

VERS LA MODÉLISATION GESTE-SON POUR LA CONCEPTION D'INSTRUMENTS MUSICAUX IMMERSIFS

Anonymous Author(s)
Anonymous Institution
anonymous@domain.tld

RÉSUMÉ

La musique a historiquement évolué en parallèle de l'apparition de nouveaux instruments, qui ont façonné les pratiques musicales et les genres associés. Bien que les technologies numériques permettent de dépasser les contraintes physiques des instruments acoustiques, de nombreuses interfaces reproduisent encore des modèles traditionnels, limitant l'exploration de nouvelles formes d'interactions. Cet article propose un modèle de caractérisation des instruments acoustiques et numériques fondé sur l'analyse des relations entre entrées utilisateur, paramètres musicaux et mappings geste-son. Ce modèle définit un espace de conception permettant d'analyser les instruments existants et d'explorer de nouvelles configurations par analyse morphologique (extension, transformation et combinaison). Cette approche est mise en œuvre dans WAM Jam Party, une plateforme modulaire de création musicale immersive, permettant la conception et l'évaluation d'instruments virtuels tels que des pianos 3D, des harpes et des batteries interactives. Les résultats montrent que l'exploitation de nouvelles modalités d'entrée, notamment la voix et le regard, enrichit les possibilités expressives et ouvre des perspectives concrètes pour la conception d'instruments numériques exploitant pleinement les dimensions spatiales et multimodales des environnements immersifs.

1. INTRODUCTION

L'histoire de la musique est étroitement liée à l'évolution des instruments, qui structurent à la fois la production sonore et les modes d'interaction du musicien avec le son.

Avec l'apparition des technologies numériques, et plus récemment de la réalité virtuelle, il devient possible de concevoir des instruments qui ne sont plus contraints par des limitations physiques ou mécaniques. Cependant, malgré ces possibilités, la majorité des instruments numériques et interfaces musicales restent fortement inspirés des instruments acoustiques traditionnels, reproduisant des modèles tels que les claviers de piano, les surfaces de contrôle de type step sequencer (par exemple utilisés par les Disc Jockey), l'utilisation de potentiomètres (encodeurs rotatifs) etc.

De nombreux travaux, notamment dans le cadre de la conférence New Interfaces for Musical Expression (NIME) [21], ont exploré la conception de nouveaux instruments numériques et les relations entre geste et son. Ces travaux ont montré que la conception des mappings entre

entrées gestuelles et paramètres sonores constitue un élément central dans la définition des propriétés expressives d'un instrument. Par ailleurs, plusieurs approches issues de l'interaction homme-machine ont proposé des méthodes d'analyse des espaces de conception, permettant de caractériser et de comparer différents dispositifs interactifs.

Bien que les systèmes numériques permettent de dissocier la production sonore de la forme physique de l'instrument, cette dissociation peut réduire la lisibilité de la relation geste-son, essentielle pour le contrôle expressif et la compréhension musicale [13].

Dans ce contexte, l'objectif est de définir un ensemble de dimensions permettant de caractériser les instruments acoustiques et électroniques existants, ainsi que les nouveaux instruments proposés dans la littérature, afin de les positionner dans un espace de conception. À partir de cet espace, un ensemble de critères systématiques peut être établi pour évaluer les instruments en fonction de leur position relative. Cet espace de conception permet non seulement d'évaluer les propositions existantes et de mettre en relation les instruments actuels avec leurs prédécesseurs, mais également de guider la conception de nouveaux instruments en explorant des zones encore peu investies, notamment à travers une analyse morphologique [9]. Cette approche s'inscrit dans la continuité de travaux en interaction homme-machine (HCI), où des espaces de conception similaires ont été utilisés pour analyser et exploiter le potentiel de technologies existantes ou émergentes, telles que les smartphones [2] ou les interfaces à forme variable [16].

Cette méthode est appliquée dans WAM Jam Party [6], un environnement musical collaboratif 3D immersif basé sur le Web, inspiré de sequencer.party [4], une plateforme 2D de création musicale collaborative. WAM Jam Party étend cette approche à des environnements immersifs multi-utilisateurs, dans lesquels des installations musicales modulaires peuvent être construites, spatialement organisées et manipulées en temps réel en interconnectant des Web Audio Modules [5], un format standardisé de plugins audio web instanciables dynamiquement via leur URI et intégrables dans des environnements web interactifs.

Une démonstration est disponible en ligne ¹ et le code source est accessible publiquement ² afin de permettre la reproduction et l'extension de ce travail.

1. <https://wamjamparty.i3s.univ-cotedazur.fr/>
2. <https://github.com/doriangirard9/musical-multiverse-vr>

Cet article poursuit plusieurs objectifs. Il propose tout d'abord *un modèle des instruments numériques* fondé sur les mappings entre entrées utilisateur et paramètres musicaux. Ce modèle est ensuite utilisé pour définir *une méthode d'analyse morphologique* permettant d'explorer l'espace de conception des instruments virtuels. Enfin, cette approche est mise en œuvre dans un environnement de réalité virtuelle, illustrant le potentiel de nouvelles modalités d'interaction telles que *la voix et le regard pour le contrôle musical*. Elle est enfin appliquée à la *conception et à l'implémentation open source de nouveaux instruments* dans un environnement de réalité virtuelle

Ces contributions se distinguent des approches existantes en proposant un modèle explicite des instruments numériques basée sur les relations entre entrées utilisateur, paramètres musicaux et propriétés des mappings. Ce modèle permet non seulement d'analyser les instruments existants, mais également de générer systématiquement de nouvelles configurations instrumentales par exploration morphologique de l'espace de conception.

La réalité virtuelle offre un contexte particulièrement pertinent pour cette approche, car elle permet d'exploiter simultanément un grand nombre de dimensions d'entrée continues, telles que les positions, orientations et vitesses des mains et de la tête, ainsi que des modalités complémentaires comme la voix ou le regard. Elle facilite ainsi la conception d'instruments intrinsèquement multidimensionnels, difficilement réalisables avec des interfaces physiques traditionnelles.

La suite de cet article est organisée comme suit. La section 2 présente les travaux existants relatifs à la classification et à l'évaluation des instruments numériques. La section 3 décrit la méthode proposée. La section 4 présente les instruments étudiés et conçus dans WAM Jam Party. Enfin, la section 5 conclut et propose des perspectives de recherche.

2. ÉTAT DE L'ART SUR LA CLASSIFICATION DES INSTRUMENTS : APPROCHES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES

2.1. Classification morphologique et gestuelle des instruments acoustiques

Les classifications traditionnelles des instruments acoustiques reposent sur la morphologie, les matériaux et le geste de production sonore. Par exemple, la tradition occidentale distingue les instruments selon leur source sonore (cordes, vents, percussions), tandis que d'autres cultures privilégient la morphologie ou le mode d'interaction [18, 15].

Ces classifications reflètent le lien étroit entre morphologie, geste et son dans les instruments acoustiques, où les propriétés physiques contraignent directement les modalités de contrôle. En revanche, ce lien devient partiellement dissociable dans les instruments numériques, où la production sonore peut être indépendante de la forme physique du dispositif.

Cette dissociation ouvre un espace de conception élargi, dans lequel les relations geste-son peuvent être définies arbitrairement, ce qui rend nécessaire le développement

de méthodes de caractérisation adaptées aux instruments numériques.

2.2. Critères d'évaluation des instruments numériques

Jordà et al. [15] proposent plusieurs critères pour évaluer les instruments numériques, notamment l'efficacité, la diversité expressive, la reproductibilité, l'improvisation et la prévisibilité. Ces dimensions permettent d'analyser la valeur instrumentale d'un dispositif du point de vue de l'expressivité et de l'utilisabilité.

Cependant, ces critères constituent principalement des outils d'évaluation a posteriori et ne formalisent pas directement les structures de contrôle qui produisent ces propriétés. En particulier, ils ne décrivent pas explicitement les relations entre les entrées gestuelles, les paramètres musicaux et leurs propriétés temporelles.

2.3. Espaces de conception et dimensions expressives des instruments numériques

Plusieurs travaux ont proposé des espaces de conception pour les instruments numériques. Birnbaum et al. [3] introduisent des dimensions telles que le degré de liberté, le niveau de contrôle musical et les modalités de feedback, permettant de caractériser les propriétés interactives des systèmes musicaux. Magnusson [19] propose une approche complémentaire centrée sur les contraintes expressives, l'explorabilité et l'autonomie, mettant en évidence le rôle de la conception instrumentale dans la définition de l'espace des possibles musicaux.

Ces approches fournissent des cadres conceptuels permettant de situer et de comparer les instruments numériques, mais elles restent principalement descriptives et ne formalisent pas explicitement la structure des relations geste-son. En particulier, elles ne permettent pas de représenter de manière systématique les correspondances entre les entrées utilisateur, les paramètres musicaux et leurs propriétés de contrôle.

2.4. Cycle de vie de la note et implications pour les instruments virtuels

Levitin et al. [17] montrent que la structure temporelle d'une note — incluant son attaque, son maintien et son relâchement — détermine les possibilités de contrôle expressif d'un instrument. Cette analyse met en évidence le rôle central des mappings geste-son dans la définition des propriétés musicales, notamment en distinguant les contrôles impulsifs, limités dans le temps, et les contrôles continus.

Ces travaux soulignent que les propriétés expressives d'un instrument dépendent directement de la nature des relations entre les entrées gestuelles et les paramètres sonores, ce qui motive leur formalisation explicite.

2.5. Synthèse et positionnement de cet article

Ces différents travaux montrent l'importance de la morphologie, du geste, du mapping et des propriétés expressives dans la caractérisation des instruments numériques. Ils proposent des critères d'évaluation et des espaces de conception pertinents, mais ne fournissent pas de représentation permettant de structurer systématiquement les

relations entre entrées utilisateur, paramètres musicaux et propriétés des mappings.

L'objectif de cet article est de proposer un tel modèle, basé sur une analyse morphologique des mappings geste-son. Cette approche vise à fournir un cadre opérationnel permettant à la fois d'analyser les instruments existants et de générer de nouvelles configurations instrumentales par exploration systématique de l'espace de conception.

3. MODÈLE DES MAPPINGS GESTE-SON POUR LA CONCEPTION D'INSTRUMENTS NUMÉRIQUES

Afin d'introduire le modèle proposé, nous partons d'un instrument familier : le piano. Dans un piano acoustique, chaque touche correspond à une hauteur discrète disposée le long d'un axe. Le déclenchement d'une note résulte de l'appui sur une touche, et la vitesse de cet appui influence la vitesse de la note. Le fonctionnement de l'instrument peut ainsi être décrit comme une relation entre les gestes du musicien — par exemple la position de la main ou la dynamique du mouvement — et les paramètres musicaux produits, tels que la hauteur ou l'intensité.

Cette observation met en évidence trois dimensions nécessaires pour décrire un instrument numérique : (i) les *entrées utilisateur*, correspondant aux gestes ou aux actions du musicien ; (ii) les *paramètres musicaux* contrôlés ; (iii) les *mappings* qui relient ces deux ensembles.

Dans notre application immersive, l'interaction repose sur deux manettes et un microphone. Cette configuration ne permet pas de capturer certaines entrées fines, comme la position individuelle des doigts ou les mouvements des pieds, mais elle offre en revanche l'accès à des dimensions supplémentaires telles que la position, l'orientation et la pression des gâchettes des contrôleurs.

Le modèle proposé dans cet article formalise ces relations afin de permettre la description, la comparaison et la génération de configurations instrumentales.

3.1. Caractérisation des entrées utilisateur

L'utilisateur fournit des entrées correspondant aux positions et rotations de chaque main et de la tête, ainsi que des informations vocales telles que le volume, la hauteur et le timbre. Pour chacune de ces variables, nous considérons non seulement leur valeur instantanée, mais aussi leur dérivée première (vitesse) et leur dérivée seconde (accélération), afin de capturer la dynamique des gestes.

Les gâchettes des manettes constituent également des entrées supplémentaires.

Nous modélisons une entrée comme :

$$\text{Entrée} = (\text{Variable})^{(\text{Temporalité})} \quad (1)$$

où :

- Variable \in {position, rotation, paramètres vocaux, gâchette, ...}
- Temporalité \in {instantanée, dérivée, dérivée seconde}

Cette représentation permet de caractériser à la fois l'état et la dynamique des gestes.

La position du doigt sur les touches d'un piano peut, par exemple, être représentée comme ceci :

$$\text{PosXMain}^{\text{Instantanée}} \quad (2)$$

3.2. Caractérisation des paramètres musicaux contrôlés

Les paramètres musicaux correspondent aux propriétés sonores que l'instrument permet de contrôler. À l'échelle d'une note, les caractéristiques fondamentales du son sont la hauteur, l'intensité (ou vitesse/amplitude) et le timbre [15]. Le timbre constitue une catégorie large, pouvant inclure les paramètres de filtrage (par exemple cutoff ou résonance) et, plus généralement, tout paramètre agissant sur le spectre ou la structure du signal.

Pour les instruments acoustiques, le contrôle porte principalement sur ces caractéristiques fondamentales. Le musicien agit directement sur la hauteur, l'intensité et le timbre à travers le geste, ce qui permet des effets tels que le vibrato, le glissando, le trille ou le trémolo [17]. Ces variations résultent généralement d'une interaction physique continue avec l'instrument et restent liées aux contraintes mécaniques et acoustiques du système.

Dans le cas des instruments numériques, l'espace des paramètres musicaux s'étend considérablement. Le contrôle peut porter non seulement sur des notes isolées, mais aussi sur le traitement du signal, la génération de textures sonores par synthèse ou échantillonnage, ou encore la modulation continue de paramètres à l'échelle de la note ou de la phrase. Le musicien peut agir sur les paramètres de gestes musicaux (glissandi, vibrato, trills), produire des structures telles que des gammes ou des arpèges, contrôler le déroulement de phrases, manipuler des matériaux enregistrés (boucles, granularité, vitesse), ou intervenir sur des contenus audio existants [19]. Il est donc compliqué d'établir une liste des paramètres musicaux contrôlables par le musicien. En reprenant la dimension *Musical Control* proposée par Birnbaum [3], nous distinguons trois niveaux :

- Niveau timbral : regroupe les paramètres élémentaires du son : hauteur, intensité (vitesse, amplitude) et timbre. Ce dernier correspond à un ensemble large de paramètres de traitement, comme l'enveloppe, les filtres, le cutoff ou d'autres effets.
- Niveau de la note : concerne le contrôle d'événements musicaux individuels : déclenchement et fin de note, ainsi que l'évolution des paramètres timbraux au cours de sa durée ou l'organisation en successions de notes (par exemple des gammes).
- Niveau du processus : correspond au contrôle de structures musicales plus globales, telles que la génération d'arpèges, l'enchaînement de phrases ou l'organisation temporelle de séquences.

Noter que ces catégories ne désignent pas des paramètres acoustiques distincts, mais le niveau de contrôle musical auquel ils s'appliquent. Les paramètres seront notés :

$$\text{Paramètre} = (\text{Hauteur|Volume|...})^{(\text{Timbre|Note|Processus})} \quad (3)$$

La hauteur d'une note jouée au piano peut, par exemple, être représentée comme ceci :

$$\text{Hauteur}^{\text{Timbre}} \quad (4)$$

3.3. Relations entre entrées et paramètres : modélisation des mappings

Le mapping décrit comment les entrées de l'utilisateur sont reliées aux paramètres musicaux. Une entrée peut être associée à un seul paramètre (one-to-one), à plusieurs paramètres (one-to-many) ou plusieurs entrées peuvent converger vers un même paramètre (many-to-one) [17]. La résolution du contrôle peut varier : elle peut être discrète, continue ou semi-continue. Par exemple, un piano offre un contrôle discret de la hauteur des notes, tandis qu'une guitare permet un contrôle continu sur certaines plages (donc semi-continue) [15]. Une entrée peut agir librement sur un paramètre, le modifier uniquement au moment du déclenchement de la note, ou permettre un contrôle limité sur une plus longue période [17] (par exemple, un pianiste peut ajuster la vélocité d'une note avec la pédale pour l'arrêter).

Nous définissons un mapping comme :

$$(\text{Statique}|\text{Limité}|\text{Libre}) : \{ \text{Entrée}_1, \dots \} \xrightarrow{(\text{Discret}|\text{Continu}|\text{Semi-Continu})} \{ \text{Paramètre}_1, \dots \} \quad (5)$$

Cette représentation permet de caractériser systématiquement la structure de contrôle d'un instrument.

Le mapping reliant la position de la main sur les touches d'un piano à la hauteur de la note jouée peut, par exemple, être représenté comme ceci :

$$\text{Statique} : \text{PosXMain}^{\text{Instantané}} \xrightarrow{\text{Discret}} \text{Hauteur}^{\text{Timbre}} \quad (6)$$

Le contrôle de la hauteur est statique, car il est déterminé uniquement au moment de l'attaque de la note et ne peut pas être modifié durant son émission. Il est également discret, chaque note correspondant à une hauteur distincte.

3.4. Critères d'évaluation des instruments

Les instruments peuvent ensuite être évalués selon plusieurs critères issus de la littérature :

Intuitivité. L'intuitivité mesure la qualité des correspondances entre geste et son, favorisant compréhension et prévisibilité. La vitesse et la force des mouvements affectent l'intensité ou le volume sonore, tandis que la hauteur de la main ou d'un objet correspond à la hauteur du son [17]. La taille des objets peut moduler le volume [24]. En pratique, la position de l'instrument est mieux adaptée aux contrôles continus, l'angle aux variations fines de hauteur, et la pression appliquée sur l'instrument à la modulation du timbre [20].

Degré de liberté. Le degré de liberté, tel que proposé par Birnbaum et al. [3], correspond au nombre d'entrées distinctes exploitées par un instrument. L'utilisation d'un plus grand nombre d'entrées augmente ce degré de liberté, ce qui peut accroître l'expressivité de l'instrument, mais aussi

sa complexité de maîtrise. Un instrument à haut degré de liberté mobilise davantage l'attention du musicien, limitant son utilisation simultanée avec d'autres contrôles.

Expressivité. L'expressivité d'un instrument dépend de la capacité des entrées à moduler de manière fine et variée les paramètres sonores. Un instrument est plus expressif lorsque chaque entrée peut influencer plusieurs dimensions du son (hauteur, intensité, timbre) de façon indépendante, libre et continue.

Tolérance à l'erreur. La tolérance à l'erreur correspond à la capacité d'un instrument à produire des résultats cohérents malgré des gestes imprécis ou partiellement incorrects. L'utilisation de mappings discrets ou statiques augmente cette tolérance. Un instrument tolérant facilite l'exploration et l'apprentissage tout en limitant la frustration du musicien.

Prévisibilité (ou Reproductibilité). La prévisibilité mesure la stabilité de la relation entre le geste et le résultat sonore, afin de permettre l'anticipation et le développement de compétences. Une faible part d'aléa ou de comportement non déterministe favorise le contrôle et la reproductibilité [17]. On peut chercher à développer des instruments peu prévisibles qui surprennent le musicien lui-même.

Efficacité. Les mappings doivent préserver un rapport équilibré entre effort et complexité du résultat sonore [15]. Des gestes simples doivent produire des effets perceptibles, tandis que des gestes plus complexes doivent permettre un contrôle plus fin ou multidimensionnel. Cette progressivité favorise à la fois l'accessibilité et l'expressivité.

Contrôle musical. Le contrôle musical correspond au niveau auquel le musicien peut agir sur la sortie sonore de l'instrument [3]. Il peut se situer à trois échelles : le contrôle timbral (modulation des caractéristiques du son), le contrôle des notes (déclenchement et articulation des événements musicaux), et le contrôle de processus musicaux (gestion de structures ou séquences globales).

Rétroaction (Feedback). Le degré de rétroaction en temps réel offert à l'utilisateur, englobant les modalités visuelle, auditive, tactile et kinesthésique. Ces critères permettent d'interpréter la position d'un instrument dans l'espace de conception défini par les mappings.

3.5. Méthode d'analyse morphologique

Une fois qu'un ou plusieurs instruments ont été caractérisés selon cette méthode, plusieurs approches analytiques peuvent être mises en œuvre, s'appuyant sur une analyse morphologique basée sur les mappings.

Trois stratégies principales sont envisagées :

Analyse par extension. Cette approche consiste à identifier les entrées et les paramètres musicaux non exploités par un instrument donné, puis à générer des variantes de cet instrument intégrant ces éléments. Ces variantes conservent les mappings existants tout en ajoutant de nouveaux liens entre les entrées et les paramètres jusque-là inemployés.

Analyse par transformation. Cette méthode explore des modifications des propriétés des mappings existants d'un instrument. Elle peut consister, par exemple, à convertir

des mappings discrets en mappings continus, ou inversement, afin d'évaluer l'impact de ces transformations sur l'expressivité et le contrôle musical.

Analyse par combinaison (ou croisement). Cette approche consiste à rassembler l'ensemble des mappings observés dans un groupe d'instruments et à explorer systématiquement toutes les combinaisons possibles de ces mappings, afin d'identifier de nouvelles configurations instrumentales potentiellement exploitables.

Cette approche s'inscrit dans la continuité des travaux existants sur les mappings geste-son et les espaces de conception des instruments numériques. En particulier, Hunt et al. [12] ont montré l'importance de la structure des mappings dans l'expressivité instrumentale, tandis que Birnbaum et al. [3] et Magnusson [19] ont proposé des espaces de conception permettant de caractériser les dispositifs musicaux interactifs. Le modèle proposé dans cet article vise à compléter ces approches en fournissant une représentation explicite et opérationnelle des relations entre entrées gestuelles et paramètres musicaux, afin de faciliter leur analyse et leur exploration systématique.

4. ÉTUDE DE CAS : CONCEPTION D'INSTRUMENTS VIRTUELS DANS WAM JAM PARTY

Cette section applique la méthode d'analyse morphologique proposée dans WAM Jam Party [6], une plateforme modulaire basée sur les Web Audio Modules (WAM), dans laquelle les mappings peuvent être routés dynamiquement vers les paramètres des plugins audio.

Afin d'illustrer le modèle proposé, nous analysons et implémentons plusieurs instruments couvrant différentes régions de l'espace de conception, allant d'instruments inspirés de modèles acoustiques à des dispositifs exploitant des modalités d'entrée multimodales. Cette progression illustre comment l'analyse morphologique peut être utilisée à la fois pour formaliser des instruments existants et pour générer de nouvelles configurations instrumentales.

4.1. Piano

Le piano constitue l'instrument de référence utilisé pour illustrer le modèle présenté dans la section précédente. Dans WAM Jam Party, cet instrument peut être implémenté en associant la position horizontale de la main à la hauteur des notes, tandis que la dynamique du mouvement contrôle la vélocité.

Pour chaque main, les mappings peuvent être décrits ainsi :

$$\begin{aligned} \text{Statique : PosXMain} &\xrightarrow{\text{Instantanée Discret}} \text{Hauteur}^{\text{Timbre}} \\ \text{Statique : PosYMain} &\xrightarrow{\text{Dérivée Continue}} \text{Vélocité}^{\text{Note}} \end{aligned} \quad (7)$$

Nous avons implémenté cet instrument dans WAM Jam Party en utilisant les mappings proposés (Figure 1). La gâchette de la manette permet de déclencher la note, tandis que la position horizontale contrôle la hauteur.

$$\begin{aligned} \text{Libre : PosXMain} &\xrightarrow{\text{Instantanée Discret}} \text{Hauteur}^{\text{Timbre}} \\ \text{Statique : Gâchette} &\xrightarrow{\text{Instantanée Discret}} \text{Vélocité}^{\text{Note}} \end{aligned} \quad (8)$$

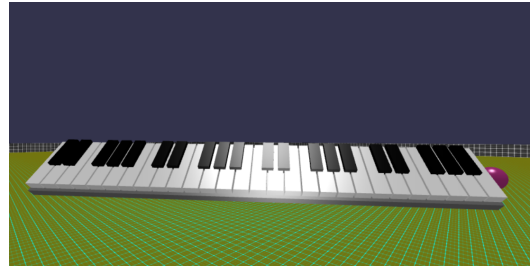


Figure 1. Instrument de type piano 3D implémenté dans WAM Jam Party, utilisant les mappings proposés. Un appui sur la gâchette simule une touche enfoncée

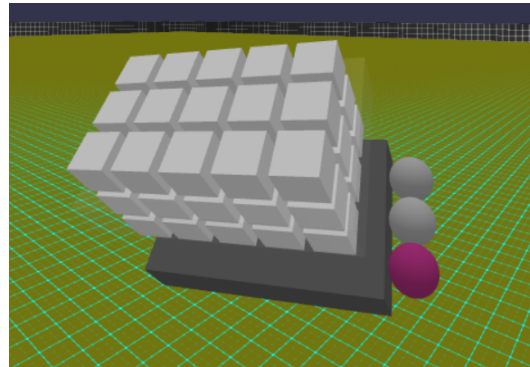


Figure 2. Un piano 3D créé sur WAM Jam Party utilisant les mappings proposés

4.2. Piano 3D

En appliquant l'analyse par extension, il est notable que le piano 2D précédent, adapté à la réalité virtuelle, n'exploite pas certaines entrées, notamment les positions Y et Z et la rotation des mains, ainsi que les mouvements de la tête et la voix. Une approche consiste alors à étendre le dispositif en ajoutant des mappings pour ces dimensions, en s'appuyant sur le mapping existant pour chaque main :

$$\begin{aligned} \text{Libre : PosZMain} &\xrightarrow{\text{Instantanée Discret}} \text{Paramètre}_1 \\ \text{Libre : PosYMain} &\xrightarrow{\text{Instantanée discret}} \text{Paramètre}_2 \end{aligned} \quad (9)$$

On obtient ainsi un clavier tridimensionnel (Figure 2). Cette configuration est implémentée dans l'application Virtuoso [14], qui propose plusieurs variantes. Dans la version Oorgan, les paramètres 1 et 2 correspondent également à la hauteur des notes. Chaque bouton de la manette déclenche une note distincte, dont la hauteur est déterminée par un axe différent de la position de la main, ce qui permet de jouer simultanément mélodies et accords. La rotation de la manette sur un axe supplémentaire contrôle le cutoff, et le déplacement de la main sur plusieurs axes permet de moduler la hauteur des notes de manière continue comme sur un piano pour effectuer un glissando.

La variante Board se distingue de l'Oorgan par la gestion du maintien des notes : la hauteur d'une note est fixée par la position de la main au moment de l'activation du bouton, indépendamment des déplacements ultérieurs de la main. Cette configuration permet de construire des accords avec une seule main tout en conservant un contrôle précis

sur la hauteur des notes. C'est une variante statique de l'Organ. Nous avons implémenté ce clavier tridimensionnel dans WAM Jam Party (Figure 2), permettant d'exploiter les dimensions spatiales supplémentaires pour enrichir le contrôle musical.

Cette extension illustre l'analyse par extension proposée dans notre méthode, en mobilisant des entrées non exploitées dans l'instrument original.

4.3. Batterie modulaire

Une batterie est constituée de plusieurs éléments, chacun possédant un timbre spécifique et une réponse dynamique distincte, ce qui rend sa représentation complexe avec cette notation. Il est possible de la représenter comme un ensemble de plus petits instruments que l'on appellera "percussion". La vitesse de frappe influence le paramètre vitesse de la note. La position de la frappe (proche du centre ou du bord) influence à la fois la vitesse et le timbre [23]. Après le contact, il n'est généralement plus possible d'agir sur la sonorité produite. Cette interaction peut donc être représentée comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Statique : } & \text{PosZMain}^{\text{Dérivée}} \rightarrow \text{Vélocité}^{\text{Timbre}} \\ \text{Statique : } & \{ \text{PosXMain}^{\text{Instantanée}}, \text{PosYMain}^{\text{Instantanée}} \} \\ & \rightarrow \{ \text{Vélocité}^{\text{Note}}, \text{Timbre}^{\text{Timbre}} \} \end{aligned} \quad (10)$$

Des instruments similaires existent dans des environnements VR tels que Virtuoso ou EXA [14, 1], qui utilisent des objets frappables pour déclencher des sons. Certaines approches enrichissent ce principe en intégrant des dimensions supplémentaires, comme l'angle d'attaque ou des organisations spatiales complexes des éléments interactifs, permettant d'étendre les possibilités de contrôle musical.

Gioiosa et al. proposent Sound Blocks VR [11], un instrument accessible dans lequel des cubes sonores déclenchent des notes lors d'un contact avec la main ou un contrôleur VR. Chaque cube peut être configuré (pitch, vitesse, canal MIDI, patch) et déplacé librement. Cette approche privilégie l'accessibilité et la tolérance aux gestes imprécis, illustrant l'intérêt des instruments dérivés de la batterie pour l'exploration musicale.

WAM Jam Party possède déjà une batterie "incarnée" exploitant le moteur physique Havok [7], mais dans le cadre du travail présenté ici, une autre batterie, très différente, a été conçue et implémentée, basée sur la représentation suivante :

$$\begin{aligned} \text{Statique : } & \text{PosZMain}^{\text{Dérivée}} \xrightarrow{\text{Continu}} \text{Vélocité}^{\text{Note}} \\ \text{Statique : } & \{ \text{PosXMain}^{\text{Instantanée}}, \text{PosYMain}^{\text{Instantanée}} \} \\ & \xrightarrow{\text{Continu}} \text{Paramètre}_1 \end{aligned} \quad (11)$$

Elle est composée de plusieurs disques que l'on peut déplacer librement. Chaque disque correspond à une note MIDI particulière et la distance entre le point de frappe et le centre du disque permet de moduler un paramètre (Figure 3).

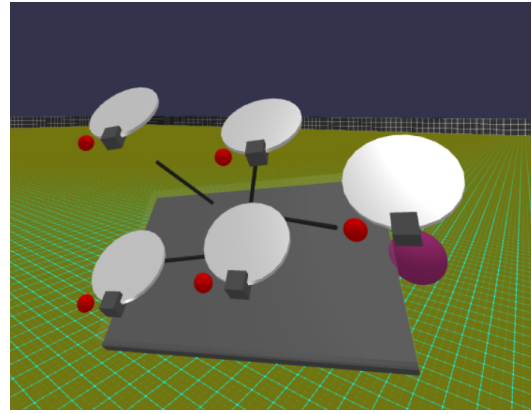


Figure 3. Une batterie modulaire créée sur WAM Jam Party en utilisant les mappings proposés

Nous avons implémenté cette batterie modulaire dans WAM Jam Party (Figure 3).

Cette configuration illustre la capacité de la méthode à représenter des instruments composés de plusieurs éléments indépendants.

4.4. Harpe

Une harpe peut être décrite de manière analogue au piano : la position horizontale de la main (X) détermine la hauteur de la note, et la vitesse du déplacement le long de cet axe contrôle la vitesse. Les mappings peuvent ainsi être représentés :

$$\begin{aligned} \text{Statique : } & \text{PosXMain}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Discret}} \text{Hauteur}^{\text{Timbre}} \\ \text{Statique : } & \text{PosXMain}^{\text{Dérivée}} \xrightarrow{\text{Continu}} \text{Vélocité}^{\text{Note}} \end{aligned} \quad (12)$$

La différence principale entre les harpes et un piano virtuels est qu'un piano nécessite souvent de presser un bouton pour déclencher une note là où, pour une harpe, passer la main sur le "fil" suffit à la déclencher.

Virtuoso [14] propose une variante virtuelle de la harpe, appelée wHarp, constituée de plusieurs lignes alignées le long d'un axe. Chaque ligne correspond à une note et est jouée par frottement. La hauteur du geste sur la ligne influence également le volume, permettant un contrôle expressif du son. Cette harpe n'utilise donc pas la vitesse du mouvement de la main pour influencer la vitesse de la note jouée.

La harpe laser est une forme d'instrument inspirée de la harpe traditionnelle mais utilisant des faisceaux lumineux au lieu de cordes physiques. Chaque rayon correspond à une note distincte et est déclenché lorsque la main du musicien le traverse. L'absence de résistance mécanique implique que la vitesse du mouvement n'influence pas la vitesse, bien que certains modèles puissent détecter la hauteur de la main. Cet instrument électronique figure parmi les plus connus dans cette catégorie.

Nous avons implémenté cette harpe dans WAM Jam Party (Figure 4), en ajoutant un contrôle de la vitesse basé sur la vitesse du geste.

Cette implémentation démontre comment la méthode proposée permet d'étendre des instruments existants en

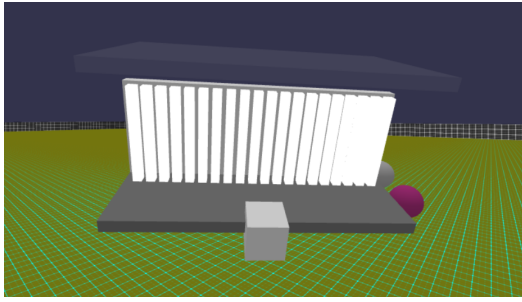


Figure 4. Harpe 3D implémentée dans WAM JAM Party enrichissant leurs mappings.

4.5. Interaction par le regard

En appliquant l’analyse par extension aux instruments précédemment étudiés, remarquons que les entrées liées à la position et à l’orientation de la tête du musicien ne sont généralement pas exploitées. Une piste consiste alors à mobiliser ces dimensions à travers des techniques de suivi du regard (*gaze tracking*).

Santini explore cette approche en augmentant le jeu pianistique par l’intégration d’objets virtuels disposés autour d’un piano acoustique [22]. L’interprète porte un casque de réalité augmentée HTC Vive Pro 2 ainsi que des trackers sur les mains, ce qui lui permet d’interagir avec ces objets tout en poursuivant l’exécution instrumentale.

Les interactions peuvent être réalisées soit par contact direct avec la main, soit par le regard. Chaque objet virtuel fonctionne comme une extension fonctionnelle de l’instrument : il peut déclencher des événements sonores, modifier des paramètres audio (par exemple la synthèse granulaire ou la spatialisation) et contrôler simultanément des éléments visuels projetés.

Cette approche est implémentée dans WAM Jam Party sous la forme d’un contrôleur par regard (Figure 5). L’architecture modulaire de WAM Jam Party permet, plutôt que d’intégrer cette interaction à un instrument particulier, de proposer un composant indépendant pouvant être associé à n’importe quel instrument. Ce module fournit un signal de contrôle binaire en fonction de l’état d’attention visuelle : une valeur est émise lorsque l’objet est regardé, et une autre lorsqu’il ne l’est pas. Il devient alors possible de contrôler en temps réel différents paramètres du système sans mobiliser les mains, en exploitant le regard comme canal d’interaction supplémentaire (Figure 5).

$$\text{Libre : RotationTête} \xrightarrow{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Discret}} \text{Paramètre}_1 \quad (13)$$

Ce module permet de contrôler des paramètres sans mobiliser les mains, illustrant l’analyse par extension à une nouvelle modalité d’entrée.

4.6. Interaction par la voix

En appliquant l’analyse par extension aux instruments précédemment décrits, on constate que les entrées liées à la voix sont généralement peu exploitées. Pourtant, dans de nombreux dispositifs acoustiques, le conduit vocal joue un rôle central dans le contrôle du son, soit par la production

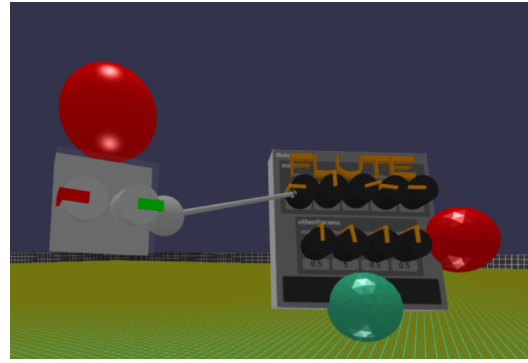


Figure 5. Le contrôleur par regard de WAM Jam Party, il est connecté à un paramètre d’un plugin audio

directe de matière sonore (chant, vocalisation), soit par la modification de ses caractéristiques spectrales ou de son intensité. La voix peut ainsi être considérée comme un geste sonore continu dont plusieurs dimensions — intensité, hauteur ou timbre — peuvent servir d’entrées de contrôle pour moduler des paramètres musicaux. La plupart des casques de réalité virtuelle intégrant un microphone, cette modalité d’interaction est particulièrement accessible dans un contexte immersif.

Des dispositifs électroniques exploitent déjà ce principe : les vocoders utilisent les caractéristiques spectrales de la voix pour contrôler la synthèse d’un signal, et Fasciani et al. proposent d’employer les paramètres vocaux pour moduler en temps réel un générateur sonore [10].

Dans WAM Jam Party, un module de geste vocal permet de contrôler des paramètres en fonction de l’intensité et de la hauteur de la voix. Conçu selon la même architecture modulaire que le contrôleur par regard, il peut être associé à n’importe quel instrument et permet de moduler en temps réel les paramètres du système tout en laissant les mains libres pour le jeu instrumental (Figure 6).

Dans ce cas, les entrées correspondent aux caractéristiques instantanées de la voix, notamment la hauteur et l’intensité. Ces variables peuvent être associées à des paramètres musicaux contrôlés de manière continue. Les mappings correspondants peuvent être modélisés comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Libre : HauteurVoix} &\xrightarrow{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_1 \\ \text{Libre : VolumeVoix} &\xrightarrow{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_2 \end{aligned} \quad (14)$$

4.7. Le Cube XYZ

Nous avons implémenté cet instrument dans WAM Jam Party, où il permet de contrôler simultanément trois paramètres à l’aide d’une seule main (Figure 7).

En appliquant l’analyse par transformation au piano 3D, on cherche à créer une version à contrôle continu, représentable par les mappings suivants :

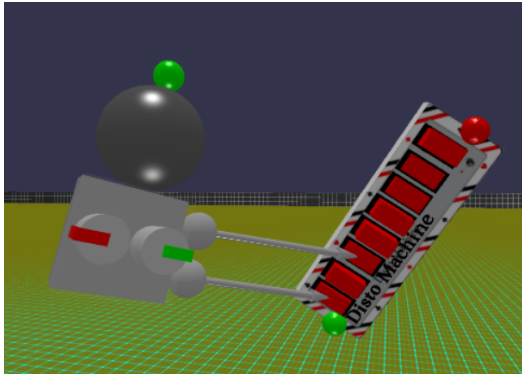


Figure 6. Contrôleur vocal de WAM Jam Party : il module ici le paramètre "Volume" d'un plugin audio selon l'intensité de la voix, et le paramètre "Drive" selon la hauteur de la voix.

$$\begin{aligned}
 \text{Libre : PosXMain} &\xrightarrow{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_1 \\
 \text{Libre : PosYMain} &\xrightarrow{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_2 \\
 \text{Libre : PosZMain} &\xrightarrow{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_3 \\
 \text{Statique : Gâchette} &\xrightarrow{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Discret}} \text{Vélocité}^{\text{Note}}
 \end{aligned} \quad (15)$$

Cette configuration permet de contrôler simultanément trois paramètres, la gâchette servant au déclenchement des notes. Des instruments comme Virtuoso (Wavemin [14]) utilisent un cube transparent dans lequel le contrôleur est positionné : les coordonnées spatiales X, Y et Z pilotent différents paramètres, la rotation de la manette contrôle le cutoff d'un filtre, et la pression sur la gâchette déclenche la note.

Sans contrôle du volume par la gâchette, ce type d'instrument permet le contrôle continu de plusieurs paramètres. OpenSoundLab illustre une approche comparable appliquée à la synthèse modulaire, permettant de créer et transformer le son en connectant oscillateurs, filtres et modules de contrôle dans un espace 3D, avec liberté de déplacer, copier et redimensionner les modules. Un dispositif analogue à Wavemin permet de piloter simultanément trois paramètres [25], et Virtuoso exploite également ce principe pour moduler les paramètres de ses instruments.

Nous avons implémenté cet instrument dans WAM Jam Party (Figure 7), où il permet de contrôler simultanément trois paramètres à l'aide d'une seule main.

Cette configuration illustre l'analyse par transformation, en convertissant un contrôle discret en contrôle continu.

4.8. Vers de nouveaux paradigmes de séquençage

La méthode proposée permet également d'explorer de nouvelles approches du séquençage musical, en s'appuyant sur des représentations spatiales des événements sonores. Par exemple, PathoSonic [8] propose un système dans lequel un fichier sonore est analysé et représenté sous la forme d'un nuage de points tridimensionnel, chaque point correspondant à un fragment sonore. Le musicien peut interagir avec ces points par des gestes et tracer des trajectoires dans cet espace afin de générer des séquences et des structures musicales.

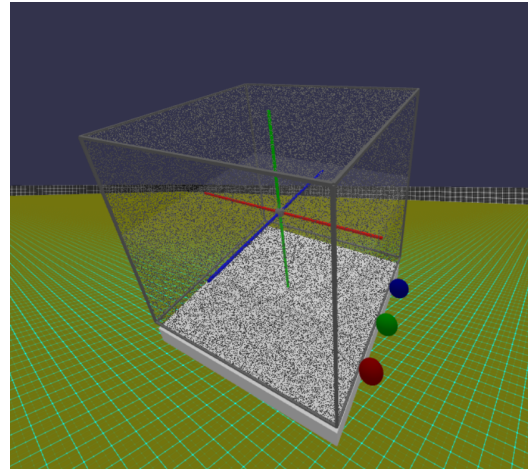


Figure 7. Une cube de contrôle de paramètres dans WAM Jam Party

Appliquée au piano 3D, cette approche suggère la possibilité de créer un séquenceur spatial dans lequel les notes seraient déclenchées par le passage d'un objet ou d'un curseur suivant une trajectoire traversant plusieurs positions dans l'espace. Contrairement aux séquenceurs traditionnels, généralement organisés selon une grille bidimensionnelle temps-hauteur, cette approche permettrait de définir des séquences sous forme de trajectoires continues, offrant un contrôle plus direct et plus gestuel de la structure musicale.

Cette perspective illustre la capacité de la méthode proposée à générer de nouveaux paradigmes instrumentaux en exploitant les dimensions spatiales et les mappings disponibles. Une implémentation de ce type de séquenceur est actuellement en cours de développement dans WAM Jam Party.

4.9. Synthèse des instruments générés

Le Tableau 1 présente une synthèse des instruments analysés et générés à l'aide de la méthode proposée, en indiquant les entrées utilisées, les paramètres contrôlés et le type d'analyse morphologique appliqué.

4.10. Perspectives de conception instrumentale

L'analyse morphologique des instruments met en évidence plusieurs directions encore peu explorées :

- L'utilisation de l'accélération comme paramètre de contrôle, que ce soit pour des gestes (ex. maracas) ou pour des variations vocales.
- Des pianos 3D avec des mappings continus sur certains axes de position.
- Des contrôles basés sur la vitesse de rotation.
- Des mappings différenciés pour chaque main.
- L'exploitation de la pression sur les gâchettes.
- L'utilisation de la vitesse dans des mapping continus et libres
- Des instruments intervenant à différents niveaux de contrôle musical, du timbre au processus global.

Ces pistes illustrent le potentiel de la méthode morphologique proposée pour identifier systématiquement de nouvelles configurations instrumentales.

Instrument	Entrées exploitées	Paramètres contrôlés	Opération morphologique
Piano virtuel	Position X, gâchette	Hauteur, vitesse	Référence
Piano 3D	Position XYZ	Hauteur	Extension
Batterie modulaire	Position XY, vitesse	Timbre, vitesse	Extension
Harpe virtuelle	Position X, vitesse	Hauteur, vitesse	Adaptation
Contrôleur vocal	Hauteur, volume de la voix	Paramètre timbral	Extension
Contrôleur par regard	Orientation de la tête	Paramètre continu	Extension
Cube XYZ	Position XYZ	Paramètres continus multiples	Transformation

Table 1. Synthèse des instruments analysés et générés à l’aide de la méthode proposée.

Contrairement aux approches existantes, qui se concentrent principalement sur l’analyse qualitative des instruments ou sur leurs propriétés expressives, la méthode proposée fournit un cadre permettant de structurer l’espace de conception des instruments numériques. Cette approche permet non seulement l’analyse, mais également la génération systématique de nouveaux instruments.

5. DISCUSSION

Cette étude propose une modélisation des instruments numériques fondée sur les relations entre entrées utilisateur, paramètres musicaux et propriétés des mappings. Les résultats montrent que cette représentation permet de décrire de manière cohérente des instruments variés et fournit un cadre opérationnel pour la conception de nouvelles configurations instrumentales.

La réalité virtuelle constitue un contexte particulièrement pertinent dans ce cadre, en raison du grand nombre de degrés de liberté et de modalités d’entrée continues qu’elle offre, rendant nécessaire une structuration explicite de l’espace de conception.

L’application de cette approche dans WAM Jam Party a permis de générer et d’implémenter plusieurs instruments exploitant des dimensions d’interaction peu utilisées, notamment la position tridimensionnelle, la voix et le regard. Cette implémentation démontre la faisabilité technique de l’approche dans un environnement immersif multi-utilisateur, où les interactions peuvent être enregistrées et synchronisées en réseau. La disponibilité publique du logiciel et de son code source permet en outre la reproduction et l’extension de ces travaux.

L’implémentation de ces instruments dans WAM Jam Party montre que la méthode peut être appliquée concrètement dans un environnement immersif multi-utilisateur.

Des sessions exploratoires menées lors d’ateliers et de sessions collaboratives suggèrent que ces instruments constituent une base pertinente pour l’exploration musicale et le prototype.

Cette approche présente néanmoins certaines limitations. La modélisation se concentre principalement sur les relations de contrôle et ne prend pas encore en compte des dimensions telles que les feedbacks sensoriels, les contraintes ergonomiques ou les aspects perceptifs. De plus, l’évaluation repose essentiellement sur l’analyse et l’implémentation des instruments, sans étude utilisateur formelle permettant de mesurer quantitativement leur expressivité ou leur utilisabilité.

Par ailleurs, la réalité virtuelle introduit également des contraintes spécifiques. L’absence de retour haptique physique, la charge cognitive associée à l’immersion, ainsi que certaines limitations techniques telles que la latence ou la précision du suivi, peuvent influencer l’expérience instrumentale.

Malgré ces limitations, les résultats obtenus suggèrent que l’analyse morphologique des mappings constitue un cadre pertinent pour explorer l’espace de conception des instruments numériques et générer de nouvelles configurations instrumentales, en particulier dans des environnements immersifs caractérisés par une grande richesse de modalités d’interaction.

6. CONCLUSION

L’analyse montre que classifier les instruments numériques selon leurs entrées, leurs paramètres musicaux et leurs mappings constitue un outil efficace pour comprendre et orienter leur conception. L’usage de méthodes morphologiques — extension, transformation et combinaison — permet d’identifier des zones peu explorées dans l’espace de conception et de générer de nouvelles configurations instrumentales, que ce soit à partir d’instruments acoustiques, électroniques ou immersifs.

Cette approche permet également d’analyser de manière systématique des instruments existants et d’explorer leurs variantes, mettant en évidence que certains choix de conception sont en partie arbitraires. Elle offre ainsi la possibilité de définir des critères d’évaluation et de comparer différentes configurations instrumentales. Son application dans WAM Jam Party, une plateforme immersive collaborative open source, démontre la faisabilité concrète de cette formalisation dans un contexte multi-utilisateur temps réel, où les instruments peuvent être utilisés simultanément, interconnectés, et leurs productions enregistrées et synchronisées sur le réseau.

Bien que validé dans le contexte de WAM Jam Party, le modèle proposé est indépendant de cette plateforme et peut être appliqué à d’autres systèmes d’instruments numériques reposant sur des mappings geste-son.

Cette approche présente néanmoins certaines limites. En particulier, elle repose sur l’hypothèse qu’un instrument peut être décrit principalement à partir des relations entre entrées et paramètres musicaux. Certaines dimensions importantes, telles que les modalités de feedback, les aspects ergonomiques ou l’organisation spatiale, ne sont pas encore explicitement prises en compte, et des instru-

ments différents peuvent apparaître similaires dans cette représentation.

Ces travaux ouvrent plusieurs perspectives. Le modèle pourrait être enrichi afin d'intégrer ces dimensions complémentaires et permettre une exploration plus complète de l'espace de conception. Des études utilisateurs formelles seront également menées afin d'évaluer quantitativement l'expressivité, l'utilisabilité et le potentiel musical des instruments proposés.

Dans ce contexte, l'analyse morphologique des mappings constitue une approche prometteuse pour structurer, analyser et concevoir de nouveaux instruments numériques, en particulier dans les environnements immersifs et collaboratifs.

7. REFERENCES

- [1] Aesthetic Interactive, Z.K. : Exa : The infinite instrument. https://store.steampowered.com/app/606920/EXA_The_Infinite_Instrument/ (2019)
- [2] Ballagas, R., Borchers, J., Rohs, M., Sheridan, J.G. : The smart phone : a ubiquitous input device. *IEEE pervasive computing* **5**(1), 70–77 (2006)
- [3] Birnbaum, D., Fiebrink, R., Malloch, J., Wanderley, M.M. : 2005 : Towards a dimension space for musical devices. In : *A NIME Reader : Fifteen Years of New Interfaces for Musical Expression*, pp. 211–222. Springer (2017)
- [4] Buffa, M., Burns, T. : Real-time collaborative music creation on the web : exploiting web audio modules for interactive performance and composition. In : *2025 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. pp. 1–8 (2025)
- [5] Buffa, M., Ren, S., Burns, T., Vidal-Mazuy, A., Letz, S. : Evolution of the web audio modules ecosystem. In : *Web Audio Conference 2024*
- [6] Buffa, M., Winckler, M., Escobar, Q., Demont, S., Hofr, A., Mir-Sadjadi, A. : Wam jam party : a collaborative real-time music creation experience in vr. In : *WAC 2025-Web Audio Conference*. Zenodo (2025)
- [7] Buffa, M., Winckler, M., Mir-Sadjadi, A. : Embodied Virtual Instruments in Web-Based Multi-User VR : A Case Study with a 3D Drum Kit and Web Audio Modules. *WAC 2025 - 9th Web Audio Conference* (2025)
- [8] Camara Halac, F., Addy, S. : Pathosonic : Performing sound in virtual reality feature space. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. pp. 520–522 (2020)
- [9] Card, S.K., Mackinlay, J.D., Robertson, G.G. : A morphological analysis of the design space of input devices. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)* **9**(2), 99–122 (1991)
- [10] Fasciani, S., Wyse, L. : A voice interface for sound generators : adaptive and automatic mapping of gestures to sound (2012)
- [11] Gioiosa, M., Avanzini, F., Ludovico, L.A., Brambilla, S., Ripamonti, L. : Sound blocks vr : An accessible virtual reality musical instrument. In : *International Conference on Computer-Human Interaction Research and Applications*. pp. 316–330 (2024)
- [12] Hunt, A., Wanderley, M.M., Kirk, R. : Towards a model for instrumental mapping in expert musical interaction. In : *ICMC* (2000)
- [13] Iazzetta, F. : Meaning in musical gesture. *Trends in gestural control of music* pp. 259–268 (2000)
- [14] Interactive, R. : Virtuoso. <https://www.meta.com/fr-fr/experiences/virtuoso/4705981139481778> (2022)
- [15] Jordà Puig, S. : Instruments and players some thoughts on digital lutherie (2004)
- [16] Kwak, M., Hornbæk, K., Markopoulos, P., Bruns Alonso, M. : The design space of shape-changing interfaces : a repertory grid study. In : *Proceedings of the 2014 conference on Designing interactive systems*. pp. 181–190 (2014)
- [17] Levitin, D.J., McAdams, S., Adams, R.L. : Control parameters for musical instruments : a foundation for new mappings of gesture to sound. *Organised Sound* **7**(2), 171–189 (2002)
- [18] López-Huertas Pérez, M.J., et al. : Transcultural categorization in contextualized domains (2013)
- [19] Magnusson, T. : An epistemic dimension space for musical devices. In : *Proceedings of the 2010 conference on new interfaces for musical expression (NIME 2010)*. pp. 43–46 (2010)
- [20] Paine, G., Stevenson, I., Pearce, A. : The thummer mapping project (thump). In : *Proceedings of the 7th international conference on New interfaces for musical expression*. pp. 70–77 (2007)
- [21] Poupyrev, I., Lyons, M.J., Fels, S., Blaine, T. : New interfaces for musical expression. In : *CHI'01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. pp. 491–492 (2001)
- [22] Santini, G. : Xr etudes for augmented piano. In : *Proceedings of the sound and music computing conferences*. vol. 2023, pp. 84–88 (2023)
- [23] Wagner, A. : Analysis of drumbeats : interaction between drummer, drumstick and instrument. Ph.D. thesis, Kunglia Tekniska Högskolan (2006)
- [24] Wang, Y., Martin, C. : Cubing sound : Designing a nime for head-mounted augmented reality. In : *International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. PubPub (2022)
- [25] Zeller, L., Bauer, A. : The walkable instrument : Modular patches as entangled environments in open-soundlab. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. pp. 36–39 (2025)