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

Samuel Demont, Michel Buffa, Marco Winckler, Florent Robert
Université Côte d'Azur, France
nom.prenom@univ-cotedazur.fr

RÉSUMÉ

La musique a 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 ne permettent pas l'exploration de nouvelles formes, car elles reproduisent souvent des modèles traditionnels. Cet article propose une méthode de caractérisation des instruments fondée sur une modélisation des relations entre entrées utilisateur, paramètres musicaux et stratégies de mapping. Cette formalisation définit un espace de conception permettant d'analyser les instruments existants et de générer de nouvelles configurations par analyse morphologique (extension, transformation et combinaison). Cette approche théorique est opérationnalisée à travers l'architecture logicielle de *WAM Jam Party*, une plateforme modulaire de création musicale immersive. Nous illustrons la pertinence de cette approche par la conception d'instruments virtuels (pianos 3D, harpes, batteries) exploitant de nouvelles modalités d'interaction humain-machine, telles que le regard et la voix. Ce travail pose les bases d'un cadre de génération d'instruments dont les évaluations ergonomiques et musicales feront l'objet de travaux futurs.

1. INTRODUCTION

La lutherie, qu'elle soit acoustique ou numérique, est au cur de l'évolution des pratiques musicales. L'apparition de nouveaux instruments a historiquement façonné les genres et les techniques d'interprétation. Aujourd'hui, les technologies numériques offrent une liberté de conception sans précédent, permettant de décorréler le geste de la production sonore. Cependant, de nombreuses interfaces numériques ne permettent pas l'exploration de nouvelles formes car elles se contentent de reproduire des paradigmes traditionnels (claviers, pads, curseurs).

Cet article s'inscrit dans une démarche de recherche-création visant à formaliser les mécanismes de création d'instruments dans des environnements virtuels. Notre approche repose sur l'architecture logicielle de *WAMJam Party* [1] [4], une plateforme modulaire basée sur le standard Web Audio Modules (WAM) et inspirée de sequencer.party [3], une plateforme 2D de création musicale collaborative. Techniquement, le système fonctionne comme un graphe de routage dynamique : des modules de synthèse sonore ou d'effets sont chargés via des URI et interconnectés. Les flux de données provenant des capteurs ou des interfaces d'entrée sont alors mappés vers les paramètres exposés par ces modules, permettant une configuration flexible et en temps réel de la chaîne sonore.

Cependant, la multiplication des modalités d'interaction humain-machine (regard, voix, capture de mouvement) rend nécessaire une méthodologie structurée pour concevoir ces mappings. L'enjeu n'est plus seulement technique, mais conceptuel : comment définir l'identité d'un instrument numérique au-delà de sa simple implémentation logicielle ?

Pour répondre à cette question, nous proposons un cadre de caractérisation semi-formel. Après une revue de la littérature sur les stratégies de mapping en section 2, la section 3 détaillera le cur de notre contribution : un modèle décrivant les relations entre entrées utilisateur et paramètres musicaux. Nous y introduirons notamment les notions d'analyse morphologique qui permettent de générer de nouveaux instruments par extension ou transformation. Ce cadre théorique servira ensuite de base à la présentation de plusieurs études de cas dans la section 4, illustrant le passage de la formalisation à l'instrument virtuel opérationnel.

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 dautres cultures privilégient la morphologie ou le mode d'interaction [11, 13].

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.

1. https://wamjamparty.i3s.univ-cotedazur.fr/ et le code source est accessible publiquement : https://github.com/doriangirard9/musical-multiverse-vr afin de permettre la reproduction et lextension de ce travail.

Cette dissociation ouvre un espace de conception élargi, dans lequel les relations gesteson peuvent être définies arbitrairement, ce qui rend nécessaire le développement de méthodes de caractérisation adaptées aux instruments numériques.

2.2. Critères dévaluation des instruments numériques

Bien que les cadres d'évaluation de l'expressivité, tels que ceux proposés par Jordà [11], soient essentiels pour qualifier la qualité d'une interaction musicale, ils restent principalement des outils d'analyse *a posteriori*. Ces critères permettent de juger la profondeur d'un instrument ou sa courbe d'apprentissage, mais ils n'ont pas vocation à offrir un formalisme technique permettant de guider directement la mise en uvre du mapping geste-son.

Il existe ainsi un espace méthodologique entre les principes ergonomiques de haut niveau et l'implémentation logicielle concrète. Notre proposition ne cherche pas à se substituer à ces méthodologies d'évaluation, mais à offrir une couche de description intermédiaire : un cadre de caractérisation capable de traduire des intentions de design en configurations de routage et de transformation de données opérationnelles. Cette approche permet de passer d'un jugement qualitatif sur l'instrument à un outil de spécification pour sa création.

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. [2] 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 [14] propose une approche complémentaire centrée sur les contraintes expressives, lexplorabilité et lautonomie, mettant en évidence le rôle de la conception instrumentale dans la définition de lespace 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 gesteson. 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. [12] montrent que la structure temporelle dune note incluant son attaque, son maintien et son relâchement détermine les possibilités de contrôle expressif dun instrument. Cette analyse met en évidence le rôle central des mappings gesteson 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 dun 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 limportance de la morphologie, du geste, du mapping et des propriétés expressives dans la caractérisation des instruments numériques. Ils proposent des critères dévaluation et des espaces de conception pertinents, mais ne fournissent pas de représentation formelle permettant de structurer systématiquement les relations entre entrées utilisateur, paramètres musicaux et propriétés des mappings.

Lobjectif de cet article est de proposer une telle formalisation, basée sur une analyse morphologique des mappings gesteson. Cette approche vise à fournir un cadre opérationnel permettant à la fois danalyser les instruments existants et de générer de nouvelles configurations instrumentales par exploration systématique de lespace de conception.

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

Les instruments sont décrits selon les paramètres sonores quils permettent de contrôler, la manière dont ces paramètres peuvent être modulés, et les gestes que lutilisateur effectue pour les contrôler. Dans notre application 3D immersive, linteraction se fait uniquement à laide de deux manettes, et le système peut également capter la voix de lutilisateur via un microphone. Cette configuration limite notre analyse, car elle ne prend pas en compte la position individuelle des doigts, le contrôle fin du souffle ou les mouvements des pieds. En revanche, elle permet de prendre en compte la position et la pression des gâchettes des manettes.

Les instruments sont ainsi décrits à laide dun ensemble dassociations entre des entrées utilisateur, les paramètres sonores sur lesquels ces entrées agissent, et les propriétés des relations.

Cette formalisation constitue la base de lespace de conception proposé.

3.1. Caractérisation des entrées utilisateur

Lutilisateur 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 définissons formellement une entrée comme :

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

où :

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

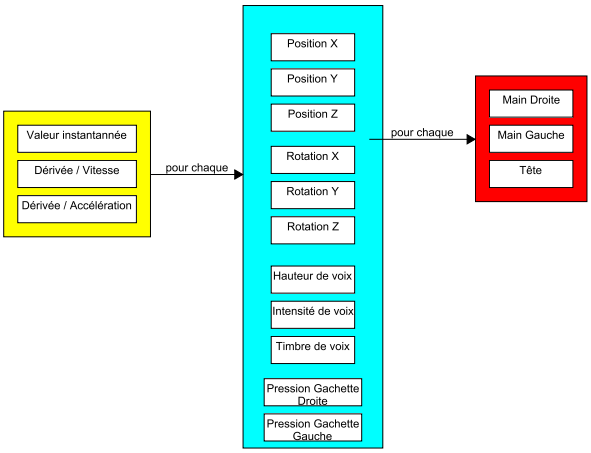

Figure 1. Représentation des différentes entrées utilisateur considérées, incluant les variables gestuelles, vocales et leurs dérivées temporelles.

La Figure 1 illustre lensemble des entrées considérées. Cette représentation permet de caractériser à la fois létat et la dynamique des gestes.

3.2. Caractérisation des paramètres musicaux contrôlés

Les paramètres musicaux correspondent aux propriétés sonores que linstrument permet de contrôler. À léchelle dune note, les caractéristiques fondamentales du son sont la hauteur, lintensité (ou vélocité/amplitude) et le timbre [11]. 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, lintensité et le timbre à travers le geste, ce qui permet des effets tels que le vibrato, le glissando, le trille ou le trémolo [12]. Ces variations résultent généralement dune interaction physique continue avec linstrument et restent liées aux contraintes mécaniques et acoustiques du système.

Dans le cas des instruments numériques, lespace des paramètres musicaux sétend 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 léchelle 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 [14]. Il est donc compliqué d'établir une liste des paramètres musicaux contrôlables par le musicien. En reprenant la dimension ńMusical Controlż proposée par Birnbaum [2], nous distinguons trois niveaux :

— Niveau timbral : regroupe les paramètres élémentaires du son : hauteur, intensité (vélocité, amplitude) et timbre. Ce dernier correspond à un ensemble large de paramètres de traitement, comme lenveloppe, les filtres, le cutoff ou dautres effets.
— Niveau de la note : concerne le contrôle dévénements musicaux individuels : déclenchement et fin de note, ainsi que lévolution des paramètres timbraux au cours de sa durée ou lorganisation en successions de notes (par exemple des gammes).
— Niveau du processus : correspond au contrôle de structures musicales plus globales, telles que la génération darpèges, lenchaînement de phrases ou lorganisation temporelle de séquences.

Les paramètres seront notés :

$$\text{Paramètre} = (\text{Hauteur}|\text{Vélocité}|...)^{(\text{Timbre}|\text{Note}|\text{Processus})} \tag{2}$$

3.3. Relations entre entrées et paramètres : formalisation des mappings

Le mapping décrit comment les entrées de lutilisateur 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) [12]. 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 quune guitare permet un contrôle continu sur certaines plages (donc semi-continue) [11]. 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 [12] (par exemple, un pianiste peut ajuster la vélocité dune note avec la pédale pour l'arrêter).

Nous définissons formellement un mapping comme :

$$(\text{Statique}|\text{Limité}|\text{Libre}) : \{\text{Entrée}_1, \dots\} \xrightarrow{(\text{Discret}|\text{Continu}|\text{Semi-Continu})} \{\text{Paramètre}_1, \dots\} \tag{3}$$

Cette représentation permet de caractériser systématiquement la structure de contrôle dun instrument.

3.4. Critères dévaluation des instruments

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

Intuitivité. Lintuitivité mesure la qualité des correspondances entre geste et son, favorisant compréhension et prévisibilité. La vitesse et la force des mouvements affectent lintensité ou le volume sonore, tandis que la hauteur de la main ou dun objet correspond à la hauteur du son [12]. La taille des objets peut moduler le volume [17]. En pratique, la position de linstrument est mieux adaptée aux contrôles continus, langle aux variations fines de hauteur, et la pression appliquée sur linstrument à la modulation du timbre [15].

Degré de liberté. Le degré de liberté, tel que proposé par Birnbaum et al. [2], correspond au nombre dentrées distinctes exploitées par un instrument. Lutilisation dun plus

grand nombre dentrées augmente ce degré de liberté, ce qui peut accroître lexpressivité de linstrument, mais aussi sa complexité de maîtrise. Un instrument à haut degré de liberté mobilise davantage lattention du musicien, limitant son utilisation simultanée avec dautres contrôles.

Expressivité. Lexpressivité dun 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 lerreur. La tolérance à lerreur correspond à la capacité dun instrument à produire des résultats cohérents malgré des gestes imprécis ou partiellement incorrects. Lutilisation de mappings discrets ou statiques augmente cette tolérance. Un instrument tolérant facilite lexploration et lapprentissage 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 lanticipation et le développement de compétences. Une faible part daléa ou de comportement non déterministe favorise le contrôle et la reproductibilité [12]. 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 [11]. 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 laccessibilité et l'expressivité.

Contrôle musical. Le contrôle musical correspond au niveau auquel le musicien peut agir sur la sortie sonore de linstrument [2]. 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 lutilisateur, englobant les modalités visuelle, auditive, tactile et kinesthésique. Ces critères permettent dinterpréter la position dun instrument dans lespace de conception défini par les mappings.

3.5. Méthodologie danalyse morphologique

Une fois quun ou plusieurs instruments ont été caractérisés selon cette méthodologie, plusieurs approches analytiques peuvent être mises en uvre, sappuyant 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 dun instrument. Elle peut consister, par exemple, à convertir des mappings discrets en mappings continus, ou inversement, afin dévaluer limpact de ces transformations sur lexpressivité et le contrôle musical.

Analyse par combinaison (ou croisement). Cette approche consiste à rassembler lensemble des mappings observés dans un groupe dinstruments et à explorer systématiquement toutes les combinaisons possibles de ces mappings, afin didentifier de nouvelles configurations instrumentales potentiellement exploitables.

Cette approche sinscrit dans la continuité des travaux existants sur les mappings gesteson et les espaces de conception des instruments numériques. En particulier, Hunt et al. [9] ont montré limportance de la structure des mappings dans lexpressivité instrumentale, tandis que Birnbaum et al. [2] et Magnusson [14] ont proposé des espaces de conception permettant de caractériser les dispositifs musicaux interactifs. La formalisation proposée 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 présente l'application du modèle de caractérisation à travers la conception de plusieurs instruments au sein de la plateforme *WAMJam Party*. Plutôt que de chercher une validation statistique, ces études de cas visent à illustrer la capacité générative du modèle par l'implémentation concrète de nouveaux mappings.

4.1. Synthèse des instruments et opérations morphologiques

Pour faciliter la lecture, nous présentons en amont (Table 1) une synthèse des instruments conçus. Chaque instrument illustre une ou plusieurs opérations morphologiques définies en section 3 (extension, transformation, combinaison), permettant de passer d'un instrument traditionnel à une forme numérique augmentée.

Cette organisation permet d'appréhender les instruments non comme des entités isolées, mais comme des points spécifiques dans l'espace de conception ouvert par notre formalisation. Le lecteur pourra ainsi se référer aux sous-sections suivantes pour le détail technique de chaque implémentation, ou choisir d'explorer une opération morphologique particulière.

4.2. Piano : Formalisation d'un instrument de référence

Le piano classique sert ici d'instrument de référence pour illustrer la capacité du modèle à caractériser des mappings traditionnels avant d'envisager des extensions morphologiques. Dans cette configuration, le mapping reproduit la relation discrète entre la position latérale et la hauteur tonale.

Instrument	Entrées exploitées	Paramètres contrôlés	Opération morphologique
Piano virtuel	Position X, gâchette	Hauteur, vélocité	Référence
Piano 3D	Position XYZ	Hauteur	Extension
Batterie modulaire	Position XY, vitesse	Timbre, vélocité	Extension
Harpe virtuelle	Position X, vitesse	Hauteur, vélocité	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 laide de la méthodologie morphologique proposée.

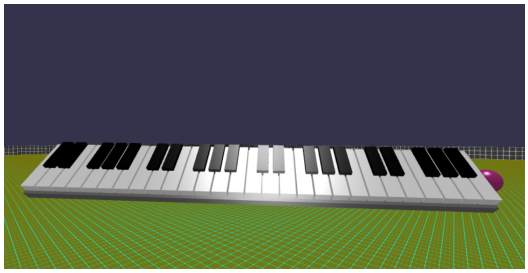

Figure 2. Instrument de type piano 3D implémenté dans WAM Jam Party, utilisant les mappings proposés. Un appui sur la gâchette simule une touche enfoncée.

Pour chaque main, les mappings sont formalisés par l'extraction de la position instantanée (hauteur) et de la vitesse de déplacement (vélocité) :

$$\begin{cases} \text{PosXMain}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Discret}} \text{Hauteur} \\ \text{PosYMain}^{\text{Dérivée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Vélocité} \end{cases} \tag{4}$$

Nous avons implémenté cet instrument dans *WAM Jam Party* (Figure 2) pour vérifier la cohérence du routage des données. La gâchette de la manette simule l'appui mécanique (déclenchement), tandis que la position horizontale de la main définit la note au sein d'une échelle tempérée. Cette implémentation montre que le modèle permet de reconstruire un instrument standard au sein de l'architecture logicielle, posant ainsi une base de comparaison pour les variations présentées ci-après.

pour effectuer un glissando.

4.3. Piano 3D : Opération d'extension multidimensionnelle

Le Piano 3D illustre l'opération d'*extension* appliquée à la morphologie du clavier traditionnel. Tandis que le piano classique (section 4.2) limite l'interaction à un axe horizontal et un déclenchement binaire, cette version immersive utilise la liberté de mouvement offerte par la réalité virtuelle pour enrichir le mapping.

Ici, l'extension consiste à ajouter des variables de contrôle continu issues de la position spatiale de la main ($pos_{x,y,z}$) pour moduler les paramètres internes du timbre en temps réel :

$$\begin{cases} \text{PosXMain}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Discret}} \text{Hauteur} \\ \text{PosZMain}^{\text{Continue}} \xrightarrow{\text{Extension}} \text{Luminosité/Filtre} \\ \text{VitesseApproche}^{\text{Dérivée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Vélocité} \end{cases} \tag{5}$$

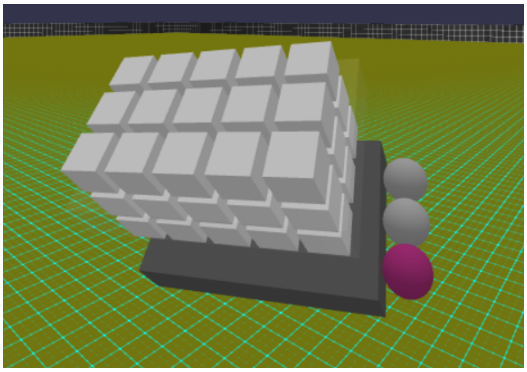

Figure 3. Interface du Piano 3D. L'extension du mapping permet de lier la profondeur de geste à des paramètres de synthèse continue.

Comme illustré en Figure 3, l'utilisateur peut non seulement déclencher des notes, mais aussi "sculpter" le son après l'impact en déplaçant sa main verticalement ou en profondeur. Cette implémentation démontre comment la formalisation en espace de conception permet de transformer un instrument familier en une interface expressive exploitant pleinement les capacités des environnements immersifs.

À noter que cette configuration est implémentée dans lapplication Virtuoso [10], qui propose plusieurs variantes. Dans la version Oorgan, les paramètres 1 et 2 de l'équation 5 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 lOorgan par la gestion du maintien des notes : la hauteur dune note est fixée par la position de la main au moment de lactivation 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'Oorgan.

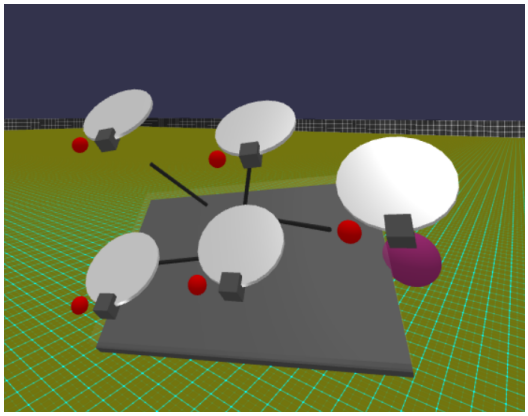

Figure 4. Batterie modulaire dans *WAM Jam Party*. Chaque disque applique un mapping reliant la vitesse d'impact et la position de frappe à des paramètres MIDI.

4.4. Batterie Modulaire : Multiplicité et modulation de surface

L'implémentation de la batterie modulaire illustre comment notre modèle de caractérisation permet de formaliser des instruments composés de multiples entités indépendantes (les disques de percussion). Contrairement à une batterie acoustique où le point d'impact a une influence physique prédéfinie sur le timbre, nous utilisons ici le modèle pour délier et ré-attribuer ces relations.

Chaque unité de percussion de la batterie est formalisée par un double mapping : la vitesse de frappe (dérivée de la position Z) contrôle la vélocité, tandis que la position relative au centre du disque ($PosX, PosY$) est transformée en un paramètre de contrôle continu.

$$\begin{aligned} &\text{Statique : PosZMain}^{\text{Dérivée}} \xrightarrow{\text{Continu}} \text{Vélocité}^{\text{Note}} \\ &\text{Statique : } \{\text{PosXMain}^{\text{Instantanée}}, \text{PosYMain}^{\text{Instantanée}}\} \\ &\qquad \xrightarrow{\text{Continu}} \text{Paramètre}_1 \end{aligned} \tag{6}$$

Dans *WAM Jam Party* (Figure 4), cette batterie est composée de plusieurs disques que l'utilisateur peut disposer librement dans son espace de travail. Chaque disque déclenche une note MIDI spécifique, et la précision du geste (distance au centre) module dynamiquement un paramètre choisi (ex : coupure de filtre ou brillance du timbre). Cette étude de cas démontre que la méthodologie ne se limite pas à des instruments unitaires, mais permet de structurer des configurations complexes par la duplication et la spatialisation de briques élémentaires de mapping.

A noter que des instruments comparables existent dans des environnements VR tels que Virtuoso ou EXA [1, 10], qui utilisent des objets frappables pour déclencher des sons. Autre exemple : Gioiosa et al. proposent Sound Blocks VR [8], un instrument accessible dans lequel des cubes sonores déclenchent des notes lors dun contact avec la main ou un contrôleur VR. Chaque cube peut être configuré (pitch, vélocité, canal MIDI, patch) et déplacé librement. Cette approche privilégie laccessibilité et la tolérance aux gestes imprécis, illustrant lintérêt des instruments dérivés de la batterie pour lexploration musicale.

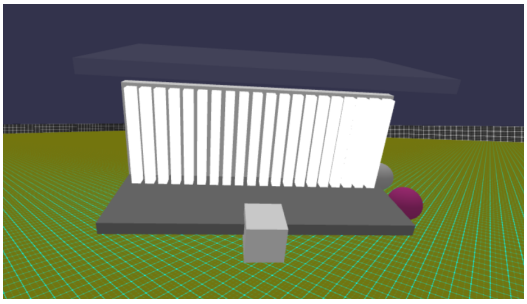

Figure 5. Interface de la harpe 3D dans *WAM Jam Party*. Le mapping transforme la vitesse de traversée du faisceau en intensité sonore.

WAM Jam Party possède également déjà une batterie "incarnée" exploitant le moteur physique Havok [5], avec une approche visant à recréer le plus fidèlement possible une batterie réelle, ce qui n'est pas le cas de la batterie modulaire présentée ici.

4.5. Harpe : De l'interruption binaire à la vélocité dérivée

La harpe illustre une opération de *transformation* des modalités de déclenchement traditionnelles. Dans une harpe laser classique, l'interaction est souvent binaire : le passage de la main coupe un faisceau et déclenche une note à vélocité fixe. Notre modèle permet d'enrichir cette interaction en dérivant la vitesse du geste pour transformer un événement discret en un contrôle dynamique.

Le mapping formalisé pour cet instrument dans *WAM Jam Party* lie la position horizontale à la hauteur et la vitesse de traversée du "fil" virtuel à la vélocité :

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

Cette implémentation (Figure 5) se distingue des approches classiques par l'ajout de ce contrôle de vélocité basé sur la dynamique du mouvement. Alors que dans un piano virtuel le déclenchement est souvent lié à une action de bouton, la harpe utilise la simple traversée d'un seuil spatial. Ce cas d'étude démontre comment la méthodologie permet d'étendre des instruments existants en réintroduisant des nuances physiques (la vitesse du geste) au sein de mappings purement virtuels.

4.6. Contrôleur par le regard : Extension des capacités de contrôle

L'intégration du suivi du regard (*gaze tracking*) illustre l'opération d'*extension* appliquée à une nouvelle modalité d'entrée, généralement inexploitée dans les instruments traditionnels [16].

Plutôt que de concevoir un instrument dédié, nous avons implémenté cette interaction sous la forme d'un composant modulaire indépendant au sein de *WAM Jam Party*.

Cette approche permet d'ajouter un canal de contrôle supplémentaire sans mobiliser les mains du musicien. Le module transforme l'orientation de la tête et l'attention

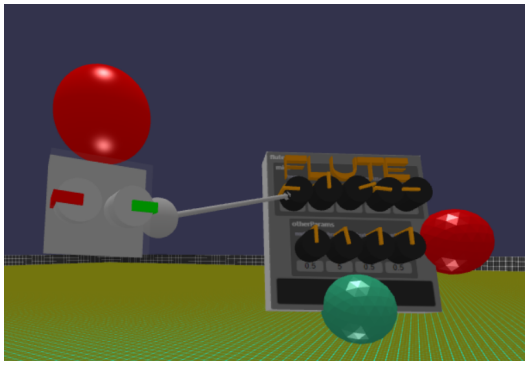

Figure 6. Module de contrôle par le regard dans *WAM Jam Party*. Il agit comme une extension fonctionnelle connectable à n'importe quel paramètre audio.

visuelle en un signal de commande discret (binaire) ou continu, selon l'objet ciblé dans l'espace virtuel :

$$\text{RotationTête}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Extension}} \text{Paramètre}_n \tag{8}$$

Dans l'implémentation actuelle (Figure 6), ce contrôleur peut être connecté dynamiquement à n'importe quel paramètre d'un plugin audio (par exemple, le gel d'une réverbération ou l'activation d'un filtre). Cette étude de cas démontre la puissance de la formalisation proposée : en isolant le mapping "regard $\rightarrow$ paramètre", le modèle permet d'augmenter n'importe quel instrument existant (piano, batterie) par une simple extension de son espace de contrôle.

4.7. Contrôleur vocal : Extension vers une modalité spectrale

L'utilisation de la voix illustre l'opération d'*extension* appliquée à une modalité d'entrée non gestuelle. Dans ce cadre, la voix n'est pas traitée comme une source sonore mais comme un signal de contrôle continu.

Le mapping extrait des caractéristiques physiologiques (hauteur tonale et intensité) pour piloter des paramètres de synthèse. Cette approche permet d'ajouter des couches d'expressivité sans solliciter les mains de l'utilisateur :

$$\begin{aligned} &\text{Libre : HauteurVoix}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_1 \\ &\text{Libre : VolumeVoix}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_2 \end{aligned} \tag{9}$$

Dans de nombreux dispositifs acoustiques, le conduit vocal joue en effet un rôle essentiel dans le contrôle du son, soit par la production directe de matière sonore (chant, vocalisation), soit par la modification de ses caractéristiques spectrales ou de son intensité, notamment par le souffle ou la résonance. À ce titre, la voix peut être considérée comme un instrument à part entière et comme un geste sonore continu dont plusieurs dimensions intensité (volume), hauteur ou timbre peuvent être mobilisées comme entrées de contrôle pour moduler différents paramètres musicaux. La plupart des casques de réalité virtuelle intégrant un microphone, cette modalité dinteraction est particulièrement disponible et pertinente dans un contexte immersif.

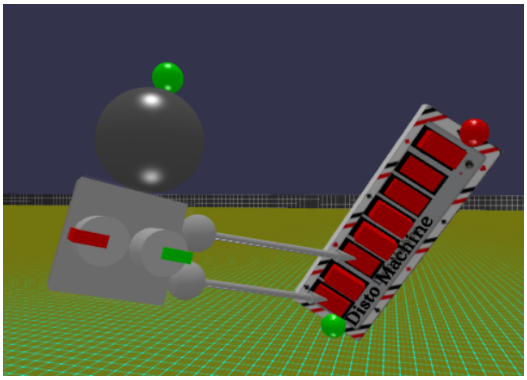

Figure 7. Contrôleur vocal de WAM Jam Party : il module ici le paramètre "Volume" d'un plugin audio selon l'intensité de la voix, et le paramètre "Drive" selon la hauteur de la voix.

Il devient ainsi possible denrichir un instrument existant par lajout de mappings vocaux. Par exemple, avec un piano 3D, lintensité vocale peut contrôler un paramètre global (réverbération, dynamique ou morphing timbral), tandis que le timbre ou la hauteur de la voix pourrait moduler des paramètres de filtrage ou de spatialisation.

Certains dispositifs électroniques reposent déjà sur ce principe. Le Vocoder utilise les caractéristiques spectrales de la voix pour contrôler la synthèse dun signal [7], tandis que la Talk box exploite la cavité buccale comme filtre acoustique appliqué à une source sonore.

Nous avons implémenté ce contrôleur vocal dans WAM Jam Party (Figure 7). Cette implémentation démontre comment la formalisation proposée permet d'intégrer des flux hétérogènes pour augmenter l'espace de contrôle de n'importe quel instrument ou effet audio virtuel de la plateforme.

4.8. Le Cube XYZ : Transformation vers le contrôle continu

Le Cube XYZ constitue un cas d'étude d'*analyse par transformation*. Il s'éloigne des modèles acoustiques traditionnels pour proposer une interface de modulation pure, où le mapping discret (notes) est transformé en un contrôle multidimensionnel continu.

Ici, le modèle définit une relation libre sur les trois axes de position de la main dans l'espace :

$$\begin{aligned} &\text{Libre : PosXMain}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_1 \\ &\text{Libre : PosYMain}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_2 \\ &\text{Libre : PosZMain}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Continue}} \text{Paramètre}_3 \\ &\text{Statique : Gâchette}^{\text{Instantanée}} \xrightarrow{\text{Discret}} \text{Vélocité}^{\text{Note}} \end{aligned} \tag{10}$$

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.

Nous avons implémenté cet instrument dans WAM Jam Party, où il permet de contrôler simultanément trois para-

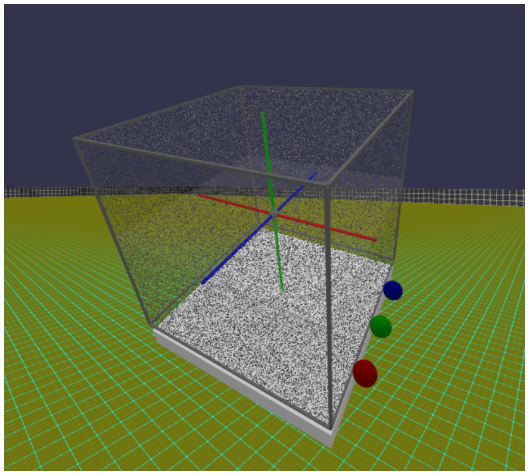

Figure 8. Une cube de contrôle de paramètres dans WAM Jam Party

mètres à laide dune seule main (Figure 8). Cette configuration permet de contrôler simultanément trois paramètres, la gâchette servant au déclenchement des notes.

4.9. Vers de nouveaux paradigmes de séquencement

La méthodologie morphologique proposée permet également dexplorer de nouvelles approches du séquencement musical, en sappuyant sur des représentations spatiales des événements sonores. Par exemple, PathoSonic [6] propose un système dans lequel un fichier sonore est analysé et représenté sous la forme dun 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.

Appliquée au piano 3D, cette approche suggère la possibilité de créer un séquenceur spatial dans lequel les notes seraient déclenchées par le passage dun objet ou dun curseur suivant une trajectoire traversant plusieurs positions dans lespace. Contrairement aux séquenceurs traditionnels, généralement organisés selon une grille bidimensionnelle tempshauteur, 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 méthodologie morphologique 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.

4.10. Perspectives de conception instrumentale

Lanalyse morphologique des instruments met en évidence plusieurs directions encore peu explorées :

- Lutilisation de laccélération 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.
- Lexploitation de la pression sur les gâchettes.
- L'utilisation de la vitesse dans des mappings continus et libres
- Des instruments intervenant à différents niveaux de contrôle musical, du timbre au processus global.

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

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

5. DISCUSSION

Cette étude propose une formalisation morphologique des instruments numériques fondée sur les relations entre entrées utilisateur, paramètres musicaux et propriétés des mappings. L'approche présentée 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 pour cette approche, en raison du grand nombre de degrés de liberté et de modalités dentrée continues quelle offre, rendant nécessaire une structuration explicite de lespace de conception.

Lapplication de cette méthodologie dans *WAM Jam Party* a permis de générer et dimplémenter plusieurs instruments exploitant des dimensions dinteraction peu utilisées, notamment la position tridimensionnelle, la voix et le regard. Cette opérationnalisation démontre la faisabilité technique de lapproche 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 lextension de ces travaux.

Des sessions de tests techniques et des explorations créatives internes ont été menées avec les auteurs et des collaborateurs (chercheurs et musiciens). Ces sessions visaient à éprouver la flexibilité du système en connectant les instruments et contrôleurs de la section 4 au sein de graphes de routage modulaires. Les utilisateurs ont ainsi pu configurer des installations musicales interactives associant, par exemple, le piano 3D ou la batterie modulaire comme générateurs de notes, des instruments virtuels MIDI (synthétiseurs, samplers), le cube XYZ pour la modulation continue (filtres, fréquences d'oscillateurs), des modules de génération de sons continus (ex : oscillateurs) et des modules de spatialisation sonore. Bien que ces tests ne constituent pas une étude utilisateur formelle, la variété des configurations ainsi créées démontre l'opérabilité du cadre de caractérisation : il permet de traduire des structures de mapping théoriques en installations musicales fonctionnelles et interconnectées.

Cette approche présente néanmoins certaines limitations. La formalisation 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, conformément à notre positionnement méthodologique, lévaluation repose ici sur lanalyse et limplémentation technique des instruments ; une étude utilisateur formelle reste nécessaire pour mesurer quantitativement leur expressivité ou leur utilisabilité à long terme.

Par ailleurs, la réalité virtuelle introduit également des contraintes spécifiques. Labsence de retour haptique physique, la charge cognitive associée à limmersion, ainsi que certaines limitations techniques telles que la latence ou la précision du suivi, peuvent influencer lexpérience instrumentale.

Malgré ces limites, ce travail suggère que lanalyse morphologique des mappings constitue un cadre pertinent pour explorer lespace de conception des instruments numériques et générer de nouvelles configurations, en particulier dans des environnements immersifs caractérisés par une grande richesse de modalités dinteraction humain-machine.

6. CONCLUSION

Lanalyse 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. Lusage de méthodes morphologiques extension, transformation et combinaison permet didentifier des zones peu explorées dans lespace de conception et de générer de nouvelles configurations instrumentales, que ce soit à partir dinstruments acoustiques, électroniques ou immersifs.

Cette approche permet également danalyser de manière systématique des instruments existants et dexplorer leurs variantes, mettant en évidence que certains choix de conception sont en partie arbitraires. Elle offre ainsi la possibilité de caractériser des critères d'évaluation spécifiques et de comparer différentes configurations instrumentales sur une base formelle. 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 le cadre ait été opérationnalisé dans WAM Jam Party, la formalisation proposée est indépendante de cette plateforme et peut être appliquée à dautres systèmes dinstruments numériques reposant sur des mappings gesteson.

Cette approche présente néanmoins certaines limites. En particulier, elle repose sur lhypothèse quun 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 lorganisation spatiale, ne sont pas encore explicitement prises en compte, et des instruments différents peuvent apparaître similaires dans cette représentation.

Ces travaux ouvrent plusieurs perspectives. La formalisation pourrait être enrichie afin dintégrer ces dimensions complémentaires et permettre une exploration plus complète de lespace de conception. Des études utilisateurs formelles seront également menées afin dévaluer quantitativement lexpressivité, lutilisabilité et le potentiel musical des instruments proposés.

Dans ce contexte, lanalyse 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. REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le gouvernement français, dans le cadre du plan d'investissement France 2030 géré par l'Agence nationale de la recherche, au titre du projet ń UCA DS4H ż, référence ANR-17-EURE-0004.

8. REFERENCES

[1] Aesthetic Interactive, Z.K. : Exa : The infinite instrument. `https://store.steampowered.com/app/606920/EXA_The_Infinite_Instrument/` (2019)

[2] 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)

[3] 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)

[4] 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)

[5] 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)

[6] 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)

[7] Fasciani, S., Wyse, L. : A voice interface for sound generators : adaptive and automatic mapping of gestures to sound (2012)

[8] 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)

[9] Hunt, A., Wanderley, M.M., Kirk, R. : Towards a model for instrumental mapping in expert musical interaction. In : ICMC (2000)

[10] Interactive, R. : Virtuoso. https://www.meta.com/fr-fr/experiences/virtuoso/4705981139481778 (2022)

[11] Jordà Puig, S. : Instruments and players some thoughts on digital lutherie (2004)

[12] 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)

[13] López-Huertas Pérez, M.J., et al. : Transcultural categorization in contextualized domains (2013)

[14] 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)

[15] 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)

[16] Santini, G. : Xr etudes for augmented piano. In : Proceedings of the sound and music computing conferences. vol. 2023, pp. 84–88 (2023)

[17] 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)