

QUELS INSTRUMENTS POUR UN ORCHESTRE PÉDAGOGIQUE ÉLECTROACOUSTIQUE ?

Gaël Navard

Université Côte d'Azur
Conservatoire de Nice

Gael.Navard@
univ-cotedazur.fr

Alain Pegatoquet

Université Côte d'Azur
LEAT UMR CNRS 7248

Alain.Pegatoquet@
univ-cotedazur.fr

Jean-François Trubert

Université Côte d'Azur
CTEL EA 6307

Jean-Francois.Trubert@
univ-cotedazur.fr

RÉSUMÉ

Depuis 2017, l'Université Côte d'Azur mène un programme structurant visant à développer un écosystème de recherche, création artistique et développement informatique autour des nouvelles lutheries numériques. L'un des objectifs est d'implémenter de façon pérenne des orchestres électroacoustiques pédagogiques à bas coût au sein des établissements scolaires, susceptibles d'initier les jeunes générations au maniement des nouvelles lutheries numériques et à la musique électroacoustique par la pratique.

Ce texte décrit la première phase d'expérimentation sur le terrain, consistant dans un premier temps à l'évaluation des solutions existantes envisageables au niveau technologique. De nombreux dispositifs ont été testés, dont des interfaces utilisant les protocoles MIDI – prévu pour la musique – et HID – plutôt prévu pour les jeux vidéo. Des solutions utilisant des smartphones et des tablettes numériques ont aussi été mises en pratique dans plusieurs établissements scolaires des Alpes-Maritimes, et de nombreux biais nous sont apparus lors de ces tests en situation.

Cela nous a conduit à la nécessité de développer des instruments pédagogiques dédiés, dont deux prototypes sont ici présentés : un prototype d'instrument d'orchestre numérique minimal – le *MEStick* – et un prototype d'instrument tactile multitouche inspiré des interfaces MIDI MPE.

1. INTRODUCTION

Depuis une cinquantaine d'années, des recherches artistiques et des développements technologiques sont menés pour permettre une pratique collective électroacoustique à destination pédagogique. L'enjeu est de sensibiliser le plus grand nombre, et notamment les plus jeunes, aux nouveaux univers musicaux électroacoustiques, par la manipulation sonore en temps réel et la réalisation de performances collectives.

1.1. Les recherches des centres de création musicale

À la suite du GRM¹, la France se dote dans la seconde moitié du XX^e siècle de nombreux groupes de recherche artistique dans le domaine de la création musicale électroacoustique. Ces groupes, généralement organisés autour d'un studio de composition, expérimentent des méthodes et développent des outils pour diffuser ces musiques au public. La pratique collective électroacoustique à destination du jeune public apparaît alors comme une piste intéressante.

Dans un rapport publié en 2001 pour le Ministère de la Culture [21], Anne Veitl dresse un panorama très large de ces expérimentations françaises depuis le Gmebo-gosse – créé en 1973 par le GMEB² – ou le synthétiseur modulaire partagé Méli-son – créé en 1982 par le GMEA³ –, jusqu'aux outils numériques à base de capteurs de mouvements – les percussions virtuelles de Laurent Pottier au GMEM⁴ en 1998 – ou de contrôleurs issus du domaine des jeux vidéo – le Méta-Instrument et le dispositif OMAO (Orchestre de Musique Assistée par Ordinateur, composé de six musiciens avec des joysticks) de Serge de Laubier et Rémi Dury (PUCE MUSE⁵, 2000).

Ces recherches préfigurent des dispositifs toujours utilisés aujourd'hui comme la Méta-Malette⁶ (PUCE MUSE, 2003), le Light Wall System⁷ – issu d'un dispositif de captation des mouvements, proche de celui de Laurent Pottier, développé par Christophe Lebreton et Jean Geoffroy au GRAME⁸ à partir de 2004⁹, puis de manière autonome avec l'association LisiloG – ou les SmartFaust (GRAME, 2014) utilisant les capteurs embarqués des smartphones [15].

¹ Groupe de Recherche Musicale, créé par Pierre Schaeffer en 1958.

² Groupe de Musique Électroacoustique de Bourges.

³ Groupe de Musique Électroacoustique d'Albi.

⁴ Groupe de Musique Électroacoustique de Marseille.

⁵ Centre de création de Musique Visuelle à Wissous.

⁶ Voir www.meta-librairie.com/fr, accédé le 12/10/2020.

⁷ Voir www.grame.fr/articles/light-wall-system-5d839d006dc5a, accédé le 12/10/2020.

⁸ Générateur de Ressources et d'Activités Musicales Exploratoires, Centre National de Création Musicale de Lyon.

⁹ À l'origine pour la composition *Light Music* de Thierry de Mey.

1.2. Les recherches universitaires

Au début du XXI^e siècle naissent dans les universités américaines des ensembles orchestraux numériques avec des effectifs importants. Le Plork [20] (*Princeton Laptop Orchestra*), fondé en 2005 par Daniel Trueman est le premier orchestre de ce type. Il se compose de quinze postes informatiques ayant chacun un contrôleur – généralement issu de l'industrie des jeux vidéo – et d'une enceinte de diffusion omnidirectionnelle. Il va servir de modèle au développement de nombreux autres orchestres d'ordinateurs à travers le monde.

Nous avons pu recenser près d'une cinquantaine d'initiatives de ce type – parfois éphémères –, dont le Slork (*Stanford Laptop Orchestra*) qui se compose de vingt postes, fondé par Ge Wang en 2008 [24] et le L2Ork (*Linux Laptop Orchestra* de Virginia Tech) [2] fondé par Ivo Bukvic en 2009, qui sont toujours très actifs.

Des orchestres comme le Plork ou le Slork sont cependant très onéreux. Ils nécessitent en effet un nombre important d'ordinateurs – Mac et PC – et d'enceintes omnidirectionnelles comportant de nombreux haut-parleurs. Cela rend la perspective d'avoir des effectifs comparables à un petit orchestre classique inabordable pour la plupart des institutions.

En 2007, Worldscape Laptop Orchestra [6] de l'Université d'York propose un concert comportant cinquante postes informatiques. Mais cela au sacrifice des interfaces fines de détection des gestes et de la diffusion sonore localisée – l'ensemble étant diffusé sur un nombre très réduit de haut-parleurs.

En choisissant une solution entièrement *open source* basée sur un système d'exploitation Linux, le L2Ork place de son côté la question de la réduction du coût d'un poste au centre de sa recherche, en se fixant un objectif de moins de 800 \$ par poste. En 2014, le L2Ork adopte les ordinateurs monocarte Raspberry Pi¹⁰, ce qui réduit encore drastiquement le budget – comme nous le verrons dans le choix que nous avons effectué sur ce point.

Enfin, dès 2007, l'Université de Stanford s'équipe de douze téléphones Nokia pour créer le MoPho (*Mobile Phone Orchestra*) [22] qui ouvrira la voie à de nombreux orchestres de smartphones avec la sortie de l'iPhone la même année.

1.3. Le projet MPEi de l'Université Côte d'Azur

En 2017, plusieurs institutions et laboratoires membres de l'Université Côte d'Azur¹¹ s'associent pour lancer le projet MPEi¹² avec un double objectif : explo-

rer les possibilités instrumentales des nouvelles interfaces musicales expressives utilisant le protocole MIDI¹³ MPE¹⁴ – aspect qui ne sera pas abordé dans ce texte – et développer un dispositif orchestral électroacoustique à vocation pédagogique – ce dont il est ici question.

Les différentes recherches que nous avons exposées en introduction, associées à la réduction des coûts du matériel informatique, nous conduisent à fixer un objectif ambitieux de moins de 100 € par poste. Ce coût nous permet d'effectuer des interventions dans les établissements scolaires en classe entière – environ trente postes –, voire dans un futur proche de travailler avec plusieurs classes en parallèle pour créer des orchestres d'une envergure approchant l'orchestre classique – les postes devant donc pouvoir s'additionner sans limitation.

Le coût par poste n'est cependant pas la seule contrainte du cahier des charges que nous avons établi au début du projet. Les instruments doivent ainsi :

- permettre un jeu expressif, dans le sens donné par les nouvelles interfaces MPE, c'est-à-dire un jeu fin sur plusieurs paramètres continus – par opposition avec de simples boutons de déclenchement –, si possible à haute résolution ;
- permettre d'effectuer les trois types de gestes instrumentaux définis par Claude Cadoz [3] : les gestes d'excitation, de sélection et de modification, si possible avec une utilisation coordonnée des deux mains ;
- être simples à jouer et rapides à installer dans une salle de classe ;
- être robustes et durables ;
- être faciles à transporter – un orchestre complet devant tenir dans une voiture de taille moyenne ;
- être reproductibles, afin de créer de nouveaux orchestres capables de partager un même répertoire.

Pour réaliser ces objectifs, nous avons tout d'abord procédé à des tests en situation pédagogique réelle de différents outils utilisés et développés par les centres de création et les universités, évoqués dans cette introduction. Nous avons également procédé au développement de nouveaux dispositifs, eux aussi testés sur le terrain au fur et à mesure de l'avancée des recherches.

Le projet a donné lieu à huit interventions pédagogiques avec des élèves de collège et des étudiants du conservatoire et de l'université. Il y a eu cinq stagiaires de différentes disciplines – IUT électronique¹⁵, 5^e année d'ingénieur¹⁶, Master Arts pédagogie, composition et performance musicales¹⁷ –, deux mémoires de master¹⁸ en musicologie et en composition – toujours en cours –,

Orchestras – Theoretical, Practical Studies and Developments on a New Class of Musical Instruments. Ce travail a bénéficié d'une aide du gouvernement français, gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du projet Investissements d'Avenir UCA^{EDD} portant la référence n° ANR-15-IDEX-01.

¹³ *Musical Interface for Digital Instruments* (Interface Musicale pour Instruments Numériques).

¹⁴ *Multidimensional Polyphonic Expression* (Expression Polyphonique Multidimensionnelle).

¹⁵ Thomas Louis et Corentin Andrieux.

¹⁶ Zhuoer Li.

¹⁷ Alessy Casabianca et Yohan Brimicombe.

¹⁸ Virginie Kracht et Gino Mariotti.

¹⁰ La Fondation Raspberry Pi lance en 2012 un ensemble d'ordinateurs monocarte à très bas coût pour la pédagogie du numérique.

¹¹ Le Conservatoire de Nice, le LEAT (Laboratoire d'Électronique, Antennes et Télécommunications), le CTEL (Centre Transdisciplinaire d'Épistémologie de la Littérature et des Arts Vivants), le CIRM (Centre National de Création Musicale) et l'école PolyTechNice.

¹² *Multidimensional Polyphonic Expression (MPE) Digital Music Interfaces : From High-End Soloist Ensembles to Large Pedagogical*

le recrutement d'un ingénieur¹⁹ et trois commandes effectuées à des compositeurs par le CIRM²⁰ et la MJC Picaud²¹ dans le cadre du programme « Fabriques à Musiques Contemporaines » de la SACEM²².

Ce texte n'abordera pas les questions ayant trait au contenu gestuel, musical et pédagogique, ni n'entrera en profondeur dans les problématiques liées à l'ergonomie des interfaces et au choix des résonateurs acoustiques – points qui seront traités dans des publications ultérieures –, pour se focaliser sur les aspects technologiques et pratiques adéquats pour un dispositif instrumental numérique permettant la réalisation d'un orchestre électroacoustique pédagogique. Cette présentation suit globalement l'ordre chronologique de nos expérimentations.

2. LES INTERFACES MIDI

La première solution évaluée fut l'utilisation de contrôleurs MIDI existants. Il est désormais possible d'en trouver à un peu moins de 50 € – AKAI LPD8²³ et Korg NanoPAD²⁴. C'est la limite haute du budget que nous nous étions fixés pour un poste, sachant qu'il faut y rajouter le moteur audio et le résonateur acoustique. Mais cela pourrait potentiellement être envisageable. Malheureusement, plusieurs problèmes importants se posent avec ces interfaces.

Tout d'abord, la présence de boutons de configuration que l'on ne peut pas désactiver complexifie la mise en place dans les établissements scolaires. Lors de nos tests avec des interfaces MIDI comportant des boutons de configuration, il est régulièrement arrivé que des élèves les touchent, modifient les réglages, ce qui ralentit considérablement les séances de travail, déjà peu nombreuses. Idéalement, un instrument d'orchestre pédagogique ne doit pas pouvoir être facilement « désaccordable ».

Ensuite, au niveau gestuel, l'expressivité est assez faible. L'utilisation de potentiomètres rotatifs – par exemple sur l'AKAI LPD8 – n'est pas idéale au niveau instrumental. C'est un problème que l'on retrouve aussi lors de l'utilisation en concert des synthétiseurs modulaires. Le pavé tactile X-Y du Korg NanoPad est plus intéressant car il permet potentiellement une utilisation à deux mains, avec le pavé tactile dans une main et les pads pour l'autre. Malheureusement, la gestuelle manque beaucoup d'amplitude à cause de la très petite taille de l'interface. Il est probablement possible de l'utiliser, mais nous avons préféré nous tourner vers des solutions plus convaincantes.

3. LES INTERFACES HID

Nous avons pu entrevoir dans l'introduction que les contrôleurs prévus pour les jeux vidéo sont détournés dès la fin des années 1990 pour produire de la musique. Ces interfaces, utilisant le protocole HID²⁵, sont en effet une alternative très intéressante aux contrôleurs MIDI, notamment car leur production de masse permet de maintenir des coûts très bas et une grande disponibilité. Le protocole HID a aussi une résolution sensiblement meilleure que le protocole MIDI standard.

En revanche, l'ergonomie n'est en général pas pensée pour jouer de la musique. De plus, le protocole HID a un inconvénient majeur lorsque l'on branche plusieurs périphériques sur le même ordinateur : il n'est pas possible de prévoir l'identifiant qui sera donné à chacun des périphériques. Il est par conséquent nécessaire à chaque démarrage d'identifier individuellement les périphériques, ce qui est très fastidieux dans le cas d'un nombre important d'instruments d'orchestre pédagogique.

3.1. Les joysticks

Les joysticks sont les premières interfaces HID à avoir été utilisées durablement pour la pratique musicale collective numérique. C'est notamment le cas de la Méta-Malette, souvent qualifiée d'« orchestre de Joysticks » – même si d'autres interfaces sont aussi utilisées. Initialement conçus pour les simulateurs de vols, ils permettent des gestes continus dans deux dimensions, accompagnés d'un ensemble de boutons et parfois de contrôleurs continus supplémentaires.

Il en existe de différents types, mais, en prenant garde de ne pas utiliser de fonctions trop spécifiques, il est possible d'adapter une composition sur différents modèles, ce qui en fait un instrument a priori durable. Une composition écrite pour joystick il y a vingt ans est encore potentiellement jouable, et le sera probablement encore longtemps – si le moteur audio est maintenu –, ce qui est un avantage important.

Le coût d'un joystick est très variable. Mais il est possible d'en trouver en entrée de gamme aux alentours des 20 €, ce qui correspond bien au budget visé. Des joysticks de bonne qualité sont cependant hors de ce budget.

En revanche, le design, assez éloigné d'un instrument de musique traditionnel, ne plonge pas d'emblée le musicien dans un imaginaire musical, mais plutôt dans celui d'un pilote... Cela ne déplairait cependant pas à Henri Pousseur et sa vision du futur de la musique électronique formulée en 1971 : « Il y a longtemps que je rêvais de jouer de la musique comme on conduit une voiture automobile. À la condition de construire les dispositifs simples, pédales, etc., mettant sous les mains et les pieds d'une seule personne un ensemble important de réglages [...]. Ce qui me plaît personnellement beaucoup, c'est que cela va soudain sortir la pratique musicale la plus sophistiquée des tours d'ivoire du professionnalisme à outrance. Bien sûr, tous les degrés de virtuosi-

¹⁹ Andy Rochette.

²⁰ Bertrand Petit Heidelein et Gaël Navard.

²¹ Florian Gourio.

²² Société des Auteurs, Compositeurs et Éditeurs de Musique.

²³ Voir <https://www.akaiipro.com/lpd8-lpd8>, accédé le 12/10/2020.

²⁴ Voir www.korg.com/fr/products/computergear/nanopad2/, accédé le 12/10/2020.

²⁵ *Human Interface Devices*.

té sur les nouveaux dispositifs pourront être acquis ; [...] du moins sera-t-il possible à l'amateur, même peu initié, et même avec des équipements simples et relativement peu coûteux, de produire [...] des structures sonores et musicales d'un grand intérêt, tant pour l'esprit que pour l'oreille. » [4]

3.2. Le Gametrak

Le Gametrak – commercialisé en 2004 – est une alternative très intéressante au joystick traditionnel. Il s'agit d'un contrôleur permettant de capter des mouvements en trois dimensions pour chacune des mains et d'une pédale de type *sustain* (on/off). Il est constitué de deux mini-joysticks avec deux câbles fixés dessus et rembobinables, attachés aux mains par des gants. N'ayant pas rencontré un grand succès, notamment en Europe, il n'a pas, contrairement au joystick, de connotation particulièrement liée aux domaines du jeu vidéo ou de la conduite. En revanche, la production est arrêtée. Il est toujours possible de le trouver sur le marché de l'occasion pour un prix inférieur à 20 €, mais cela est clairement un frein pour l'utilisation de cette interface dans le futur. Le Gametrak a été très utilisé par les premiers orchestres numériques américain – notamment le Slork. Il existe donc un répertoire, et même une notation musicale associée [7]. Il a aussi parfois été modifié pour servir de base à de nouveaux instruments numériques [5].

C'est une interface très pertinente pour la constitution d'orchestres numériques. Elle souffre néanmoins, outre l'arrêt de sa production, de deux problèmes que nous avons rencontrés lors de nos tests. Ces derniers ont notamment été réalisés conjointement avec le projet de recherche artistique MICAdôme²⁶ afin de jouer collectivement sur la spatialisation musicale en 3D. Tout d'abord, l'interface étant posée au sol, l'amplitude des gestes est très importante, et elle nécessite beaucoup de place. Dans le cas d'une classe entière de collégiens, cela paraît difficilement envisageable dans une salle de cours de taille normale. Il est possible de la poser sur les genoux pour diminuer l'amplitude, mais ce n'est pas très pratique et potentiellement dangereux pour la durabilité de l'interface qui peut facilement chuter. Enfin, les réglages changent beaucoup en fonction de la taille des élèves, ce qui augmente le temps de mise en place au début d'une séance.

3.3. Wiimotes

Si le Gametrak est le premier contrôleur grand public permettant de capter efficacement des gestes en 3D, l'arrivée des wiimotes en 2006 marque un tournant pour la captation des gestes dans la sphère ludique, très rapi-

dement mis à profit pour la musique [10]. C'est notamment l'un des contrôleurs les plus utilisés par le L2Ork.

Techniquement, il s'agit de deux manettes interconnectées qui communiquent à la console via une liaison sans fil Bluetooth. La manette principale comporte un accéléromètre à trois axes (*Analog Devices ADXL330*) et plusieurs boutons. La manette secondaire (le *Nunchuk*), comporte un accéléromètre à trois axes (*STMicroelectronics LIS3L02AL*), un mini joystick (*thumbstick*) et deux boutons. Les accéléromètres permettent des résultats musicaux très efficaces, et ces contrôleurs ont connu un grand succès pour les performances musicales dans lesquelles ils sont encore utilisés aujourd'hui.

En revanche, la liaison sans fil en Bluetooth, si elle paraît a priori très intéressante pour limiter les câbles dans un orchestre électroacoustique, s'avère plutôt fastidieuse pour appairer individuellement un grand nombre de postes. Cela dit, le Nunchuk peut aisément se modifier pour y adapter une connexion filaire, car il utilise le protocole I2C²⁷ que l'on retrouve sur les cartes Arduino ou Raspberry Pi.

Il est toujours possible d'en trouver pour un prix avoisinant les 100 € pour les deux manettes et la station de charge. Cela est donc au-dessus du budget fixé, mais les manettes Nunchuk seules coûtent environ 20 € pièce, et il est possible de trouver des produits de substitution avec des technologies similaires à moins de 5 €. Nous pourrions donc penser qu'il s'agit là d'une solution économique et efficace pour équiper un orchestre électroacoustique. Malheureusement, la présence sur le marché de ces nombreuses copies bas de gamme pose un vrai problème. Il est en effet très difficile d'apprécier la qualité des composants sans démonter le Nunchuk, et ces derniers sont souvent des accéléromètres très mauvais qui fonctionnent par palier et non de manière continue.

L'arrêt depuis 2016 de la production de la dernière console utilisant ces manettes – la Wii U – mettant en péril leur pérennité, nous avons donc finalement écarté ces capteurs gestuels, malgré toutes leurs qualités intrinsèques.

4. LES SMARTPHONES ET TABLETTES

Dans tous les cas précédents, il est nécessaire d'adjoindre à l'interface de captation gestuelle un moteur audio – ordinateur ou carte DSP²⁸ dédiée – et un résonateur – haut-parleur – pour avoir un instrument complet et autonome.

Lors de l'arrivée sur le marché des smartphones – et notamment l'iPhone en 2007 –, c'est donc assez logiquement que les concepteurs d'orchestres numériques se sont intéressés de près à ces terminaux informatiques « tout-en-un » comportant à la fois des capteurs gestuels, un moteur audio, un microphone et un haut-parleur – le tout prenant une place très réduite et pouvant être manipulé facilement.

Au niveau du coût, un smartphone est onéreux. Mais, si l'on considère que les futurs musiciens en sont déjà

²⁶ Musique Immersive Côte d'Azur. Projet de recherche autour d'un dôme de spatialisation sonore de 26 haut-parleurs coordonné par Michel Pascal au Conservatoire de Nice (2018-2020). Projet subventionné par l'IDEX ANR-15-IDEX-01. Expérimentations de Sarah Procissis.

²⁷ Bus informatique *Inter-Integrated Circuit*.

²⁸ *Digital Signal Processing* (traitement numérique du signal).

équipés, ce coût devient nul, ce qui est évidemment imbattable.

De nombreuses possibilités existent pour récupérer les données des capteurs intégrés aux smartphones et les aiguiller vers des générateurs sonores. Pour une utilisation en composition électroacoustique, deux solutions nous ont semblé particulièrement pertinentes : les Smartfaust, basés sur le langage Faust [17] développés par le GRAME, et Mobmuplat [8], basé sur LibPD [1] qui est un portage sous forme de librairie intégrable du logiciel *Pure Data* [19] développé par Miller Puckette à l'Université de Californie de San Diego depuis 1996.

Ces deux environnements offrent une grande souplesse de programmation, tout en restant accessibles pour des compositeurs et des réalisateurs en informatique musicale. Ils ont aussi l'avantage de fonctionner sur la majorité des systèmes d'exploitation mobiles – iOS et Android – et d'être *open source*.

4.1.1. Smartfaust

Le premier environnement que nous avons testé, notamment dans le cadre de la recherche de Master de Virginie Kracht [11], est l'implémentation du langage Faust dans les smartphones. Faust permet de délivrer du code DSP très optimisé au niveau des ressources, et de nombreux outils facilitent la programmation pour smartphone, comme le Faust Playground²⁹ – interface web graphique permettant d'importer les applications en scannant un code QR – ou le Smart Keyboard [14] qui simplifie la création d'interfaces tactiles 2D sur l'écran.

Ces outils sont efficaces, et le rendu sonore des algorithmes est très convaincant, même s'il subsiste quelques erreurs gênantes lors de la phase de compilation. Nous avons malheureusement rencontré un problème important dû aux limitations qu'Apple impose aux développeurs pour iOS. Outre le fait qu'il soit nécessaire d'avoir une licence payante, charger une application sur un smartphone nécessite de passer par l'Apple Store après une longue procédure de vérification. Il faut donc tout avoir programmé et chargé très en amont des séances d'orchestre pédagogique. Il est de plus impossible d'effectuer une modification d'une séance à une autre.

Les applications Smartfaust que nous avons programmé n'ont ainsi pu être utilisées qu'avec des smartphones Android où ces limitations n'existent pas. Cela nous a semblé peu viable dans le contexte d'un orchestre pédagogique, car cela écartait un grand nombre de terminaux.

En dépit de la qualité de l'environnement de programmation Faust, nous nous sommes donc tournés vers *MobMuPlat* qui est une application permettant de charger des patches *Pure Data* sur iOS et Android.

4.1.2. Mobmuplat et Pure Data

L'environnement de programmation graphique *Pure Data* est moins optimisé que Faust au niveau des ressources, mais il est développé depuis longtemps, est stable et bénéficie d'une grande communauté d'utilisateurs. L'application *MobMuPlat* permet d'y rajouter une interface graphique utilisateur et d'accéder à l'ensemble des capteurs du smartphone. Cela fonctionne bien et nous a donc permis d'expérimenter des orchestres de smartphones en collège.

4.2. Problèmes rencontrés

De nombreux problèmes ont été rencontrés lors de ces expérimentations. Le premier, immédiatement audible, est la piètre qualité et le manque de puissance sonore des haut-parleurs intégrés. Cela n'est guère étonnant vu leur taille, mais enlève une grande partie de l'intérêt de l'utilisation d'un smartphone dans un d'orchestre pédagogique. Par exemple, dans la composition *Électrons* de Yohan Brimicombe (figure 1), nous avons tout d'abord rajouté de nombreux microphones. L'installation du dispositif en classe est tout de suite devenue beaucoup plus fastidieuse.



Figure 1. Création de la composition *Électrons* de Yohan Brimicombe au Conservatoire de Nice avec les élèves du Collège Matisse dirigés par leur professeure Hélène Gasperini, 2018.

Mais les microphones ne réglait qu'une partie du problème lié au manque de volume. La bande passante est en effet beaucoup trop réduite pour avoir un résultat correct. Nous avons alors dédié une tablette – connectée avec un câble – à la sonorisation et au déclenchement de sons fixés avec toute l'étendue du spectre audio, afin de pallier les manques du reste de l'orchestre. Mais cette solution reste assez peu satisfaisante.

Dans le *MoPho*, Ge Wang avait proposé la solution d'adjoindre des petits haut-parleurs amplifiés fixés sur les mains ou le corps des musiciens [22]. Cela implique cependant que l'ensemble des smartphones aient une prise casque – les liaisons Bluetooth ayant actuellement trop de latence pour être décemment utilisables –, ce qui n'est plus toujours le cas aujourd'hui. Il faut aussi que cette prise casque soit de bonne qualité pour éviter des craquements lors de la manipulation – les prises n'étant pas forcément prévues pour subir le stress d'une gestuelle musicale intensive.

²⁹ Voir faust.grame.fr/faustplayground/, accédé le 12/10/2020.

La gestuelle est aussi un point problématique, car elle ne mobilise qu'une seule main, et rend difficile la gestion des différents types de geste instrumentaux que nous recherchons. Une solution consiste à utiliser le microphone comme capteur de souffle, par exemple dans l'Ocarina [23] de Ge Wang. Une autre consiste à utiliser deux smartphones, par exemple dans le Smart Hand Computer³⁰ où ils sont reliés à des émetteurs audio UHF³¹. Il est aussi possible de réaliser des smartphones augmentés en rajoutant des accessoires imprimés en 3D comme des résonateurs ou des capteurs de pression, ce que l'on peut trouver dans les projets de Romain Michon [13].

Mais de notre côté, après avoir aussi testé sans trop de succès l'utilisation de l'entrée microphone pour ajouter des capteurs analogiques supplémentaires³², nous nous sommes tournés vers une solution beaucoup plus simple : adjoindre au smartphone une perche à selfie pour créer un manche capable de contrôler l'accéléromètre avec une main, tandis que la deuxième main joue sur l'écran tactile (figure 2). Cela a donné des résultats intéressants, rapprochant le smartphone de l'ergonomie d'un instrument de musique traditionnel, même si le calibrage de l'accéléromètre, prévu normalement pour détecter les inclinaisons à partir d'un smartphone à plat, est devenu un peu plus complexe à configurer convenablement.

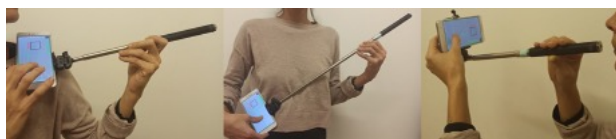


Figure 2. Des smartphones augmentés simplement avec des perches à selfie (positions violon, guitare et trompette).

Une autre difficulté de l'utilisation des smartphones pour un orchestre électroacoustique pédagogique est la grande diversité des modèles disponibles sur le marché. Par exemple, si les accéléromètres se retrouvent sur tous les smartphones, ce n'est pas le cas des gyroscopes qui ne sont présents que sur certains d'entre eux. Nous avons donc dû écarter ces capteurs de nos applications.

Plus problématique encore : dans chaque classe où nous avons utilisé les smartphones des élèves, il y en avait toujours un pourcentage non négligeable sur lesquels les applications étaient instables, quel que soit l'environnement de programmation utilisé.

Mais surtout, il était assez compliqué d'amener les élèves à percevoir cet outil, qu'ils utilisent en permanence, comme un véritable instrument de musique, sans qu'ils ne consultent leurs messageries au lieu de jouer de la musique. L'objet smartphone en soi est donc déjà très problématique. Et cela d'autant plus qu'il est désormais interdit dans les établissements scolaires depuis la rentrée 2018, avec pour objectif de « sensibiliser les élèves à l'utilisation raisonnée des outils numériques et

[de] leur faire pleinement bénéficier de la richesse de la vie collective »³³.

4.3. Skini

Les établissements scolaires étant souvent équipés de tablettes, nous avons aussi cherché à voir si l'on pouvait les utiliser pour un orchestre électroacoustique. Les tablettes étant trop volumineuses pour tenir dans une main, elles sont encore moins adaptées que les smartphones pour une utilisation instrumentale et l'accéléromètre est très peu maniable. Il reste cependant l'interface tactile. Mais si cette dernière a une latence correcte sur les machines iOS et certaines machines Android haut de gamme, cette latence devient vite très gênante – plusieurs centaines de millisecondes – pour jouer sérieusement de la musique sur la plupart des tablettes bon marché.

Nous avons donc testé une autre manière de penser l'orchestre électroacoustique avec la plateforme Skini [18] développée par Bertrand Petit Heidelein au CIRM et à l'INRIA. Dans ce dispositif, les tablettes contrôlent en ligne via Wi-Fi une sorte de séquenceur partagé qui tourne sur un ordinateur central. Les élèves peuvent utiliser un casque pour composer et sélectionner des séquences musicales qu'ils proposent ensuite à l'ordinateur central, qui restitue le résultat sonore sur une paire de haut-parleurs.

En matière d'efficacité de mise en place dans un contexte pédagogique, cela fonctionne très bien. Pour un établissement scolaire déjà équipé de tablettes et de casques, il n'y a pas de surcoût. Il n'y a pas de logiciels à installer car tout se fait via une interface web. Le rendu sonore est de bonne qualité car il utilise une vraie sonorisation.

En revanche, aucun geste instrumental n'est réalisé en temps réel par les élèves. Ces derniers se trouvent plutôt dans le rôle du compositeur que celui de l'interprète, recherché pour notre orchestre électroacoustique.

5. DÉVELOPMENTS EN COURS

Nous avons donc pu constater qu'il n'existe aujourd'hui dans le commerce aucun instrument musical numérique adapté à la pédagogie orchestrale. À noter cependant un contrôleur en cours de production qui nous semble intéressant dans cette optique : l'Artinoise Re.corder³⁴ qui est annoncé à 50 € l'unité en pack pédagogique. Il s'agit d'une flûte à bec MIDI avec un capteur de souffle, des capteurs pour les trous et un accéléromètre. Il ne nous a malheureusement pas encore été possible de le tester.

Nous avons donc entrepris de développer nos propres prototypes d'instruments d'orchestre électroacoustique pédagogique.

³⁰ Voir www.lisilog.com/shc/, accédé le 12/10/2020.

³¹ Ultra Hautes Fréquences.

³² Voir à ce sujet le mémoire de master de Virginie Kracht [11].

³³ Voir www.education.gouv.fr/cid133479/interdiction-telephone-portable-dans-les-ecoles-les-colleges.html, accédé le 12/10/2020.

³⁴ Voir www.artinoise.com/, accédé le 12/10/2020.

5.1. Moteur audio

Une première question, qui impacte grandement le coût du prototype, est le choix du moteur audio de l'instrument. Il s'agit en effet d'arriver à des instruments complets et autonomes, et non de simples interfaces de captation gestuelle. L'utilisation d'un ordinateur Apple ou Windows a été d'emblée écartée car elle ne permet pas d'atteindre l'objectif de moins de 100 € par poste, même en branchant de nombreux contrôleurs sur un seul ordinateur.

Suite au développement des smartphones et des SoC ARM³⁵ qui en équipent une grande partie, de nombreux ordinateurs monocarte à bas coût et à encombrement réduit sont récemment apparus sur le marché. C'est notamment le cas des Raspberry Pi³⁶, apparus en 2012, dont l'entrée de gamme, la version Zero, se vend à peine plus de 5 €. Ce prix est cependant à relativiser. En effet, ces cartes à 5 € sont surtout un produit d'appel, dont la vente est limitée à une seule unité par acheteur, afin d'éviter leur utilisation industrielle – car la marge de la fondation Raspberry est minime. Concrètement, les premiers prix se situent dans la version Zero WH à 15 €, ce qui reste tout de même très abordable, même en comptant l'ajout d'un DAC audio correcte coûtant à peu près le même prix. Les Raspberry Pi font tourner des systèmes linux dédiés basés sur Debian, dont une version optimisée et préconfigurée pour l'audio, PatchBox OS est développée par l'entreprise Blokas Labs³⁷ qui développe aussi des DAC audio I2S³⁸ performants. L'avantage de ces ordinateurs monocarte est qu'ils permettent de faire fonctionner des logiciels comme *Pure Data* et donc de réutiliser tout un ensemble de bibliothèques et d'instruments déjà réalisés.

Nous avons aussi évalué les cartes Teensy³⁹ – qui peuvent accueillir du code Faust – et les Beagleboard Bela⁴⁰ – qui peuvent lire des patches *Pure Data* – développées par l'Augmented Instrument Lab de la Queen Mary University à Londres [16], se situant aussi dans des tarifs très abordables. Ces cartes, certes un peu moins puissantes, sont dotées de systèmes d'exploitation minimalistes mieux optimisés, permettant, notamment dans le cas de la *Bela*, d'atteindre des latences très inférieures à celles observées avec des ordinateurs personnels. Ce sont clairement des solutions plus adaptées pour une utilisation professionnelle des lutheries numériques et des instruments acoustiques augmentés où la latence est un critère fondamental. Mais cela est moins primordial pour notre utilisation pédagogique.

Nous avons donc opté pour les Raspberry Pi car elles bénéficient d'une très grande communauté d'utilisateurs – trente millions de cartes vendues – et d'une promesse de rester en production pendant plusieurs années, ce qui nous a semblé très important dans ce contexte.

³⁵ Processeurs à architecture simplifiée.

³⁶ Voir www.raspberrypi.org/, accédé le 12/10/2020.

³⁷ Voir blokas.io/, accédé le 12/10/2020.

³⁸ *Standard Inter-IC Sound*.

³⁹ Voir www.pjrc.com/teensy/, accédé le 12/10/2020.

⁴⁰ Voir bela.io/, accédé le 12/10/2020.

5.2. Prototypes d'interfaces de captation gestuelle

Nous avons alors cherché à construire l'instrument d'orchestre électroacoustique le plus minimaliste, simple à construire et peu coûteux, qui pourrait utiliser un Raspberry Pi comme moteur audio.

Une première source d'inspiration a été le CheapStick [9] développé en 2005 par Alexander Jensenius à l'Université d'Oslo, qui est une interface à construire soi-même pour un coût inférieur à 10 €, comportant un capteur de position – créé à partir d'une bande magnétique type VHS – et de trois capteurs de pression. Les capteurs sont entièrement continus – donc potentiellement expressifs –, il est possible de le tenir à deux mains et il utilise le protocole HID pour communiquer avec l'ordinateur.

Une deuxième source d'inspiration a été le T-Stick [12] développé en 2007 par Joseph Malloch et Andrew Stewart au CIRMMT⁴¹ de l'Université de McGill. Cette interface est réalisée à partir d'un tuyau en PVC, qui a l'avantage d'être peu cher, solide et de pouvoir contenir les circuits électroniques, dont des accéléromètres – STMicroelectronics LIS3L02AS4 ou Analog Devices ADXL345 – et de nombreux capteurs de position (capacitifs), de pression (FSR⁴²) et d'impact (piézoélectrique). Il utilise pour sa part le protocole OSC [25] développé par Adrian Freed et Matt Wright au CNMAT⁴³ de l'Université de Californie à Berkeley en 1997.

5.2.1. Le MESTick (Minimal Expressive Stick)

Que ce soit avec les wiimotes ou les smartphones, nous avons pu constater que l'utilisation musicale d'un accéléromètre à trois axes fonctionnait globalement correctement.

Nous avons aussi constaté que cela fonctionnait d'autant mieux en le manipulant d'une main – par exemple dans le cas de la perche à selfie adjointe au smartphone – tout en ayant un contrôle tactile, même minimal, dans l'autre main. Cela permet en effet un geste initial de déclenchement accompagné d'un geste secondaire de modification continu en 2D ou 3D géré par l'accéléromètre.

Le T-Stick nous a donc semblé une piste très intéressante, et nous avons entrepris d'en réaliser une version avec moins de capteurs, moins volumineuse, moins chère et plus simple à construire – le MESTick –, cela afin de trouver le minimum acceptable pour un instrument d'orchestre électroacoustique pédagogique.

Nous avons donc gardé l'idée du tube PVC (figure 4) et nous nous sommes tournés vers des accéléromètres STMicroelectronics LIS3DH. Contrairement aux accéléromètres utilisés pour les wiimotes ou le T-Stick, ils ont l'avantage de comporter en plus trois convertisseurs analogiques (ADC), ce qui enlève la nécessité d'avoir

⁴¹ *Center for Interdisciplinary Research in Music Media and Technology*.

⁴² *Force Sensing Resistor*. (résistance sensible à la force).

⁴³ *Center for New Music and Audio Technologies*.

une autre puce dédiée et simplifie donc l'ajout de capteurs supplémentaires. Pour l'instant, nous avons considéré que le minimum était l'utilisation d'un capteur capacitif pour servir de déclencheur (*Trigger*). Dans un second temps, nous le remplacerons par un capteur de pression et évaluerons la possibilité d'y rajouter un capteur de position inspiré du CheapStick.

Les données de ces trois ADC et de l'accéléromètre sont ensuite envoyées en haute résolution à la Raspberry Pi via le protocole I2C, ce qui élimine aussi la nécessité d'avoir un microcontrôleur dédié – par exemple de type Arduino⁴⁴ – pour transformer les données en MIDI, en HID ou en OSC.

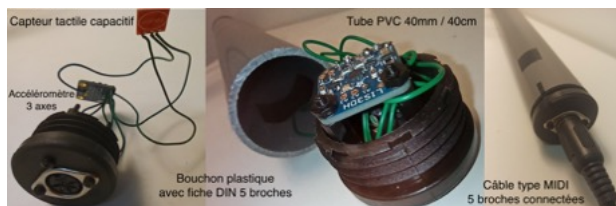


Figure 3. Le MESTick version beta. Prototype d'instrument expressif minimal à ultra bas coût et rapide à construire dans un tube PVC de 40 mm de diamètre et 40 cm de longueur.

Il est possible d'intégrer directement un Raspberry Pi Zéro avec un DAC audio dans le tube en PVC pour avoir un instrument incluant le moteur audio, voire d'y adjoindre un petit haut-parleur pour créer un instrument complet. Mais, dans l'objectif d'obtenir une bonne qualité audio à un coût toujours abordable, nous avons privilégié la solution de brancher quatre MESTick sur un Raspberry Pi plus puissant – version A+ – avec un meilleur DAC et de meilleurs haut-parleurs. Pour cela, nous utilisons un câblage avec des fiches DIN 5 broches – utilisées pour les liaisons MIDI –, ce qui a l'avantage de coûter peu cher et d'avoir suffisamment de broches pour transporter le signal I2C (figure 3).

Le système informatique est donc très minimaliste, mais pleinement fonctionnel tout en restant sous la barre des 100 € par poste, moteur audio et haut-parleurs compris – en prenant des enceintes amplifiées à bas coût de type JBL Control 2 ou Pro Achat 104A. Cette simplicité permet aussi une grande rapidité de construction, ce qui est un critère très important dans le cas d'un instrument d'orchestre amené à être utilisé en grandes quantités.

5.2.2. L'interface tactile multitouche à bas coût

En parallèle, nous avons aussi entrepris de réaliser un instrument autonome inspiré des interfaces MIDI MPE, c'est-à-dire un instrument à pression multitouche en trois dimensions. Entre temps est sorti dans le commerce le Haken ContinuumMini (2018) dont le design se rapproche grandement de ce que nous cherchions à faire : un petit ruban *dualtouch* en 3D avec un moteur audio intégré – la EaganMatrix. Mais là où le ContinuumMini dépasse les 900 €, nous avons toujours l'objectif

d'atteindre un coût très bas pour une utilisation pédagogique et de permettre au plus grand nombre de le construire via une publication des plans et du code en *open source*. Au prix bien sûr d'une interface gestuelle et d'un moteur audio de moins bonne qualité – mais personne ne commence le violon sur un Stradivarius !

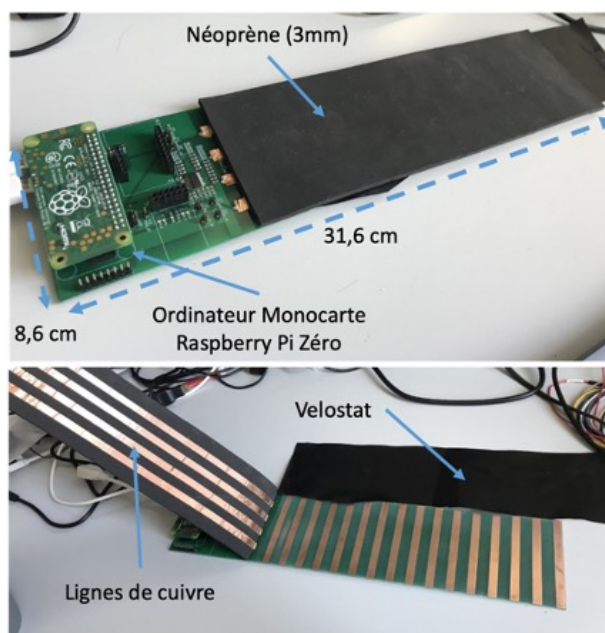


Figure 4. Prototype d'instrument à pression continue multitouche à bas coût.

Après le développement d'un premier prototype basé sur une carte Teensy, un second a été réalisé avec une carte Raspberry Pi Zéro [26]. Comme le montre la figure 4, ce prototype a la forme d'un ruban et ses dimensions ont été pensées afin de permettre de jouer simultanément avec les deux mains. L'architecture matérielle est basée sur des capteurs de pression matricés de type FSR. Cette architecture se retrouve dans d'autres instruments MPE comme le Seaboard Block de ROLI ou le LinnStrument de Roger Linn Design. Les FSR fonctionnent grâce à une matière piézorésistive appelé Velostat, qui va générer une résistance variable en fonction de la pression exercée sur la matière : si la pression sur l'instrument augmente, la résistance de la matière piézorésistive diminue et par conséquent la tension – loi d'Ohm. Une couche de néoprène de 3 mm d'épaisseur a par ailleurs été disposée sur les lignes de cuivre afin d'améliorer la sensation de pression sur l'instrument.

Afin de détecter avec précision la position des doigts sur l'instrument, la matrice est composée de quatre lignes de cuivre horizontales et seize verticales, formant ainsi une grille de soixante-quatre points. Comme le montre la figure 4, le Velostat est inséré entre les lignes de cuivre. Chacune des quatre lignes de cuivre est successivement alimentée en tension (3V) par le microcontrôleur via une ligne GPIO⁴⁵. Pour chaque ligne alimentée, la Raspberry Pi peut ainsi mesurer la tension aux bornes des seize colonnes via un convertisseur ana-

⁴⁴ Voir www.arduino.cc/, accédé le 12/10/2020.

⁴⁵ *General Purpose Input/Output*.

logique-numérique utilisant le protocole SPI ⁴⁶ et dont la résolution est de 10 bits. La plage de tension mesurée est optimisée via un simple pont diviseur. Les valeurs numériques ainsi mesurées sont stockées dans un tableau à deux dimensions dans la mémoire du micro-contrôleur. La fréquence d'échantillonnage, actuellement fixée à 1 kHz, est ajustable de façon logicielle.

En ce qui concerne le logiciel, un programme a été développé en C++ et il est composé de deux principales fonctions (ou *threads*). La première a pour objectif d'effectuer périodiquement un scan des soixante-quatre points de la matrice composant l'instrument. La valeur numérique stockée dans chaque cellule du tableau en deux dimensions représente la pression exercée en ce point. Si cette valeur dépasse un certain seuil – déterminé empiriquement –, on considère qu'une note doit être activée. Lorsque la valeur numérique repasse en dessous d'un certain seuil, on considère au contraire que la note ne doit plus être jouée. La seconde fonction a pour objectif le suivi (*tracking*) en temps réel de la position des doigts sur l'instrument. Son rôle est donc de mettre à jour les valeurs de positions et de pression des doigts positionnés sur la grille.

Hormis le scan et le *tracking*, le programme doit également envoyer les données en trois dimensions – positions X, Y et pression Z – au logiciel *Pure Data* afin de générer l'audio dont la synthèse dépend d'un patch pré-programmé. Le transfert des données entre le programme C++ et *Pure Data* s'effectue dans un format respectant le protocole OSC basé sur la couche de transport UDP et un formatage T3D ⁴⁷ introduit pour le Soundplane de Madrona Labs. Il est important de noter que toutes ces tâches, y compris la synthèse audio à partir de *Pure Data*, s'exécutent sur le Raspberry Pi Zéro dont le processeur est cadencé à 1 GHz. Chaque instrument est également doté d'une interface I2S afin de permettre une sortie casque de l'audio généré par *Pure Data* – retour local.

À terme, nous envisageons aussi d'envoyer les données en trois dimensions via une interface SPI à un circuit radio (RF) pour effectuer une communication sans fil entre chaque instrument et un PC central dont le rôle sera de retransmettre l'ensemble des instruments sur haut-parleurs.

Ce prototype n'est cependant pas encore complètement stable et opérationnel. Les lignes sont un peu trop espacées pour capter efficacement les déplacements continus sans palier et, pour des raisons de coût, il serait plus efficace d'utiliser les quatre lignes horizontales en lecture et les seize lignes verticales en écriture. Nous n'avons donc pas encore pu le tester en situation pédagogique et un second prototype amélioré est en cours de réalisation.

6. CONCLUSION

Durant les trois premières années du projet MPEi, nous avons ainsi eu l'occasion d'expérimenter de nombreuses solutions pour la mise en place d'orchestres pédagogiques électroacoustiques. Ce projet de recherche est encore en cours, mais nous voyons déjà que plusieurs de ces solutions sont possibles. L'arrivée des ordinateurs monocarte à bas coût de type Raspberry Pi est une vraie révolution pour la création électroacoustique collective. Nous passons ainsi d'une pratique traditionnellement centrée autour d'un seul ordinateur puissant de type Mac ou PC à une utilisation décentralisée constituée d'une multitude d'ordinateurs, certes moins puissants individuellement, mais largement suffisants pour une utilisation spécialisée à des coûts beaucoup plus abordables.

Cela ouvre la perspective à court terme de voir les orchestres électroacoustiques se démocratiser en sortant des universités et des centres de recherche pour se développer plus largement au sein des établissements scolaires et vers le grand public.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Brinkmann, P., Kim, P., Lawler, R., McCormick, C., Roth, M., Steiner, H. C. « Embedding Pure Data with Libpd », Proceedings of the Pure Data Convention, Weimar, Allemagne, 2011.
- [2] Bukvic, I., Martin, T., Standley, E., Matthews, M. « Introducing L2Ork : Linux Laptop Orchestra », Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, Sydney, Australie, 2010.
- [3] Cadoz, C. « Musique, geste, technologie », *Les nouveaux gestes de la musique*, Genevois, H., de Vivo, R. (dir.). Éditions Parenthèses, Marseille, 1999, p. 47-92.
- [4] Donin, N., Albèra, P., Cales, M., Campos, R., Feneyrou, L., Kaltenecker, M., Lalitte, P., Navard, G. (dir.). *Un siècle d'écrits réflexifs sur la composition musicale : anthologie d'auto-analyses, de Janáček à nos jours*. Publications de la Haute École de Musique de Genève, Droz, 2019.
- [5] Freed, A., McCutchen, D., Schmeder, A., Skriver, A. M., Hansen, D. O., Burleson, W., Mesker, A. « Musical Applications and Design techniques for the Gametrak Tethered Spatial Position Controller », Proceedings of the Sound and Music Computing Conference, Porto, Portugal, 2009.
- [6] Harker, A., Atmadjaja, A., Bagust, J., Field, A. « The Worldscape Laptop Orchestra : Creating Live, Interactive Digital Music for an Ensemble of Fifty performers », Proceedings of the International Computer Music Conference, Belfast, Royaume-Uni, 2008.

⁴⁶ *Serial Protocol Interface*.

⁴⁷ Voir madrionalabs.com/media/soundplane/t3d_spec.txt, accédé le 12/10/2020.

- [7] Huberth, M., Nanou, C. « Notation for Motion Tracking Controllers : A Gametrak Case Study », Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, Brisbane, Australie, 2016.
- [8] Iglesia, D., Intermedia, I. « The Mobility is the Message : The Development and Uses of MobMuPlat », Proceedings of the Pure Data Conference, New York, USA, 2016.
- [9] Jensenius, A. R., Koehly, R., Wanderley, M. M. « Building Low-Cost Music Controllers », *Computer Music Modeling and Retrieval*, Kronland-Martinet, R., Voinier, R., Ystad, S. (dir.). Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, p. 123-129.
- [10] Kiefer, C., Collins, N., Fitzpatrick, G. « Evaluating the Wiimote as a Musical Controller », Proceedings of the International Computer Music Conference, Belfast, Royaume-Uni, 2008.
- [11] Kracht, V. *Comment implémenter un orchestre numérique en collège ?*, mémoire de Master, sous la dir. de J.-F. Trubert et G. Navard, Université Côte d'Azur, 2019.
- [12] Malloch, J., Wanderley, M. M. « The T-Stick : From Musical Interface to Musical Instrument », Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, New York, USA, 2007.
- [13] Michon, R., Smith, J. O., Wright, M., Chafe, C., Granzow, J., Wang, G. « Mobile Music, Sensors, Physical Modeling, and Digital Fabrication : Articulating the Augmented Mobile Instrument », *Applied Sciences* 7/12 (2017).
- [14] Michon, R., Smith, J., Chafe, C., Wright, M. « faust2smartkeyb : A Tool to make Mobile Instruments focusing on Skills Transfer in the Faust Programming Language », Proceedings of the International Faust Conference, Mayence, Allemagne, 2018.
- [15] Michon, R., Orlarey, Y., Letz, S., Fober, D., Dumitrascu, C. « Mobile Music with the Faust Programming », Proceedings of the 14th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research, Marseille, 2019.
- [16] Moro, G., Bin, A., Jack, R. H., Heinrichs, C., McPherson, A. P. « Making High-Performance Embedded Instruments with Bela and Pure Data », Proceedings of the International Conference on Live Interfaces, Brighton, Royaume-Uni, 2016.
- [17] Orlarey, Y., Fober, D., Letz, S. « FAUST : An Efficient Functional Approach to DSP Programming », *New Computational Paradigms for Computer Music*, Assayag, G., Gerzso, A. (dir.). IRCAM/Centre Pompidou, Paris ; Delatour, Sampzon, 2009.
- [18] Petit, B., Serrano, M. « Composing and Performing Interactive Music using the HipHop.js language », Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, Porto Alegre, Brésil, 2019.
- [19] Puckette, M. « Pure Data : Another Integrated Computer Music Environment », Proceedings of the International Computer Music Conference, San Francisco, USA, 1996.
- [20] Trueman, D., Cook, P. R., Smallwood, S., Wang, G. « PLOrk : The Princeton Laptop Orchestra, Year I », Proceedings of the International Computer Music Conference, New Orleans, USA, 2006.
- [21] Veitl, A. « Quelles ressources technologiques pour renouveler les pédagogies de la musique ? Présentation critique d'outils », rapport d'enquête du Ministère de la Culture et de la Communication, DMDTS, Paris, 2001.
- [22] Wang, G., Essl, G., Penttinen, H. « Do Mobile Phones dream of Electric Orchestras ? », Proceedings of the International Computer Music Conference, Belfast, Royaume-Uni, 2008.
- [23] Wang, G. « Designing Smule's Iphone Ocarina », Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, Pittsburgh, USA, 2009.
- [24] Wang, G., Bryan, N. J., Oh, J., Hamilton, R. « Stanford Laptop Orchestra (SLOrk) », Proceedings of the International Computer Music Conference, Montréal, Canada, 2009.
- [25] Wright, M., « Open Sound Control : An Enabling Technology for Musical Networking », *Organised Sound* 10/3 (2005), p. 193-200.
- [26] Zhuoer, L. *Développement d'un instrument MPE sans fil*, rapport de stage ingénieur, Université de Nice Sophia Antipolis, Polytech, 2019.

Texte édité par Nathalie Hérold