraient l'acte décisif de la création. »¹⁹⁸

Comme nous l'avons vu dans notre chapitre précédent, dans le cadre d'une installation interactive pour réseaux de neurones, les rapports entretenus entre le compositeur, œuvre et interprète sont d'une nature particulière. L'acte décisif de la création peut appartenir au compositeur comme à l'utilisateur du système informatique, tout dépend de la conception que l'on a de l'ouverture. Si on la considère comme un paramètre musicale, alors cet acte décisif appartient au compositeur, si en revanche on estime que l'ouverture existe pour laisser à l'interprète une part de responsabilité dans la création, l'acte compositionnel est en effet partagé. Comme Jean-Pierre Balpe nous l'a dit plus tôt, l'artiste cherche à donner forme au hasard, il ne s'y abandonne pas. Nous considérerons donc que l'acte compositionnel appartient au compositeur et à lui seul. Cependant, le rapport existant entre l'utilisateur et l'œuvre présente un intérêt esthétique certain.

« D'un côté, la machine dispose d'une logique technique interne (programmation, ordonnancement des séquences...) qui imprime de facto certains modes de faire, d'usages. De l'autre, l'usager est en mesure de greffer ses propres pratiques, ses propres aspirations (subjectives) sur la rationalité interne de la machine. »¹⁹⁹

Cette situation d'interactivité entre la subjectivité d'un individu autonome et la rationalité de la machine simulant un comportement autonome donne lieu à une esthétique, à une dramaturgie particulière : Jean-Louis Boissier parle d'une esthétique du potentiel²⁰⁰ pour définir cette situation, d'une poétique du feuilletage, du déclenchement, de la bifurcation. Le compositeur délimite les frontières d'un univers musical en puissance, jamais accessible dans sa totalité, comme produit de l'interactivité intelligente entre l'utilisateur et le système connexionniste. Cette esthétique du potentiel

¹⁹⁸ Jean-Louis Boissier, *La relation comme forme, l'interactivité en art, op. cit.*, p. 23.

¹⁹⁹ Céline Baron, *A la recherche de l'interactivité, op. cit.*, p. 68.

²⁰⁰ Jean-Louis Boissier, *La relation comme forme, l'interactivité en art, op. cit.*, p. 182.

est d'autant plus forte dans le cadre de l'interactivité intelligente que la réponse du système est aléatoire.

Dans le cadre d'une installation interactive exogène, l'utilisateur interagissant avec la machine, peut contrôler, au moyen de l'interface, dans une certaine mesure définie par le compositeur, la forme et le contenu de la production sonore : « Le mouvement, ordinairement distribué par le spectacle, devient pourtant accessible dans la lecture interactive [...] On envisagera une formalisation de ce feuilletage pour dégager un poétique du déclenchement et de la bifurcation. »²⁰¹ L'interactivité intelligente ajoute à cette poétique du déclenchement une dramaturgie de l'émergence, du mouvement entre incompréhension et compréhension, entre comportement aléatoire et comportement adapté. L'interactivité de seconde génération doit mettre en place les modalités d'une communication intelligente homme/machine, voire même d'un processus permettant à la machine de s'adapter dans le temps aux sollicitations de l'utilisateur.

Ce rapport engendre une forme de jeu entre l'utilisateur et le système connexionniste basé sur une sorte de principe de tension/détente, de satisfaction des attentes et de déception :

« Le jeu s'installe entre les connaissances ou les attendus du percepteur qui sait, ou croit savoir, ce qu'est un système numérique qu'il situe entre la machine à calculer et le système intelligent, donc le rationnel et le réalisme ; et ce que conçoit le créateur qui répond partiellement déçoit ou perturbe ces attentes. »²⁰²

La puissance dramaturgique d'une installation interactive pour réseaux de neurones repose sur ce jeu, sur cette acceptation des conditions unissant l'utilisateur au système connexionniste :

« La puissance dramatique du virtuel réside dans cet appel à être actualisé, dans le désir d'accès, de déclenchement, d'exploration et de découverte. L'inévitable déception qu'engendre l'expérience des limites de l'interactivité révèle autant sa dimension artistique que son efficacité critique. »²⁰³

²⁰¹ *Ibid.*, p. 182.

²⁰² Jean-Pierre Balpe, *Contextes de l'art numérique*, *op. cit.*, p. 198.

²⁰³ Jean-Louis Boissier, *La relation comme forme, l'interactivité en art*, *op. cit.*, p. 145.

3.3.3. Analyse critique de l'œuvre

« L'esthétique interactive bénéficie d'une continuité sans précédent entre les deux registres ordinairement séparés de la production et de la réception. L'interactivité se joue en deux niveaux simultanés d'un acte de langage : dans l'œuvre, par ce qui est une condition de l'œuvre, et, en un reflet décalé, dans l'accès à l'œuvre. Car l'interactivité en art n'est pas ce qui règle la relation à l'œuvre. Elle est une partie constitutive de l'œuvre elle-même, comme condition de l'actualisation d'un virtuel. »²⁰⁴

Il n'est pas évident de distinguer les aspects poïétiques et esthésiques en ce qui concerne l'analyse des installations interactives, étant donné que, comme nous l'avons vu, l'interactivité est à la fois la condition d'accès à l'œuvre et l'un de ses éléments à part entière de son esthétique. Nous allons cependant tâcher de proposer une méthode afin d'envisager l'analyse de l'œuvre d'un point de vue esthétique.

L'analyse du seul matériau musical, produit par le module de synthèse, ne suffit pas à faire sens dans une installation intégrant un système connexionniste dans le processus de réalisation sonore de l'œuvre. L'objectif de cette pratique est d'explorer le potentiel que constitue l'expression sonore des dynamiques d'apprentissage que l'on peut développer via les systèmes connexionnistes. Ainsi, l'analyse esthétique de l'œuvre suppose de prendre en compte les réglages des paramètres des agents neuromimétiques, afin de déterminer leurs dynamiques d'apprentissage, et le comportement musical qui en résulte. Il existe cependant une exception qui concerne les installations visant à modéliser via un système connexionniste les processus poïétiques d'une ou plusieurs œuvres musicales. Une analyse paradigmatique entre le matériau musicale source et celui produit par le système connexionniste peut alors faire sens afin de déterminer les rapports d'équivalence existant entre le modèle et la production musicale qui s'en inspire. Une telle analyse pourrait éventuellement négliger l'évolution des paramètres du système connexionniste. Si nous prenons l'exemple de *Last manoeuvres in the dark*, il faut tout de même considérer le rôle déterminant des paramètres des agents neuromimétique dans le résultat sonore, et reconnaître qu'une analyse musicale qui négligerait ces paramètres perdrait beaucoup de son sens.

²⁰⁴ *Ibid.*, p. 232.

La difficulté que pose l'analyse de ce type d'œuvre est en grande partie liée à la complexité des systèmes qui dépendent d'un grand nombre de données. On ne conserve généralement que des enregistrements sonores comme traces de ces installations, parfois quelques vidéos, ce qui s'avère être insuffisant pour effectuer une analyse pertinente de ce type d'œuvre. Trois solutions peuvent alors permettre de remédier à ce problème.

Le compositeur peut lui-même réaliser l'analyse de son travail en croisant les paramètres des agents neuromimétiques avec leurs productions sonores afin de déterminer les dynamiques d'apprentissages du système connexionniste et les comportements musicaux qui en résultent. C'est ce que fait par exemple Robin Meier avec sa performance *For Alan Turing*, en réalisant lui-même son analyse et en la restituant dans son mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de l'EHESS. Frédéric Voisin et Robin Meier ont également analysé les dynamiques d'apprentissage de certains agents neuromimétiques lors des répétitions de *Caresses de marquises*.

Une seconde solution pourrait consister à intégrer au dispositif les outils permettant son analyse. Il s'agirait de mémoriser simultanément, dans le temps de la création de l'œuvre, les paramètres des agents neuromimétiques, les modifications de leur environnement, ainsi que le résultat sonore. Dans un second temps, il serait intéressant de développer une interface permettant de restituer ces données pendant la lecture de l'enregistrement sonore. Ainsi, l'analyse de l'influence des paramètres des agents neuromimétiques sur le comportement musical du système connexionniste serait plus commode.

Enfin, il est toujours possible pour un musicologue de travailler, après la création de l'œuvre, en collaboration avec ses auteurs afin de recréer les conditions de cette création, et ainsi d'obtenir les données neuromimétiques nécessaires à l'analyse de l'œuvre. Cependant, pour des installations d'envergure comme *Last manœuvres in the dark* ou *Symphonie des machines*, cette troisième méthode peut s'avérer problématique car la puissance de calcul mise en jeu lors de la création de l'œuvre n'est plus à disposition. Il faut alors envisager de travailler avec une adaptation du système connexionniste, capable de reproduire la nature du traitement neuromimétique de l'œuvre, avec une puissance de calcul plus modeste. Nous avons envisagé d'effectuer ce

travail d'analyse avec Frédéric Voisin pour l'installation *Last manœuvres in the dark*, mais le temps nous a manqué pour regrouper et traiter les données nécessaires.

Dans un second temps, il semble nécessaire de s'attacher aux modalités de l'interaction entre l'utilisateur et le système connexionniste. Il est important d'évaluer le degré de perceptibilité du comportement des agents neuromimétiques, ainsi que la nature de leurs réponses comportementales en fonction des intentions du ou des utilisateurs : « Ce serait donc dans leur capacité à anticiper l'intelligence et les besoins des usagers que de tels systèmes de création trouveraient leur véritable interactivité. »²⁰⁵ La richesse de la situation d'interactivité qui unit l'utilisateur au système connexionniste semble primordiale dans l'analyse esthétique d'une installation interactive pour réseaux de neurones. Il faut envisager la situation d'influence réciproque existant entre l'homme et la machine, discuter la nature et la fonction de ces processus d'influence, et analyser leur cohérence par rapport au propos musical : « L'interactivité des systèmes tiendrait donc à leur capacité à générer une situation d'échange aussi riche, complexe et réciproque que celles qui se nouent dans les relations interpersonnelles directes. »²⁰⁶

Afin de mieux mesurer la pertinence des modalités de mise en place d'une situation d'interactivité, il est possible d'envisager sa finalité. Céline Baron parle d'interactivité globale pour désigner la finalité de l'échange entre l'homme et la machine. Il n'est certes pas évident, dans le cadre d'une situation d'interactivité intelligente utilisée pour réaliser une production sonore, d'envisager ce que pourrait être la finalité de l'œuvre. Cependant nous savons qu'une telle installation à pour but, en faisant interagir un système autonome et un utilisateur, de produire différentes lectures d'un même paradigme compositionnel, d'explorer un univers sonore circonscrit au préalable par le compositeur en créant différentes dynamiques comportementales chez les agents neuromimétiques. Satisfaire à cette exigence peut déjà constituer un critère d'analyse de l'esthétique d'une œuvre interactive pour réseau de neurones :

« La finalité d'une machine, dans son utilisation par l'homme, n'est pas une caractéristique de son organisation, mais du domaine dans lequel elle fonctionne : elle renvoie donc à une description de la machine dans un domaine plus vaste que la machine elle-même [...]

²⁰⁵ Céline Baron, *A la recherche de l'interactivité*, op. cit., p. 24.

²⁰⁶ *Ibid.*, p. 32.

Lorsque nous voulons faire comprendre à un interlocuteur l'organisation d'une machine particulière, nous utilisons le concept de fin parce qu'il éveille son imagination et, de ce fait, réduit notre tâche explicative. En d'autres termes, le concept de fin invite l'interlocuteur à réinventer la machine dont nous parlons. »²⁰⁷

Autrement dit, il s'agit d'évaluer l'ergonomie cognitive de l'interactivité intelligente qui unit le sujet au système connexionniste, en envisageant cette situation de dialogue sous l'angle de sa finalité : faire émerger des comportements musicaux signifiants pour le sujet, qui oriente les dynamiques d'apprentissage du système connexionniste à l'origine de ces comportements.

²⁰⁷ Francisco J. Varela, *Autonomie et connaissance, Essai sur le Vivant*, op. cit., p. 44.

Conclusion

Les systèmes connexionnistes constituent un potentiel considérable en matière de modélisation de processus cognitifs complexes, que les programmes informatiques standards d'intelligence artificielle ne parviennent pas à formaliser. Les réflexions sur la cognition musicale, conduites depuis l'apparition des sciences cognitives ont ainsi abouti à des expérimentations visant à modéliser des processus compositionnels grâce aux réseaux de neurones.

De ces expérimentations découlent différentes pratiques concernant l'utilisation des agents neuromimétiques au sein du domaine musicale. Nous avons vu que les systèmes connexionnistes pouvaient être utilisés dans le cadre d'une aide à la composition, constituer des modèles de cognition musicale ou être intégrés dans le processus de réalisation sonore d'une œuvre. Nous nous sommes donc penchés sur cette dernière pratique.

Le discours musical produit dans le cadre d'une œuvre ayant recours aux réseaux de neurones dans son processus de réalisation sonore obéit à une syntaxe. En tant qu'objet constitué de signes et propre à suggérer diverses significations, c'est à dire en tant qu'objet sémiologique, une telle œuvre peut être envisagée sous l'angle des processus poïétiques ayant conduit à sa création, ainsi que sous l'angle des processus esthétiques permettant de lui attribuer diverses significations.

Nous nous sommes donc intéressés dans un premier temps aux conséquences poïétiques induites par l'utilisation des agents neuromimétiques dans le processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale. Nous avons pu constater que les systèmes connexionnistes impliqués dans cette pratique sont généralement constitués d'une interface de contrôle, d'un module connexionniste et d'un module de synthèse sonore. A ce titre, nous avons établi que le module connexionniste fait l'objet d'une écriture qui consiste à définir les modalités d'apprentissage des agents neuromimétiques qui le composent. En lien étroit avec ce travail de programmation, la mise au point du système connexionniste dans sa globalité, à travers les modules de contrôle et de synthèse sonore, fait l'objet d'un travail d'écriture, au même titre que la lutherie numérique, plus ou moins facilité par l'ergonomie du langage de programmation choisi pour sa formalisation. Nous avons noté que la complexité de ces systèmes pouvait engendrer une certaine inertie au cours de leur développement, induisant de fait certaines contraintes durant la phase d'expérimentation. Il faut avant tout envisager cette

technologie comme un outil dont le développement n'en est qu'à ses balbutiements. Au même titre que l'informatique musicale, les technologies neuromimétiques appliquées à la réalisation sonore demandent un travail de recherche et d'expérimentations approfondies afin d'être à même de présenter des modèles ergonomiques susceptibles d'être pris en main de manière intuitive.

Le développement d'un système neuromimétique dans le cadre d'une œuvre musicale obéit à des exigences particulières. La problématique du compositeur n'est pas nécessairement celle de l'ingénieur qui cherche avant tout l'optimisation des performances de son réseau de neurones. Son intérêt se situe plus dans l'exploration des différentes dynamiques d'apprentissage des agents neuromimétiques, afin de développer des comportements musicaux riches et diversifiés. Ainsi, les installations musicales pour réseaux de neurones cherchant à démontrer les performances de ces programmes en matière d'optimisation ne sont pas celles qui exploitent au mieux leur potentiel en termes de comportements musicaux. La possibilité de déterminer, via une interface adaptée, dans une situation proche du contrôle instrumental, les paramètres des agents neuromimétiques ainsi que leur environnement afin d'initier des dynamiques comportementales, perceptibles musicalement, représente l'un des enjeux majeurs de cette pratique. Définir ces modalités de contrôle, constitue pour le compositeur un travail d'écriture de l'interactivité entre l'utilisateur et le système neuronal. La poïésis de l'œuvre musicale intégrant un traitement connexionniste dans son processus de réalisation sonore suppose donc deux étapes. Une première où le compositeur circonscrit au sein du système connexionniste un potentiel sonore, un univers musical en puissance. Une deuxième où il détermine les modalités de l'accès, de la matérialisation, de l'exploration de ce potentiel musical, par l'écriture de l'interactivité entre l'homme et la machine.

Cette pratique déplace les rapports existant dans la musique électroacoustique entre l'œuvre, son compositeur, l'interprète et l'instrument, particulièrement quand l'environnement ainsi que les paramètres du système connexionniste sont contrôlés par un utilisateur. L'œuvre n'émerge qu'à la condition d'un dialogue, d'une interaction entre la subjectivité de l'homme et la rationalité de la machine simulant un comportement autonome. L'utilisateur explore à travers cette situation d'interactivité, à la manière d'un chef d'orchestre dirigeant avec plus ou moins de souplesse la population d'agents

neuromimétiques, le potentiel esthétique du système, dont le compositeur est l'architecte, le luthier. Au sein de ce système, les agents neuronaux se font les interprètes des mouvements de leur environnement, qu'ils expriment musicalement via le module de synthèse sonore qui constitue leur instrument. Le potentiel de ces installations réside dans leur capacité à intégrer des processus compositionnels, que le module connexionniste va interpréter, afin d'en proposer différentes lectures en fonction des dynamiques d'apprentissage qu'il développe. Nous avons d'ailleurs remarqué que la nature de la synthèse sonore, dans les installations de ce type, est généralement déterminée par une volonté de démonstration du potentiel des systèmes neuromimétique, propre à cette pratique.

Nous nous sommes intéressés dans un deuxième temps aux conséquences esthétiques induites par l'utilisation des agents neuromimétiques dans le processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale. Nous avons constaté que les systèmes neuromimétiques amènent les compositeurs à utiliser l'aléatoire comme matériau musical. Les paramètres d'apprentissage des agents neuromimétiques permettent d'introduire plus ou moins d'aléa dans leurs réponses comportementales, proposant ainsi une production sonore mobile qui ne se reproduit jamais de la même façon. Les installations musicales pour réseaux de neurones constituent également des systèmes génératifs. Le matériau produit par l'installation s'élabore dans le contexte même de l'œuvre et en fonction de celui-ci. Ainsi l'œuvre en tant que système génératif présente toujours un certain degré d'autonomie dans son comportement, donc une certaine ouverture, et peut autoriser des interactions. D'un point de vue cybernétique, elle présente une clôture opérationnelle, qui constitue son autonomie, et une ouverture thermodynamique, qui lui permet d'interagir avec son contexte. L'élément clé de l'esthétique propre à cette pratique est lié à la situation d'interactivité intelligente que les réseaux de neurones permettent de créer. Lorsqu'un système connexionniste autorise des interactions avec un utilisateur, ce dernier se trouve dans une situation d'interactivité intelligente avec l'œuvre. Le sujet n'est pas en mesure d'anticiper les comportements musicaux des agents neuromimétiques, mais leur comportement est influencé par les modifications qu'il effectue, tant sur leur environnement, que sur leurs paramètres de contrôle.

En acceptant les modalités qui l'unissent au système connexionniste, l'utilisateur se trouve pris dans une relation de type aléatoire. Ce n'est qu'à travers cette acceptation

qu'il est possible d'envisager l'autonomie du système. Ainsi, nous avons pu constater qu'il est nécessaire, afin que l'esthétique de l'œuvre reflète la nature du traitement qui l'engendre, de mettre en place les conditions d'une lecture de l'interactivité. L'utilisateur du système doit être en mesure de comprendre en quoi ses interventions affectent le comportement des agents neuromimétiques. Lorsque les spectateurs ne sont pas invités à interagir avec le système, l'installation doit faire démonstration de la situation d'interactivité existant entre les agents neuromimétiques et leur environnement. Dans le cas contraire, la virtuosité poïétique à l'origine de l'installation ne trouve pas son écho dans l'esthétique de l'œuvre. Les systèmes neuromimétiques présentent en effet divers potentiels parmi lesquels nous avons essentiellement retenu l'interactivité de seconde génération, la modélisation de processus compositionnels et l'exploitation musicale de dynamiques d'apprentissage. Il est cependant difficile de mettre en place une installation faisant montre de chacun de ces potentiels. Ainsi, l'interactivité peut être dans certaines œuvres un aspect négligé au profit de la mise en valeur d'autres capacités des systèmes connexionnistes.

Nous avons remarqué que l'œuvre constitue un ensemble au sein duquel le matériau musical ne fait pas sens sans les informations concernant l'état d'apprentissage des agents neuromimétiques. Il est ainsi nécessaire d'envisager pour l'avenir de cette pratique, le développement de systèmes d'analyse et de stockage des données neuromimétiques accompagnant la production du matériau musical, étant donné que d'un point de vue analytique, l'un ne peut pas aller sans l'autre. Nous avons enfin constaté que les systèmes neuromimétiques utilisés dans le processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale sont à l'origine d'une esthétique de la tension entre aléatoire et détermination, entre autonomie et contrôle. Ces installations font l'objet d'une écriture délicate, de la maîtrise de l'aléa, de la perte de contrôle. Ce travail s'inscrit dans une poétique du feuilletage, du déclenchement et donne lieu à une dramaturgie de l'émergence, de l'adaptation, du mouvement entre chaos et cohérence.

Sources et références documentaires

Bibliographie

Ouvrages

ABDI, Hervé, *Les réseaux de neurones*, Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble, 1994.

ABRAHAMSEN, Adèle, BECHTEL, William, *Le connexionnisme et l'esprit, Introduction au traitement parallèle par réseaux*, Paris, Editions La Découverte, 1993.

AMAT, Jean-Louis, YAHIAOUI, Gérard, *Techniques avancées pour le traitement de l'information. Réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques*, Toulouse, Cépadues éditions, 2002.

BALPE, Jean-Pierre, *Contextes de l'art numérique*, Paris, Editions Hermès Science, 2000.

BARBOT, Marie-José, CAMATARRI, Giovanni, *Autonomie et apprentissage, L'innovation dans la formation*, Paris, Editions Presses Universitaires de France, 1999.

BARON, Céline, *A la recherche de l'interactivité*, Rennes, Mémoire de Maîtrise, 1996.

BLAYO, François, VERLEYSSEN, Michel, *Les réseaux de neurones artificiels*, Paris, Presses Universitaires de France, 1996.

BOISSIER, Jean-Louis, *La relation comme forme, l'interactivité en art*, Genève, Editions Mamco, 2004.

CLERGUE, Gérard, *L'apprentissage de la complexité*, Paris, Editions Hermès, 1997.

COUCHOT, Edmond, HILLAIRES, Norbert, *L'art numérique*, Paris, Editions Flammarion, 2003.

DAVALO, Eric, NAÏM, Patrick, *Des réseaux de neurones*, Paris, Editions Eyrolles, 1993.

DELIEGE, Célestin, *Cinquante ans de modernité musicale : De Darmstadt à l'IRCAM*, Sprimont, Editions Mardaga, 2003.

JODOUIN, Jean-François, *Les réseaux de neurones, principes et définitions*, Paris, Editions Hermès, 1994.

JODOUIN, Jean-François, *Les réseaux neuromimétiques*, Paris, Editions Hermès, 1994.

KISS, Jocelyne, *Composition musicale et sciences cognitives, Tendances et perspectives*, Paris, Editions l'Harmattan, 2004.

LORIGNY, Jacques, *Les systèmes autonomes, Relation aléatoire et sciences de l'esprit*, Paris, Editions Dunod, 1992.

MACCLELLAND, L. James, RUMELHART, E. David, *Parallel Distributed Processing*, Londres, Editions MIT Press, 1987.

MANOURY, Philippe, *La note et le son, Ecrits et entretiens 1981-1998*, Paris, Editions L'Harmattan, 1998.

MEIER, Robin, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, Paris, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de l'EHESS, dirigé par Jérôme Dokic, sous la tutelle de Frédéric Voisin alors responsable de la recherche sur le projet « Neuromuse » au CIRM, Centre National de Création Musicale, 2007.

NADAL, Jean-Pierre, *Réseaux de neurones, De la physique à la psychologie*, Paris, Editions Armand Colin, 1993.

REY, Alain, REY-DEBOVE, Josette, ROBERT, Paul, *Le Nouveau Petit Robert de la langue française 2008*, Paris, Editions Le Robert, 2008.

ROGERS, Joey, *Object-oriented Neural Networks in c++*, San Diego, Editions Academic press INC, 1997.

ROY, Stéphane, *L'analyse des musiques électroacoustiques : Modèles et propositions*, Paris, Editions l'Harmattan, 2003.

RUWET, Nicolas, *Langage, musique, poésie*, Paris, Editions du Seuil, 1972.

VARELA, J. Francisco, *Autonomie et connaissance, Essai sur le Vivant*, Paris, Editions du Seuil, 1989.

Articles

ASSAYAG, Gérard, « Du calcul secret au calcul visuel », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999.

BARUCHA, J. Jamshed, OLNEY, Katherine, « La cognition tonale, l'intelligence artificielle et les réseaux neuronaux », dans *La musique et les sciences cognitives*, Liège, Editions Pierre Mardaga, 1989.

BAYLE, François, « Table ronde », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999.

BEAUDOUIN-LAFON, Michel, « Moins d'interface pour plus d'interaction », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999.

BOSSIS, Bruno, « De l'amplification à l'autonomie de l'instrument : ruptures électroniques et conséquences esthétiques », dans *Analyse musicale*, n°61, décembre 2009.

BOSSIS, Bruno, « Ecriture instrumentale, écriture de l'instrument », dans *Actes du colloque international : Composer au XXIe Siècle – Processus et Philosophies*, Montréal, 28 février - 3 mars 2007, à paraître, PDF donné par l'auteur.

BOSSIS, Bruno, « Musicology and Communication Theories : Real Time and Interaction in Music understood as Circulation of Information », dans *Electroacoustic music – Technologies, aesthetics, and theories – A musicological challenge*, Essen, Editions Die Blaue Eule, 2008.

CADOZ, Claude, « Musique, geste, technologie », dans *Les nouveaux gestes de la musique*, Marseille, Editions Parenthèses, 1999.

CORIN, Florence, KUYPERS, Patricia, « L'interactivité intelligente, Entretien avec Michel Bret et Marie-Hélène Tramus », dans *Contredanse*, n°52, 2004.

FOBER, Dominique, LETZ, Stéphane, ORLAREY, Yann, « Lambda-calcul et composition musicale », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999.

GENEVOIS, Hugues, « Geste et pensée musicale : de l'outil à l'instrument », dans *Les nouveaux gestes de la musique*, Marseille, Editions Parenthèses, 1999.

GREENHOUGH, Mike, TAYLOR, Ian, « Modelling pitch perception with adaptive resonance theory artificial neural networks », dans *Musical networks*, Cambridge, Editions MIT Press, 1999.

MANDOLINI, Ricardo, « L'idéologie numérique, vers une uniformité d'expression ? », dans *Musiques, arts et technologies, Pour une approche critique*, Paris, Editions L'Harmattan, 2004.

MANOURY, Philippe, « Le stade pictographique de la musique électronique doit être dépassé », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999.

MEIER, Robin, VOISIN, Frédéric, « On Analytical vs. Schizophrenic Procedures for Computing Music », *Contemporary Music Review*, Londres, Editions Routledge, n°28, Avril 2009, p 205 – 219, PDF donné par l'auteur.

MIERMONT, Jacques, « Impertinents propos : Heinz von Foerster et les cliniciens », dans *Seconde cybernétique et complexité, Rencontres avec Heinz Von Foerster*, Paris, Editions l'Harmattan, 2006.

NATTIEZ, Jean-Jacques, « Préface », dans *L'analyse des musiques électroacoustiques : Modèles et propositions*, Paris, Editions l'Harmattan, 2003.

PAGE, P. A. Michael, « Modelling the perception of musical sequences with self-organizing neural networks », dans *Musical networks*, Cambridge, Editions MIT Press, 1999.

RISSET, Jean-Claude, « Evolution des outils de création sonore », dans *Interfaces homme-machine et création musicale*, Paris, Editions Hermès Science Publications, 1999.

RISSET, Jean-Claude, « Quelques remarques sur les musiques pour ordinateur et l'interprétation », dans *Musique en jeu*, n°3, 1971.

Webographie

Articles

GHERBAN, Alexandre, « Entretien avec Michel Bret », <http://www.automatesintelligents.com/art/2002/nov/bret.html>, Novembre 2002, site administré par les rédacteurs en chef Jean-Paul Baquiast, membre du bureau de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA), et Christophe Jacquemin, docteur en géophysique, enseignant à l'Université de Paris VII, consacré à la transmission et à la vulgarisation des travaux concernant les automates intelligents, mis à jour le 03/12/2007, consulté le 25/03/2010.

Sites consultés

<http://brahms.ircam.fr/>, base de documentation de l'Ircam sur la musique contemporaine, consultée le 26/05/2010.

<http://robin.meier.free.fr>, site administré par Robin Meier, consacré à ses recherches et réalisations dans l'informatique musicale, mis à jour le 18/03/2010, consulté le 18/03/2010.

<http://www.fredvoisin.com>, site administré par Frédéric Voisin, consacré à ses recherches et réalisations dans l'informatique musicale, mis à jour le 25/03/2010, consulté le 25/03/2010.

Enregistrements sonores consultables en ligne

MEIER, Robin, http://robin.meier.free.fr/site/?page_id=23, Enregistrements sonores de la pièce *For Alan Turing* créée en juin 2004 à Nice.

MEIER, Robin, VOISIN, Frédéric, http://robin.meier.free.fr/site/?page_id=37, Enregistrement d'une session live de l'installation *Last manoeuvres in the dark* au Palais de Tokyo le 05/08/2008 à 12h57.

MEIER, Robin, VOISIN, Frédéric, http://robin.meier.free.fr/site/?page_id=16, Enregistrements de l'activité sonore de trois groupes d'agents neuromimétiques lors des répétitions de *Caresses de marquises*: « quatuor2270904 », « ambiance+oiseaux », « criquets et oiseau ».

Table des figures

Figure 1. Schéma d'un neurone biologique	157
Figure 2. Modèle mathématique du neurone formel	158
Figure 3. Schéma des différentes fonctions d'activation	159
Figure 4. Modèle du Perceptron monocouche	160
Figure 5. Représentation des fonctions logiques ET et XOR.....	161
Figure 6. Architecture d'un Perceptron à deux couches.....	162
Figure 7. Représentation matricielle d'un réseau de Kohonen	165
Figure 8. Représentation de différents voisinages du neurone gagnant.....	165
Figure 9. Représentation de l'état d'activation des neurones du SOM pour un vecteur donné	168
Figure 10. Quais de la gare de l'Est à Paris, site de l'installation <i>Caresse de marquises</i>	171
Figure 11. Schéma du dispositif de <i>Caresse de marquises</i>	172
Figure 12. Structure d'un agent neuromimétique.....	173
Figure 13. Installation de <i>Last manœuvres in the dark</i>	177
Figure 14. Schéma fonctionnel de l'installation <i>Last manœuvres in the dark</i>	178

Index

Index nominum

Les pages renvoyant aux noms situés en note de bas de page sont suivies d'un « n ».

ABDI, Hervé : 33n

ABRAHAMSEN, Adèle : 10n

AMAT, Jean-Louis : 9n, 35n, 38n, 40n

ASHBY, R. William : 27

ASSAYAG, Gérard : 25n

BALPE, Jean Pierre : 102, 113n, 117, 119, 120n

BARBOT, Marie-José : 112n

BARRON, Bébé : 99

BARRON, Céline : 114n, 118, 119n, 123n

BARRON, Louis : 99

BAYLE, François : 85n

BEAUDOUIN-LAFON, Michel : 25, 26n

BECHTEL, William : 10n

BHARUCHA, J. Jamshed : 50

BLAYO, François : 33n, 40n

BOISSIER, Jean-Louis : 101n, 105n, 115, 117, 118, 119, 120n

BOSSIS, Bruno : 21, 22n, 23, 24n, 67, 80n

BRET, Michel : 45, 111

BROWN, Earl : 99

CADOZ, Claude : 21

CAGE, John : 99

CAMATARRI, Giovanni : 112n

CHOMSKY, Noam : 10

CLERGUE, Gérard : 11n, 12n

COEYTAUX-RICHARD, Laurence : 54, 66, 107, 113

CORIN, Florence : 45n

COUCHOT, Edmond : 28
DELIEGE, Célestin : 99n
DOLSON, Mark : 48
FOBER, Dominique : 25, 26n
FOERSTER, V. Heinz : 27, 28
GENEVOIS, Hugues : 82n
GHERBAN, Alexandre : 64n, 105n, 106n
GIRAUD, Fabien : 54n
GOURFINK, Myriam : 55
GREENHOUGH, Mike : 51
HERVE, Jean-Luc : 53
HILLAIRE, Norbert : 28n
HOFF, Ted : 41
HUBEL, David : 10
JODOUIN, Jean-François : 32n, 33n, 38n, 46n
KISS, Jocelyne : 10n, 48, 49, 69, 72, 73n, 75n, 76
KOHONEN, Teuvo : 32, 42
KUYPERS, Patricia : 45n
LETZ, Stéphane : 25, 26n
LORIGNY, Jacques : 109, 110n
MACCLELLAND, L. James : 10, 33
MANDOLINI, Ricardo : 64n, 70
MANOURY, Philippe : 23n, 92n
MARTHOURET, Laurence : 55, 65, 66, 80, 81
MATURANA, Humberto : 28
MCCULLOCH, Warren : 31, 41
MEIER, Robin : 53, 54, 55, 59n, 60, 61, 66, 69, 71, 72, 76n, 80n, 89, 90, 115, 122
MIERMONT, Jacques : 27n
MILLER, George : 10

MINSKY, Marvin : 10
MOLINO, Jean : 13, 18
NADAL, Jean-Pierre : 37n
NATTIEZ, Jean-Jacques : 17, 18
OLNEY, Katherine : 50
ORLAREY, Yann : 24
PAGE, Michael : 51
PASQUET, Olivier : 90
PITTS, Walter : 31, 41
POINCARÉ, Henri : 110
PUCKETTE, Miller : 67n
REY, Alain : 27n, 109n
REY-DEBOVE, Josette : 27n, 109n
RISSET, Jean-Claude : 78n, 80n, 85n, 86
ROBERT, Paul : 27n, 109n
ROGERS, Joey : 69, 72
ROSENBLATT, Frank : 41
ROY, Stéphane : 17, 19
RUMELHART, E. David : 10, 33
RUWET, Nicolas : 19
SHANNON, Claude : 10
SIBONI, Raphaël : 54n
STOCKHAUSEN, Karlheinz : 49, 76, 99
TAYLOR, Ian : 51
TOEPLITZ, Kasper : 55
TRAMUS, Marie-Hélène : 45, 111
TUDOR, David : 99
VARELA, Francisco : 27, 28, 100n, 105n, 124n
VERLEYSEN, Michel : 33n, 40n

VOISIN, Frédéric : 53, 54, 55, 60, 65, 66, 72, 73, 79, 81, 89, 90, 110, 115, 116, 122, 123

WIDROW, Bernard : 41

YAHIAOUI, Gérard : 9n, 35n, 38n, 40n

Index operum

Amplification / Synaptique, Annecy, Herve, Jean-Luc, Voisin, Frédéric : 53, 67, 69, 70

Caresses de marquises, Meier, Robin, Voisin, Frédéric : 54, 60, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 77, 79, 80, 81, 91, 95, 102, 103, 107, 110, 115

Ecarlate (L'), Gourfink, Myriam, Toeplitz, Kasper, Voisin, Frédéric : 55, 65, 67, 69, 70, 72, 77, 80

For Alan Turing, Meier, Robin : 55, 60, 67, 69, 70, 90, 122

Funambule (Le), Issy-les-Moulineaux, Bret, Michel, Tramus, Marie-Hélène : 45, 111, 116

Klavierstück I-IV, Stockhausen, Karlheinz : 49, 76

Klavierstück XI, Stockhausen, Karlheinz : 99

Last manœuvres in the dark, Giraud, Fabien, Siboni, Raphaël : 54, 61, 65, 67, 70, 72, 76, 90, 94, 100, 103, 106, 112, 121, 122, 123

Préludes aux préludes, Audincourt, Coeytaux-Richard, Laurence, Voisin, Frédéric : 54, 66, 70, 76, 104, 106, 107, 110, 112, 113, 116

Symphonie des machines, Meier, Robin, Voisin, Frédéric : 53, 66, 69, 70, 72, 77, 79, 80, 81, 95, 102, 103, 107, 110, 115, 122

William Mix, Cage, John, Brown, Earl, Barron, Bébé, Barron, Louis : 99

Winter Music, Cage, John : 99

Annexes

Annexe 1. Modèle biologique et principes mathématiques à la base des RNA

1. Le neurone biologique



Figure 1. Schéma d'un neurone biologique

Comme toute cellule animale, le neurone biologique est constitué d'un *noyau*, d'un *cytoplasme* ou *soma* et d'une *membrane cellulaire*. Les neurones échangent des signaux entre eux par le biais de prolongements de la membrane : *les dendrites*. Le prolongement principal prenant en charge la conduction du message nerveux est *l'axone*. La communication entre neurones via les membranes ou les axones s'effectue par une zone de jonction appelée *synapse*. Le message nerveux est de manière générale un message électrique, mais il est parfois converti en signal chimique, comme on peut l'observer dans les synapses par exemple. Notre système nerveux transcrit les informations extérieures en messages électriques codés en amplitude et en fréquence : *Le potentiels de récepteur*. L'influx nerveux se propage ensuite sur la membrane : c'est le *potentiel de membrane*. Lorsque le message atteint un axone, il peut, s'il s'avère supérieur à un certain seuil de déclenchement, engendrer un *train de potentiels d'action*, qui sera lui codé en fréquence et en durée. Il est enfin transcrit en message chimique lorsque il atteint une *synapse* : c'est le *potentiel synaptique*. Dans la synapse, le message est codé en quantité de neurotransmetteurs capables de provoquer soit une excitation du neurone, soit une inhibition, respectivement par dépolarisation ou hyperpolarisation. L'ensemble des informations accumulées sur la membrane d'un neurone génère un

potentiel de membrane codé en amplitude qui engendrera, si cette amplitude est suffisante, un train de potentiels d'action.

2. Le neurone formel

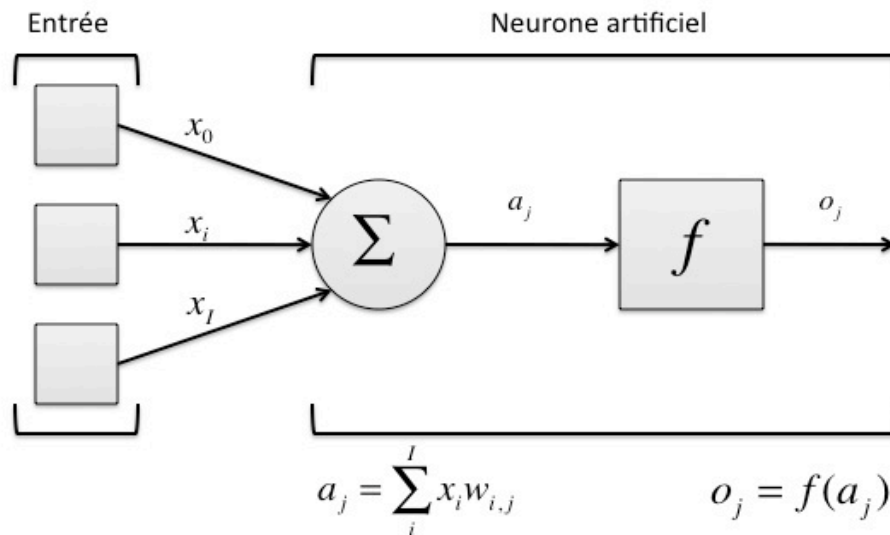


Figure 2. Modèle mathématique du neurone formel

Avec :

a_j activation du $j^{\text{ème}}$ neurone de sortie.

x_i valeur de sortie (0 ou 1) du $i^{\text{ème}}$ neurone de la rétine.

$w_{i,j}$ l'intensité de la connexion entre le $i^{\text{ème}}$ neurone de la rétine et le $j^{\text{ème}}$ neurone de sortie.

θ_j le seuil d'activation du neurone j .

x_0 toujours actif et $w_{0,j} = -\theta_j$.

3. Fonctions d'activation

➤ Fonction à seuil

$$a = 0 \text{ si } n < 0$$

$$a = 1 \text{ si } n \geq 0$$

- Fonction linéaire

$$a = n$$

- Fonction linéaire saturée

$$a = 0 \text{ si } n < 0$$

$$a = n \text{ si } 0 \leq n \leq 1$$

$$a = 1 \text{ si } n > 1$$

- Fonction sigmoïde

$$a = \frac{1}{1 + \exp^{-n}}$$

- Fonction tangente hyperbolique

$$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$$

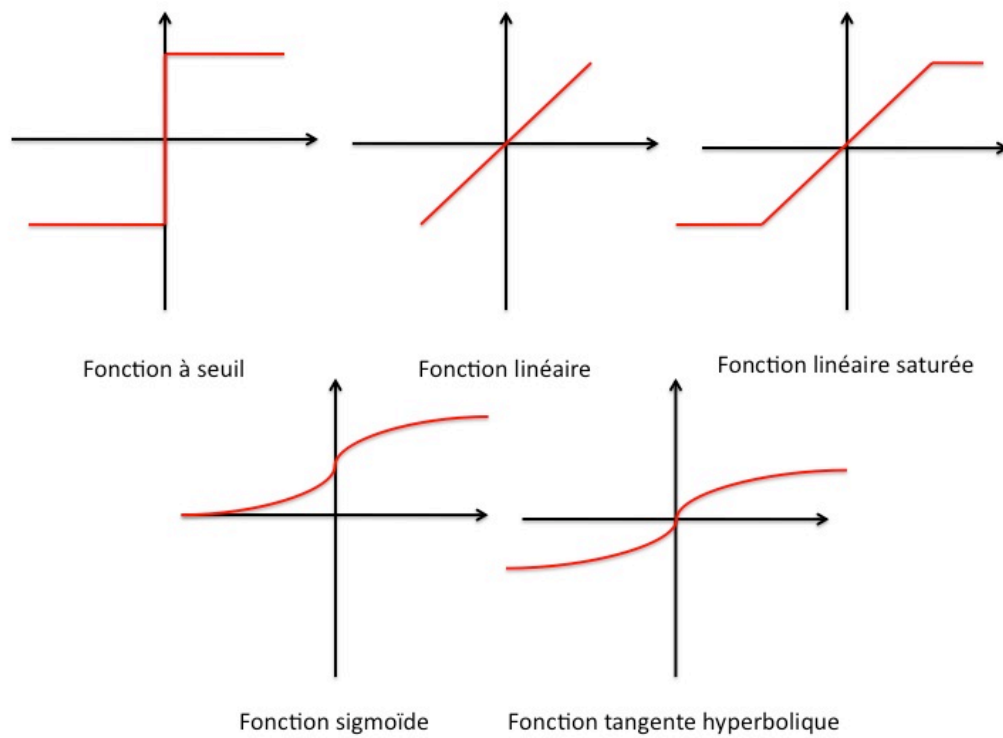


Figure 3. Schéma des différentes fonctions d'activation

4. Le Perceptron

4.1. Architecture

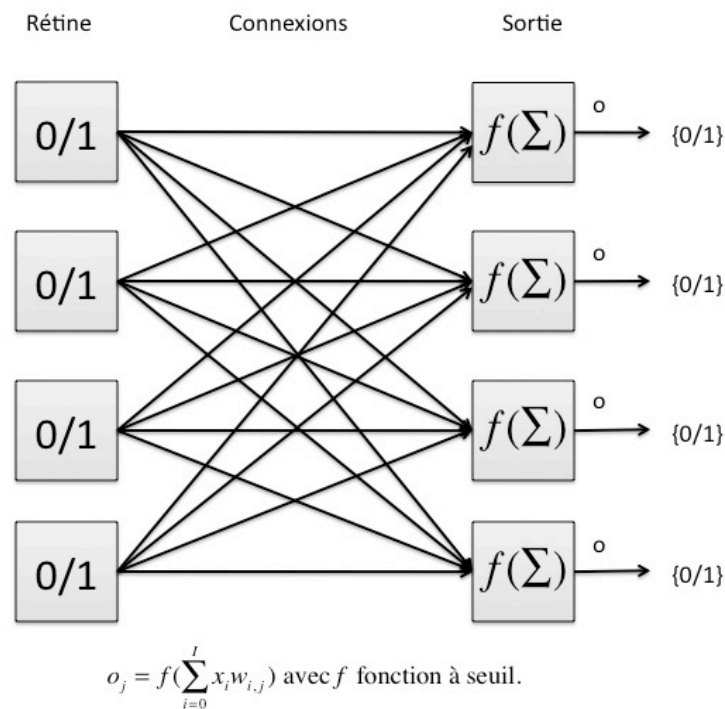


Figure 4. Modèle du Perceptron monocouche

4.2. Règle d'apprentissage

L'apprentissage du Perceptron à une couche repose sur la règle dite de Widrow-Hoff²⁰⁸. Cette méthode est supervisée et consiste à corriger les poids synaptiques des neurones de la couche de sortie à chaque fois qu'ils se trompent. Lorsqu'un neurone est actif alors qu'il ne devrait pas l'être, il diminue la valeur des poids synaptiques correspondant aux neurones actifs de la rétine. Réciproquement, lorsque un neurone est inactif alors qu'il ne devrait pas l'être, il augmente la valeur des poids synaptiques correspondant aux neurones actifs de la rétine.

L'expression mathématique de la règle de Widrow-Hoff est la suivante :

$$w_{i,j}^{t+1} = w_{i,j}^t + \eta(t_j - o_j)x_i = w_{i,j}^t + \Delta w_{i,j}$$

Avec :

²⁰⁸ Hervé Abdi, *Les réseaux de neurones, op. cit.*, p. 49.

$\Delta w_{i,j}$ la correction à effectuer sur $w_{i,j}$.

$w_{i,j}^t$ l'intensité de la connexion entre le $i^{\text{ème}}$ neurone de la rétine et le $j^{\text{ème}}$ neurone de sortie au temps t .

η une constante positive comprise entre 0 et 1.

t_j la valeur cible pour le $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche de sortie.

4.3. Séparateur linéaire

Le perceptron monocouche est un séparateur linéaire, c'est à dire qu'il sépare l'espace des entrées en deux plans. Ainsi, il ne peut apprendre un problème que si l'espace des vecteurs d'entrée est linéairement séparable. Il peut par exemple apprendre la fonction logique ET qui peut consister par exemple à associer deux neurones d'entrée à un neurone de sortie de la manière suivante :

$00 \rightarrow 0$; $10 \rightarrow 0$; $01 \rightarrow 0$; $11 \rightarrow 1$

Par contre, il ne peut apprendre la fonction du « ou exclusif » (également appelée fonction *XOR*) qui peut consister par exemple à associer deux neurones d'entrée à un neurone de sortie de la manière suivante :

$00 \rightarrow 1$; $10 \rightarrow 0$; $01 \rightarrow 0$; $11 \rightarrow 1$

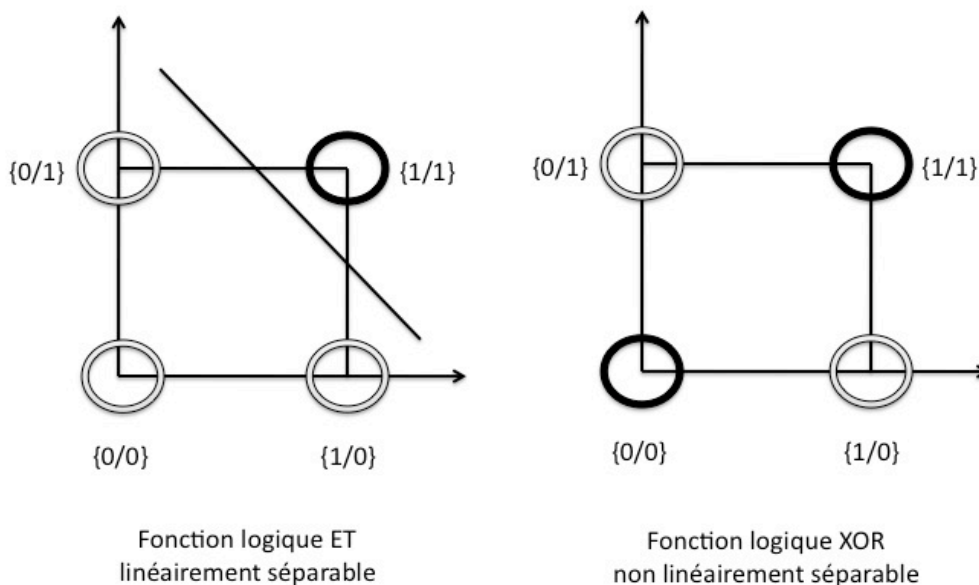


Figure 5. Représentation des fonctions logiques ET et XOR

5. Le Perceptron multicouche

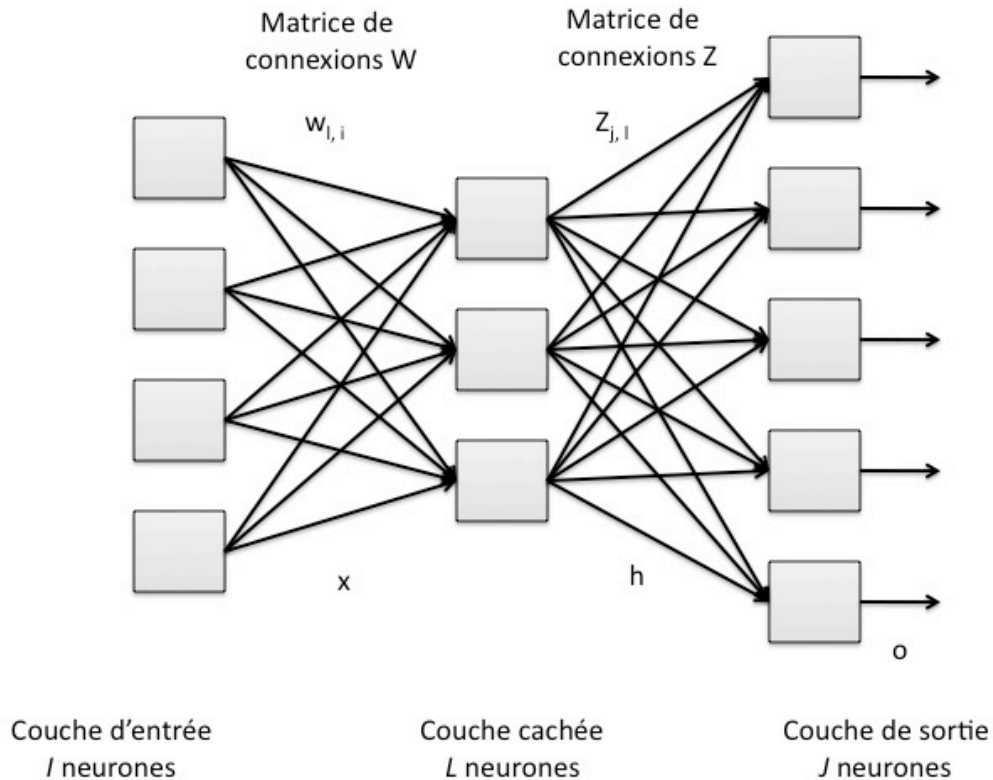


Figure 6. Architecture d'un Perceptron à deux couches

Avec :

x_k le $k^{\text{ième}}$ vecteur d'entrée de dimension I .

h_k le vecteur des activations de la couche h pour le vecteur d'entrée k .

o_k le vecteur des activations de la couche o pour le vecteur d'entrée k .

W la matrice $L \times I$ des poids synaptiques entre les couches I et L .

$w_{l,i}$ le poids synaptique entre le $i^{\text{ème}}$ neurone d'entrée et le $l^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée.

Z la matrice $J \times L$ des poids synaptiques entre les couches L et J .

$z_{j,l}$ le poids synaptique entre le $l^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée et le $l^{\text{ème}}$ neurone de sortie.

X la matrice $I * K$ des stimuli à apprendre.

T la matrice $J \times K$ des vecteurs de sortie désirés.

$h_k = f(Wx_k)$.

$o_k = f(Zh_k)$.

Le processus d'apprentissage du PMC par rétro-propagation du gradient de l'erreur se déroule en différentes étapes²⁰⁹ :

- Le calcul de l'erreur en sortie du réseau :

$$e_k = (t_k - o_k).$$

Avec :

e_k le vecteur des erreurs sur la couche de sortie pour le vecteur d'entrée K .

t_k le vecteur de sortie désiré.

- Le calcul du signal d'erreur pour la couche de sortie, qui prend en compte l'erreur des neurones et leur état d'activation :

$$\delta_{\text{sortie},k} = f'(Zh_k) * (e_k) = o_k * (1 - o_k) * (t_k - o_k).$$

Avec :

$\delta_{\text{sortie},k}$ le signal d'erreur de la couche de sortie pour la vecteur d'entrée K .

* le produit terme à terme des vecteurs ou produit de Hadamar.

f fonction sigmoïde.

1 un vecteur unité.

- La correction de la matrice des connexions Z :

$$Z_{[t+1]} = Z_{[t]} + \eta \delta_{\text{sortie},k} h_k^T = Z_{[t]} + \Delta_t Z.$$

Avec :

$\Delta_t Z$ la correction à effectuer sur Z au temps t .

η un nombre réel positif.

- Le calcul du signal d'erreur pour la couche cachée, estimé à partir du signal d'erreur de la couche de sortie et de l'état d'activation des neurones de la couche cachée :

$$\delta_{\text{cachée},k} = f'(Wx_k) * (Z_{[t]}^T \delta_{\text{sortie},k}) = h_k * (1 - h_k) * (Z_{[t]}^T \delta_{\text{sortie},k}).$$

Avec :

$\delta_{\text{cachée},k}$ le signal d'erreur de la couche cachée pour la vecteur d'entrée K .

- La correction de la matrice des connexions W :

²⁰⁹ *Ibid.*, p. 141-142.

$$W_{[t+1]} = W_{[t]} + \eta \delta_{cachée,k} x_k^T = W_{[t]} + \Delta_t W.$$

Avec :

$\Delta_t W$ la correction à effectuer sur W au temps t .

6. Le réseau de Kohonen.

L'algorithme d'apprentissage du réseau de Kohonen est le suivant :

$$\Delta w_i^t = \begin{cases} \eta(t) [x_k^t - w_i^t] & \text{si } i \in \Lambda_g(t) \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

Avec :

w_i^t le vecteur des poids synaptiques du neurone i au temps t .

x_k^t le $k^{ième}$ vecteur d'entrée au temps t .

$w_{i,R}$ le poids synaptique entre la $R^{ième}$ valeur du vecteur d'entrée et le $i^{ième}$ neurone du réseau.

Δw_i^t la modification des poids du neurone i au temps t .

$\Lambda_g(t)$ le voisinage au temps t du neurone gagnant g .

$\Lambda_i = k$ le voisinage du neurone i contenant au plus k arêtes.

η le taux d'apprentissage compris entre 0 et 1.

I le nombre de neurones dans la carte topologique.

R les dimensions du vecteur d'entrée.

Le neurone gagnant est déterminé par un calcul de distance entre le vecteur d'entrée et le vecteur des poids synaptiques du neurone. Le neurone présentant la plus petite distance est élu :

$$g(p) = \arg \min_i \|x_k - w_i\| \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

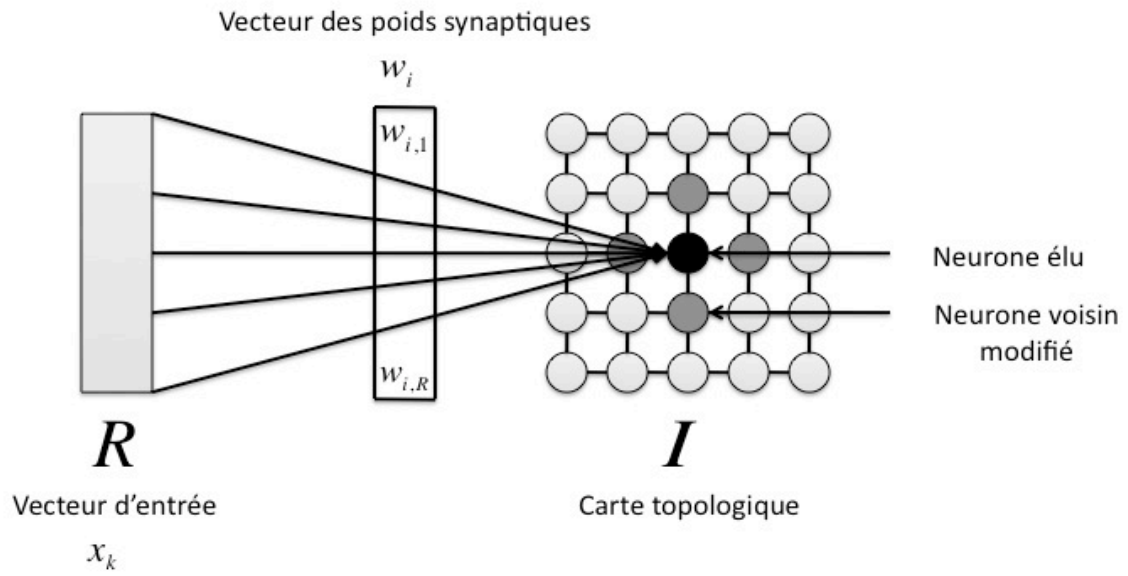


Figure 7. Représentation matricielle d'un réseau de Kohonen

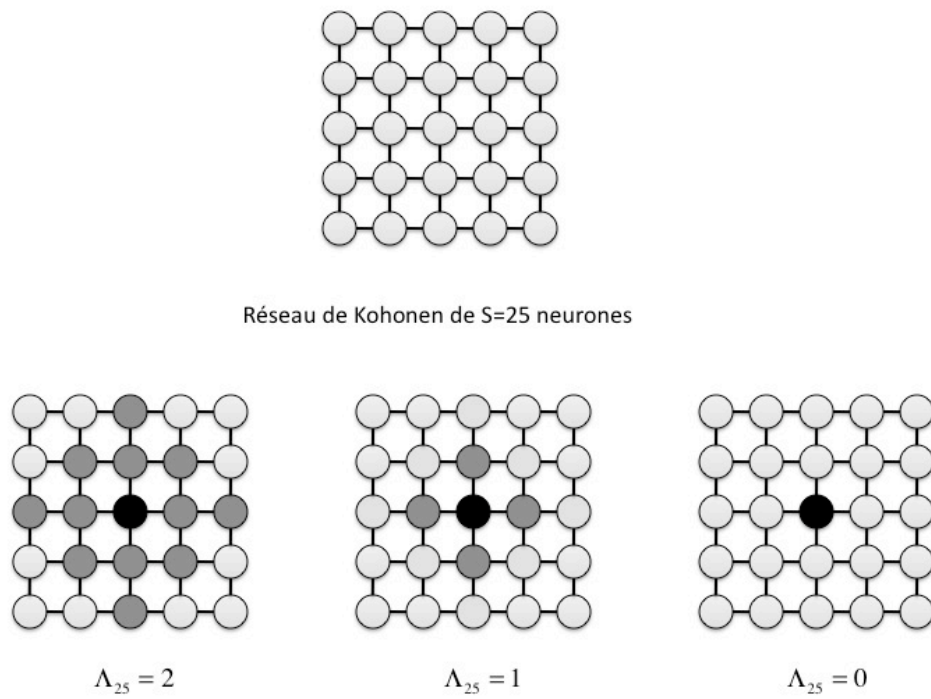


Figure 8. Représentation de différents voisinages du neurone gagnant

Annexe 2. Robin Meier, *For Alan Turing*, Nice, Festival Manca, 2004

1. Description

Cette installation met en jeu deux agents neuromimétiques au sein d'une situation d'interactivité. Le premier agent contrôle l'activité d'un piano virtuel, entendue sur un haut-parleur à gauche de la scène, le second développe des dynamiques d'apprentissage en fonction de l'activité du premier et génère ainsi de la synthèse sonore, diffusée sur un haut-parleur à droite de la scène.

2. Principe de l'installation

Robin Meier a préalablement composé quatre thèmes encodés grâce à un clavier midi au sein d'une matrice. Les colonnes représentent la succession des notes, les lignes encodent trois paramètres : la hauteur et la vitesse de chaque note, ainsi que la durée séparant une note de la suivante.

Ces données sont traitées par le premier agent neuromimétique : le neurone transformateur.

2.1. Le neurone transformateur

Ce premier agent fonctionne à la manière d'un SOM qui ne serait constitué que d'un seul neurone. Chaque colonne de la matrice qui encode le thème constitue un vecteur d'entrée pour le neurone, qui calcule la distance entre ce vecteur et le vecteur de ses poids synaptiques. En fonction de son taux d'apprentissage, le neurone rapproche ou éloigne le vecteur de ses poids synaptiques du vecteur d'entrée.

Ainsi, le traitement qu'effectue le neurone modifie les thèmes de manière plus ou moins importante. Au cours de la création de la pièce, Robin Meier modifie en temps réel les paramètres de ce premier agent, en jouant sur les coefficients synaptiques et le taux d'apprentissage, afin de proposer des situations musicales inédites sur la base du thème encodé. C'est pourquoi il parle de neurone transformateur pour définir ce premier agent neuromimétique.

2.2. Le SOM

Le second agent neuromimétique est donc un SOM de 25 neurones. On présente à ce réseau un vecteur d'entrée constitué par la sortie du neurone transformateur. Cet agent

neuromimétique essaie donc d'imiter l'activité du premier. Sa réponse dépend de son taux d'apprentissage, donc de ses coefficients synaptiques ainsi que du voisinage pris en compte pour un neurone. Au cours de la réalisation de l'œuvre, Robin Meier modifie ces trois paramètres en temps réel afin de créer certaines dynamiques d'apprentissage et de mémorisation chez le réseau.



Figure 9. Représentation de l'état d'activation des neurones du SOM pour un vecteur donné

Robin Meier a cherché à analyser les conséquences de la modification de ces paramètres sur la dynamique d'apprentissage du réseau, et nous livre ses résultats dans son mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de l'EHESS²¹⁰.

3. Paramètres du réseau et dynamiques d'apprentissage

Il détermine différentes situations analytiques en fonction du paramètre sur lequel il intervient :

- Taux d'apprentissage élevé

Il constate dans cette situation que le second agent est capable, dans un temps très court et de manière quasi parfaite, d'imiter la production sonore du premier agent. Cependant, malgré la réactivité du système, le SOM n'a pas le temps de s'organiser afin de refléter par sa configuration synaptique l'espace des vecteurs d'entrée. Les neurones gagnants sont presque toujours les mêmes, et par conséquent la mémoire ne se distribue pas suffisamment. Le réseau développe donc une mémoire à court terme.

²¹⁰ Robin Meier, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, op. cit., p. 92.

- Taux d'apprentissage faible

Un taux d'apprentissage faible induit une certaine inertie dans les changements de la configuration synaptique du réseau. Ainsi le second agent ne peut imiter parfaitement l'activité musicale du premier. Robin Meier constate que le SOM se contente de suivre les courbes mélodiques du neurone transformateur en utilisant des hauteurs mémorisées antérieurement. Les seules situations d'imitation parfaite ont lieu lorsque la production musicale du neurone transformateur est stable, permettant ainsi à la carte auto-organisatrice de se stabiliser.

- Taux d'apprentissage nul

La configuration synaptique du réseau se fige dans une telle situation. Le nombre de réponses de la carte auto-organisatrice se limite au nombre de neurones. Son comportement est entièrement déterminé par l'apprentissage effectué auparavant. Si la mémoire qu'a développé le réseau n'est pas suffisamment distribuée, ce dernier peut fournir la même réponse à deux stimulations différentes, produisant ainsi des répétitions de notes. Robin Meier identifie ce phénomène autour de 4 minutes 10 dans l'enregistrement de la pièce.

- Modification aléatoire des coefficients synaptiques

Cette intervention trouble la mémoire du SOM. La mémoire du réseau est en effet distribuée sur l'ensemble de ses poids synaptiques. Un changement aléatoire des poids modifie la représentation que le réseau se fait des vecteurs d'entrée. Si cette situation amène le réseau à oublier son apprentissage, elle peut aussi l'amener à produire un matériau plus riche. Ainsi il est possible de renouveler la production musicale du SOM lorsque ses imitations deviennent « trop » parfaites.

Annexe 3. Frédéric Voisin, Robin Meier, *Caresses de marquises*, Paris, Festival Nuit Blanche, 2004

1. Description

Caresses de marquises est une installation musicale pour réseaux de neurones réalisée gare de l'Est à Paris. Sur l'espace des quais de la gare, vingt haut-parleurs et vingt projecteurs de lumière sont installés pour l'occasion.



Figure 10. Quais de la gare de l'Est à Paris, site de l'installation *Caresses de marquises*

Au cours de cette performance, une population d'agents neuromimétiques est amenée à interagir avec des rythmes lumineux projetés sur les marquises de la gare. Frédéric Voisin et Robin Meier contrôlent la projection des rythmes lumineux, les paramètres des agents ainsi que le type de synthèse sonore produite par les agents.

2. Matériel

L'installation utilise huit ordinateurs (Macintosh power G4). Quatre sont dédiés au contrôle des agents, deux à la synthèse sonore et à la projection de rythmes lumineux et deux au contrôle des paramètres de la pièce. La diffusion sonore est assurée par vingt haut-parleurs et la projection de rythmes lumineux par vingt projecteurs. Les agents

neuromimétiques sont développés dans Jitter, l'environnement graphique de MaxMSP, grâce à l'objet jit.robosom²¹¹ développé par Robin Meier.

3. Principe de l'installation

Le principe de l'installation consiste à faire émerger de la population d'agents neuromimétiques des dynamiques comportementales, traduites sous forme de synthèse sonore. Pour ce faire, les agents réagissent à la fois aux rythmes lumineux projetés sur les marquises de la gare, mais également au comportement des autres agents.

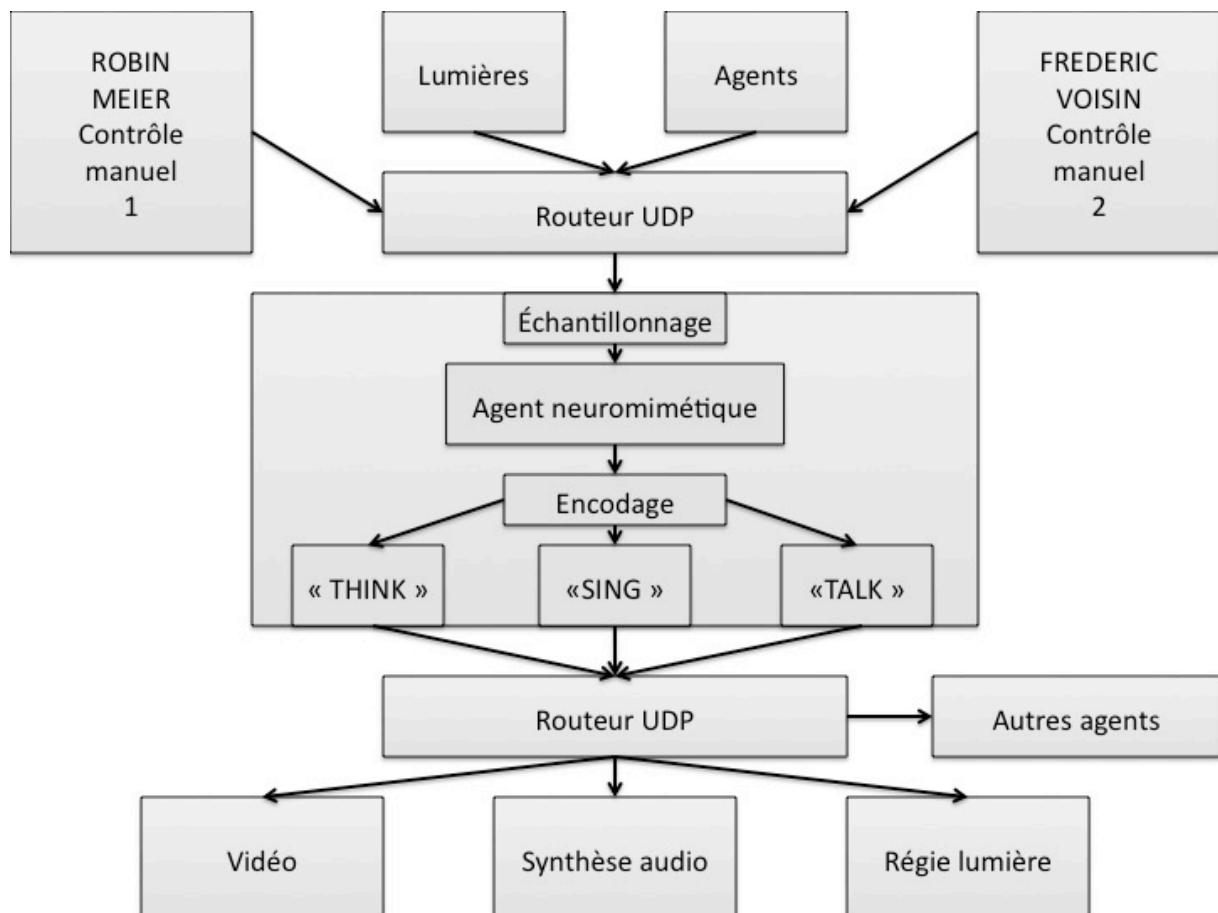


Figure 11. Schéma du dispositif de *Caresses de marquises*

Les informations provenant de l'environnement (lumières et activité des autres agents) ainsi que les modifications effectuées par Frédéric Voisin et Robin Meier sont transmises aux agents neuromimétiques via un routeur informatique grâce à un protocole UDP²¹².

²¹¹ Carte auto-organisatrice à géométrie variable développée sous Jitter par Robin Meier sous forme d'abstraction MaxMSP.

²¹² *User Datagram Protocol* (Protocole de Datagramme Utilisateur) : protocole de télécommunication par internet.

Les données provenant des agents neuromimétiques sont regroupées en trois modules : le module « *THINK* », qui collecte l'état d'activation des deux cartes afin qu'il soit projeté sur un écran, le module « *SING* », qui renvoie les poids synaptiques du neurone élu du premier SOM afin de contrôler la synthèse sonore, et le module « *TALK* », qui collecte les mêmes données que « *SING* », formatées différemment, pour les envoyer aux autres agents. Le contrôle des lumières passe également par le routeur UDP.

3.1. Structure et fonctionnement des agents neuromimétiques

Les agents sont constitués de deux SOM communiquant l'un avec l'autre par un système de rétroaction.

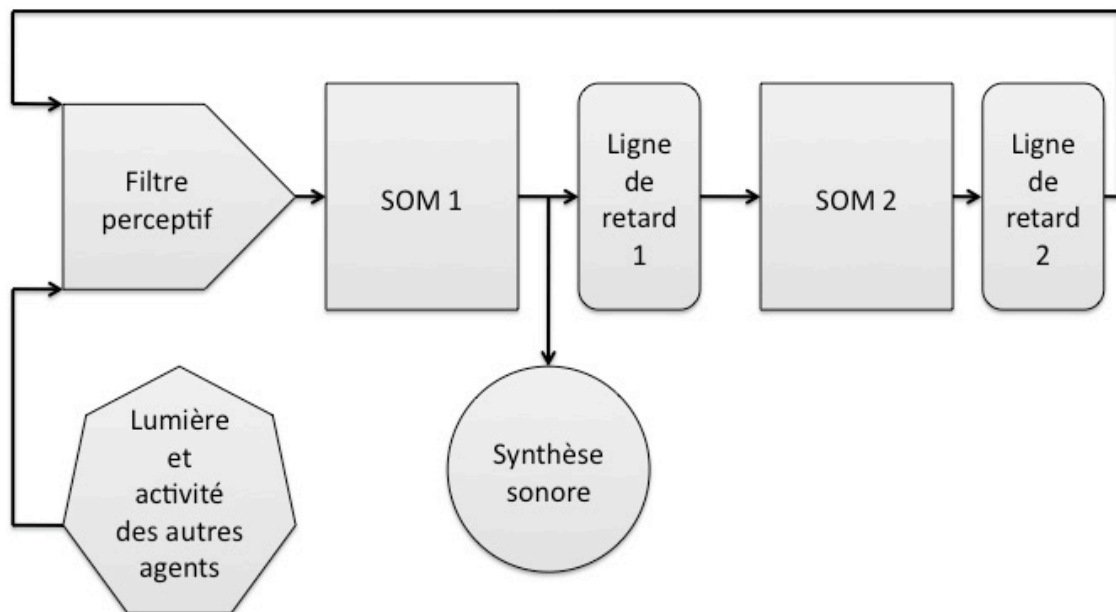


Figure 12. Structure d'un agent neuromimétique

La sortie du premier SOM est envoyée, via une ligne de retard permettant de retenir le vecteur de sortie pendant un certain temps, à un second SOM. La sortie de ce second réseau est renvoyée, via une seconde ligne de retard, à un filtre perceptif connecté au premier réseau. Ce filtre perceptif permet de moduler le rapport entre les stimuli externes, c'est à dire les rythmes lumineux et l'activité des autres agents, et la boucle de rétroaction. Les vecteurs transmis aux agents neuromimétiques sont composés de vingt valeurs. Ces dimensions correspondent au nombre de projecteurs installés sur les marquises de la gare ainsi qu'au nombre de haut-parleurs.

3.2. Synthèse sonore

Cette performance utilise différents types de synthèse sonore : synthèse additive, synthèse par modulation de fréquences, procédés de re-synthèse vocale et lecture d'échantillons préparés. Ces procédés sont regroupés au sein de différents instruments numériques. Les vecteurs de sortie produits par le premier SOM fournissent les données numériques permettant de contrôler certains paramètres de la synthèse.

3.3. Contrôle des paramètres de l'installation

Afin de créer certaines dynamiques d'apprentissage chez les agents neuromimétique, Frédéric Voisin et Robin Meier modifient en temps réel certains paramètres de l'installation.

Dans un premier temps, ils contrôlent les rythmes lumineux projetés sur les marquises de la gare. Chaque projecteur est contrôlé par un oscillateur et clignote une fois par cycle. Les deux auteurs peuvent ainsi modifier la fréquence, la phase et l'intensité de chaque oscillateur.

Dans un second temps, ils contrôlent également les paramètres internes des agents : Le taux d'apprentissage, la température et le rayon d'influence autour du neurone élu. Comme nous l'avons vu dans la performance *For Alan Turing*, la modification de ces paramètres entraîne certains changements sur la dynamique d'apprentissage des agents (voir annexe 2). Ils peuvent aussi modifier les paramètres du filtre perceptif afin de moduler la part de rétroaction prise en compte dans l'entrée de la première carte auto-organisatrice.

Enfin, ils ont la possibilité de modifier les paramètres de l'horloge interne des agents qui définit la vitesse de traitement d'une stimulation. Ainsi, la première carte auto-organisatrice du réseau peut répondre aussi vite que le permet le système informatique, ou au terme d'une période spécifiée par les deux auteurs.

4. Paramètres de contrôle et comportement des agents

Dans son mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de l'EHESS²¹³, Robin Meier nous explique comment la modification de certains paramètres affecte le comportement

²¹³ Robin Meier, *Modèles de la cognition et leurs expérimentations artistiques*, op. cit., p. 105.

des agents. Lorsque la rétroaction est à 0%, l'activité du second SOM n'est plus prise en compte par la première. La situation est donc similaire à celle rencontrée dans *For Alan Turing* (voir annexe 2). En revanche, lorsque la rétroaction est active, de nouvelles dynamiques comportementales peuvent apparaître.

4.1. Paramètres du filtre perceptif

Avec une rétroaction de 50%, les vecteurs provenant de l'extérieur ont la même probabilité d'être traités que les vecteurs provenant de la boucle de rétroaction. Lorsque la rétroaction est à 100%, aucun vecteur provenant de l'environnement extérieur ne parvient au premier réseau. Seul les vecteurs provenant de la sortie du deuxième réseau par la boucle de rétroaction sont traités. Il est ainsi possible d'isoler complètement un agent de son environnement extérieur afin de lui faire produire un matériau musical qui se renouvelle sans cesse, de manière totalement autonome.

Dans « criquet et oiseau », le chant d'oiseau réalisé par modulation de fréquence est contrôlé par un agent neuromimétique présentant une rétroaction de 100%. A partir de 27 secondes, nous pouvons entendre une variation continue du matériau musical provoquée par la clôture de l'agent sur lui même.

Dans le cadre de cette rétroaction, les paramètres d'apprentissage des deux réseaux ont un rôle déterminant.

4.2. Taux d'apprentissage

Si la rétroaction est importante, un taux d'apprentissage élevé pour le premier SOM et un taux faible pour la seconde amène le premier réseau à imiter de façon assez proche la sortie du deuxième, alors que ce dernier, étant donné son faible taux d'apprentissage, varie sensiblement les vecteurs de sortie du premier. Le premier réseau s'adapte vite mais sa mémoire est limitée tandis que le second s'adapte lentement mais développe une mémoire plus importante des événements passés.

Dans le cadre d'une rétroaction plus faible, cet agent produit une synthèse sonore qui s'adapte rapidement à son environnement extérieur, tout en gardant en mémoire, grâce au deuxième SOM, une trace des événements passés.

Le « quatuor2270904 » nous livre une illustration sonore de cette différence de paramétrage des réseaux au sein de l'agent neuromimétique. Dans cet extrait sonore,

deux agents contrôlent deux échantillonneurs de violons dans un style *sul ponticello*. Entre 3,00 et 4,45 minutes, les rythmes lumineux accélèrent, ce qui amène les agents à produire des notes de plus en plus aiguës. On peut effectivement entendre la courbe mélodique produite par les agents tendre vers l'aiguë, mais de manière non linéaire. Une tension semble ralentir l'ascension de la courbe mélodique. Cette tension est provoquée par le second SOM qui présente un taux d'apprentissage plus faible que la première.

4.3. Température

En jouant simultanément sur le taux d'apprentissage et la température, il est possible de créer certaines dynamiques d'apprentissage. Une température élevée accompagnée d'un taux d'apprentissage faible peut générer un matériau sonore plus ou moins aléatoire. Ce matériau peut ensuite être mémorisé en abaissant la température et en augmentant le taux d'apprentissage. Le bruit sur les coefficients synaptiques provoqué par l'augmentation de la température peut ainsi être à l'origine d'un nouveau comportement musical des agents.

Si en revanche, le bruit n'intervient que sur le premier SOM, le jeu sur la température peut permettre de créer des tensions musicales. La seconde carte auto-organisatrice peut en effet diminuer l'effet du bruit sur la première si son taux d'apprentissage est faible, lui permettant ainsi de conserver en mémoire l'activité du premier réseau, si la rétroaction est suffisante.

Annexe 4. Fabien Giraud, Raphaël Siboni, Frédéric Voisin, Robin Meier, *Last manœuvres in the dark*, Paris, Palais de Tokyo, Exposition Superdome, Été 2008

1. Description

Last manœuvres in the dark est une installation pour agents neuromimétiques capable de produire une création musicale autonome à partir d'une base de données sonore. Ce dispositif repose sur une population de trois cents agents neuromimétiques implémentés sur autant des microprocesseurs, chacun dissimulé sous une réplique du casque de *Darth Vader*, le héros maléfique de *Star Wars*. Les agents sont capables d'interagir les uns avec les autres, d'apprendre à partir de la base de données, et de générer de manière autonome un nouveau matériau musical inspiré de ce corpus, constitué de tubes de musique « pop-rock » des années 1980-1990. Cet orchestre de réseaux neuromimétiques a ici pour but de produire le tube musical « le plus sombre possible » à travers des sessions pseudo aléatoires de production musicale d'environ quinze minutes.

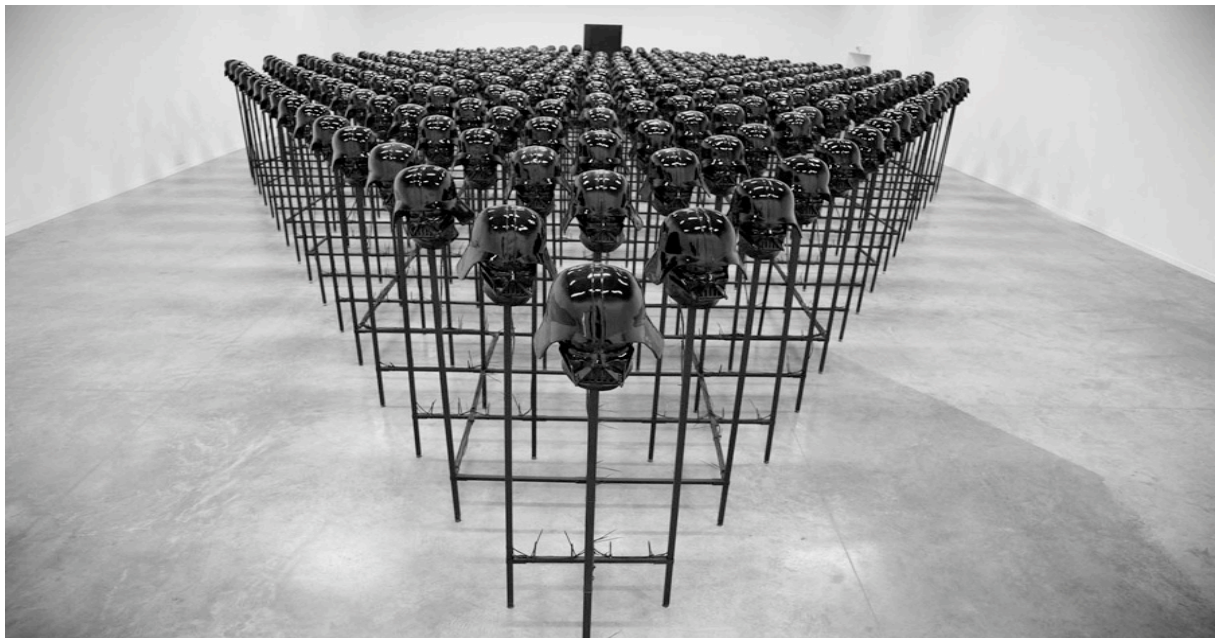


Figure 13. Installation de *Last manœuvres in the dark*

2. Fonctionnement général de l'installation

Dans un premier temps, les différents morceaux de la base de données musicale sont découpés en différentes sections, puis codés en différents vecteurs. Ces données sont ensuite apprises par un SOM. Des données issues de sessions de mixages, effectuées par des musiciens de la scène électronique populaire, sont également traitées par le SOM.

La sortie de ce premier réseau constitue un matériau stylistique qui est ensuite envoyé aux trois cents agents neuromimétiques de l'installation. Chaque agent repose sur une carte auto-organisatrice récurrente oscillatoire ou ROSOM (*Recursive Oscillatory Self-Organizing Map*), dont nous allons détailler le fonctionnement plus loin. Les paramètres des agents sont contrôlés automatiquement en fonction du matériau stylistique. Cette population d'agents est divisée en différentes sections qui vont prendre en charge des données différentes, et donc contrôler différents paramètres de la synthèse sonore.

La sortie fournie par l'ensemble des agents permet de contrôler différents synthétiseurs afin de générer le matériau sonore de l'œuvre.

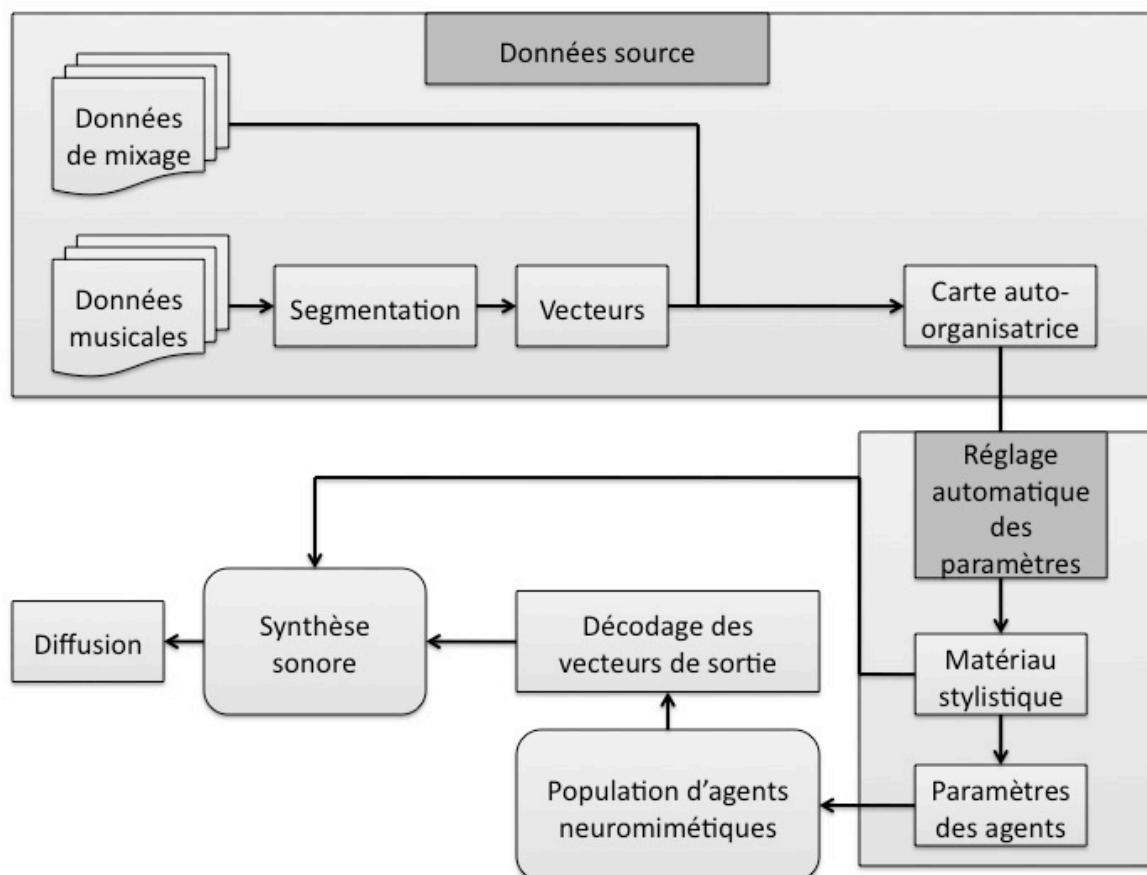


Figure 14. Schéma fonctionnel de l'installation *Last manœuvres in the dark*

3. La carte auto-organisatrice récurrente oscillatoire ou ROSOM

Ce réseau particulier, construit sur la base d'un SOM, est en quelque sorte une variation de l'architecture développée dans *Caresses de marquises*, utilisant deux SOM dans une boucle de rétroaction. En couplant un SOM avec un second réseau capable d'analyser et de mémoriser des structures temporelles au sein d'un matériau, un ROSOM peut détecter et reproduire des schémas périodiques.

Pour ce faire, on associe à chaque neurone du premier SOM un âge, qui correspond au nombre d'époques séparant les activations d'un neurone gagnant. Certains neurones gagnants ont ainsi un cycle régulier et d'autres non. Un second SOM effectue une classification temporelle de ces cycles. Après la phase d'apprentissage qui consiste à présenter une série de vecteurs d'entrée dans un ordre précis, l'âge du neurone gagnant au temps t ainsi que la classification des périodes effectuée par le second SOM permettent d'anticiper quel sera le neurone gagnant au temps $t+1$. On peut ainsi effectuer un rappel de mémoire et récupérer la séquence apprise en présentant au réseau le premier vecteur d'entrée. On peut également présenter un autre vecteur, auquel cas le résultat risque de différer de ce qui a été appris, mais sera influencé, de manière plus ou moins évidente, par la structure du corpus d'apprentissage.

Ainsi, le ROSOM peut être utilisé en temps réel ou en temps différé. La phase d'apprentissage peut en effet être appliquée en temps réel, auquel cas on utilise les vecteurs de sortie produits par le premier SOM en réaction aux vecteurs d'entrée. On peut également l'utiliser en temps différé selon le principe expliqué plus haut.

4. Encodage/Synthèse

4.1. Segmentation de la base de donnée musicale et encodage

Les différents morceaux choisis dans le répertoire « pop-rock » des années 1980-1990, sont tout d'abord encodés en MIDI et découpés en différentes lignes instrumentales. Chaque ligne instrumentale est ensuite séparée en plusieurs fichiers en fonction de la structure du morceau (solo, couplet, refrain, etc.). Afin d'assurer une cohérence rythmique, tous les morceaux choisis pour la base de données musicale présentent un rythme binaire. Chaque fichier est ensuite codé dans une série de vecteurs de 40 valeurs représentant hauteur, durée et registre pour chaque note. Les hauteurs sont codées par 12 valeurs binaires, chacune d'elle étant associée à une valeur de registre : 0 pour le

registre grave, 0,5 pour le registre medium, et 1 pour le registre aiguë. La place de la note au sein d'une mesure à 4/4 est codée par 16 valeurs binaires (une par double-croche).

Le corpus d'apprentissage que constitue cet ensemble de vecteurs (presque un millier) est ensuite appris par le SOM. Grâce à cet apprentissage, il est ensuite possible de choisir au hasard un vecteur source, et le SOM est en mesure de nous présenter les vecteurs les plus proches de ce vecteur source.

4.2. Synthèse sonore

La population d'agents neuromimétiques est divisée en six groupes afin que chaque groupe constitue un instrumentiste : basse, batterie, accompagnement 1, accompagnement 2, fond sonore, instrument soliste. L'apprentissage d'un groupe est défini par ce rôle, de même que sa production sonore.

Afin de commencer la synthèse, un fichier correspondant à une ligne de basse est choisi au hasard, et le SOM propose les vecteurs les plus proches pour les autres instruments. En faisant varier la taille du rayon autour du neurone élu dans le SOM, il est possible de jouer sur l'homogénéité du matériau musical de sortie.

La sortie des agents neuromimétiques est utilisée pour contrôler la synthèse du matériau musical, via six synthétiseurs développés avec Native Instrument Reaktor²¹⁴ et chargés dans MaxMSP en tant que plug-ins²¹⁵ VST²¹⁶.

5. Esthétique de l'œuvre

Plusieurs éléments ont un rôle déterminant dans l'esthétique du matériau musical produit par l'orchestre d'agents neuromimétiques.

Premièrement, la base de données musicale a une influence très importante sur la synthèse sonore. C'est elle qui contient le matériau rythmique et mélodique dont les agents neuromimétiques vont « s'inspirer » pour contrôler la synthèse sonore. L'unité

²¹⁴ Logiciel permettant de développer, via une interface graphique, des instruments modulaires, des échantillonneurs ainsi que des effets sonores.

²¹⁵ Programme auxiliaire fonctionnant via un programme principal.

²¹⁶ *Virtual Studio Technology* : protocole permettant d'intégrer certains programmes audio (instruments virtuels, effets audio, effets MIDI) comme plug-in au sein d'un autre programme.

stylistique du matériau sonore produit dépend donc en partie des choix effectués pour constituer cette base de données.

Deuxièmement, le type de synthèse sonore utilisé pour produire le matériau musical est également déterminant. Pour cette œuvre, Frédéric Voisin et Robin Meier se sont orientés vers de sons électroniques saturés, avec des effets de distorsion afin de suggérer l'univers sombre qui constitue l'argument de cette œuvre. Afin de créer cette ambiance musicale, les deux auteurs ont collaboré avec plusieurs musiciens de la scène électronique populaire française, et se sont inspirés de leurs techniques de live. Durant des sessions de mixage, les interventions des musiciens sur les synthétiseurs ou sur les effets étaient enregistrées. A l'aide de ces données, une sélection de techniques de mixage a pu être mise au point pour le contrôle en temps réel des synthétiseurs et des effets de l'installation.

La structure de la production sonore dépend d'un processus d'aléatoire contrôlé faisant évoluer les données de mixage selon une forme générale choisie : La musique émerge progressivement, par superposition d'éléments. Les premières minutes sont dominées par de longues basses, auxquelles s'ajoutent de manière anecdotique quelques attaques de basse plus percussives, le tout traité par un effet de réverbération dont les paramètres varient. Viennent ensuite s'ajouter des lignes mélodiques qui se densifient petit à petit, laissant entendre différents motifs, pour arriver sur une alternance couplet/refrain. Enfin, les cellules rythmiques des percussions s'accélèrent, les sons deviennent plus durs et plus saturés, jusqu'à atteindre des sonorités *hardcore* avec des sons hyper compressés. La texture du début de la session suivante peut parfois être entendue à la fin.

6. Matériel

L'orchestre d'agents neuromimétiques est réalisé avec 300 processeurs ARM²¹⁷ contenant un environnement Linux²¹⁸ allégé. Les ROSOM y sont programmés en C, et le protocole UDP permettant au réseau de communiquer avec l'extérieur est réalisé grâce à des scripts en Python.

²¹⁷ *Advanced Risc Machine* : Processeurs destinés à l'électronique embarquée.

²¹⁸ Système d'exploitation informatique.

Un ordinateur (système Linux) avec PureData est utilisé pour contrôler les ROSOM et la communication via le protocole UDP des activations neuronales. Les synthétiseurs comme nous l'avons vu sont développés sous Reaktor, et chargés dans MaxMSP comme plug-ins VST. La conversion des données UDP issus des agents, et destinées au contrôle des synthétiseurs, sont convertis en données MIDI sous MaxMSP. L'enregistrement de la production sonore de l'œuvre est réalisé avec PureData sur un autre ordinateur (système Linux).

La communication entre les ordinateurs et l'orchestre d'agents neuromimétiques se fait en Ethernet.

Table des matières

Introduction	7
1. Musiques électroacoustiques, réseaux de neurones artificiels et interactivité : principes, définitions et applications	15
1.1. Musique électroacoustique et interactivité	17
1.1.1. Musiques électroacoustiques : modèles d'analyse	17
1.1.2. Lutherie numérique, langage de programmation et écriture musicale	21
1.1.3. Cybernétique et interactivité : introduction aux réseaux de neurones	27
1.2. Structure des réseaux de neurones artificiels, mémoire et apprentissage	31
1.2.1. Neurone formel, architecture neuronale et codage de l'information.....	31
1.2.2. Apprentissage, algorithmes et mémoire.....	35
1.2.3. Quelques exemples types de réseaux.....	41
1.3. Réseaux de neurones et pratique musicale	45
1.3.1. Musique et connexionnisme.....	45
1.3.2. Applications musicales : aide à la composition et modèles de cognition	48
1.3.3. Réseaux de neurones et processus de réalisation sonore	53
2. Conséquences poétiques induites par l'utilisation d'agents neuromimétiques au sein du processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale	57
2.1. Systèmes connexionnistes et processus de réalisation sonore	59
2.1.1. Écriture du module connexionniste	59
2.1.2. Écriture du programme : interface de contrôle et module de synthèse sonore.....	64
2.1.3. Langage de programmation, expérimentations et optimisation	69
2.2. Installations musicales pour réseaux de neurones : nouveaux enjeux au sein du dispositif	75
2.2.1. Apprentissage neuromimétique et systèmes compositionnels : spécificité des musiques électroacoustiques	75
2.2.2. Contrôle des paramètres du système connexionniste : contrôle instrumental ?.....	78
2.2.3. Synthèse sonore par traitement connexionniste : musique écrite ?.....	82
2.3. Discussion	85
2.3.1. Composition et écriture, instrument et exécutant : nouveaux statuts et nouveaux rapports	85
2.3.2. La synthèse sonore ou l'esthétique de la démonstration.....	89
2.3.3. Dispositifs électroacoustiques pour réseaux de neurones artificiels : Enjeux, limites et perspectives	92

3. Conséquences esthétiques induites par l'utilisation d'agents neuromimétiques au sein du processus de réalisation sonore d'une œuvre musicale	97
3.1. Esthétique des installations musicales pour systèmes neuromimétiques : ouverture, générativité, interactivité intelligente	99
3.1.1. Esthétique de l'ouverture et aléatoire programmable	99
3.1.2. Réseaux de neurones : systèmes génératifs.....	102
3.1.3. L'interactivité intelligente	105
3.2. Au cœur de l'interactivité	109
3.2.1. La relation aléatoire	109
3.2.2. Perception de l'autonomie et intentions de l'utilisateur.....	112
3.2.3. Mise en forme de l'interactivité.....	115
3.3. Discussion	117
3.3.1. Intérêt esthétique des installations musicales pour réseaux de neurones	117
3.3.2. Rapport œuvre/utilisateur : la dramaturgie de l'interactivité intelligente.....	119
3.3.3. Analyse critique de l'œuvre.....	121
Conclusion	125
Sources et références documentaires	133
Bibliographie	135
Ouvrages	137
Articles	139
Webographie	141
Articles	143
Sites consultés	143
Enregistrements sonores consultables en ligne	143
Table des figures	145
Index	147
<i>Index nominum</i>	149
<i>Index operum</i>	153
Annexes	155
Annexe 1. Modèle biologique et principes mathématiques à la base des RNA	157
1. Le neurone biologique	157
2. Le neurone formel	158
3. Fonctions d'activation	158
4. Le Perceptron	160
4.1. Architecture	160
4.2. Règle d'apprentissage.....	160

4.3. Séparateur linéaire.....	161
5. Le Perceptron multicouche.....	162
6. Le réseau de Kohonen.....	164
Annexe 2. Robin Meier, <i>For Alan Turing</i>, Nice, Festival Manca, 2004	167
1. Description	167
2. Principe de l'installation.....	167
2.1. Le neurone transformateur	167
2.2. Le SOM	167
3. Paramètres du réseau et dynamiques d'apprentissage	168
Annexe 3. Frédéric Voisin, Robin Meier, <i>Caresse de marquises</i>, Paris, Festival Nuit Blanche, 2004	171
1. Description	171
2. Matériel	171
3. Principe de l'installation.....	172
3.1. Structure et fonctionnement des agents neuromimétiques	173
3.2. Synthèse sonore	174
3.3. Contrôle des paramètres de l'installation	174
4. Paramètres de contrôle et comportement des agents.....	174
4.1. Paramètres du filtre perceptif.....	175
4.2. Taux d'apprentissage	175
4.3. Température	176
Annexe 4. Fabien Giraud, Raphaël Siboni, Frédéric Voisin, Robin Meier, <i>Last manœuvres in the dark</i>, Paris, Palais de Tokyo, Exposition Superdome, Été 2008.....	177
1. Description	177
2. Fonctionnement général de l'installation.....	178
3. La carte auto-organisatrice récurrente oscillatoire ou ROSOM	179
4. Encodage/Synthèse	179
4.1. Segmentation de la base de donnée musicale et encodage.....	179
4.2. Synthèse sonore	180
5. Esthétique de l'œuvre	180
6. Matériel	181

Remerciements

A Bruno BOSSIS ; à Frédéric VOISIN pour le temps qu'il a consacré à mon travail, à Frédéric DUFEU pour ses conseils avisés, ainsi qu'à Griselda DROUET pour son aide précieuse dans la finalisation de ce mémoire.