

## Synthèse photosonique : de la géométrie des ondes au disque virtuel

Daniel Arfib, Patrick Sanchez  
LMA- CNRS  
31, chemin Joseph Aiguier  
13402 Marseille Cedex 20  
{arfib, sanches}@lma.cnrs-mrs.fr

Jacques Dudon  
Atelier d'Exploration Harmonique  
83340 Le Thoronet  
<http://aeh.free.fr>  
aeh@free.fr

### Résumé

Développée à partir d'un procédé graphique et lumineux de génération du son, la synthèse photosonique connaît aujourd'hui un nouveau développement, celui d'une version numérique de l'instrument photosonique. Le "simulateur numérique de disque photosonique", dans lequel le disque est devenu invisible, justifie paradoxalement plus que jamais l'intérêt acoustique de l'approche géométrique des ondes sonores de l'instrument optique original. Après une description des principes de la synthèse photosonique et de son émulation numérique, nous montrerons des exemples de confection de disques et comparerons les ressources sonores et les contrôles gestuels offerts par les deux types d'instruments.

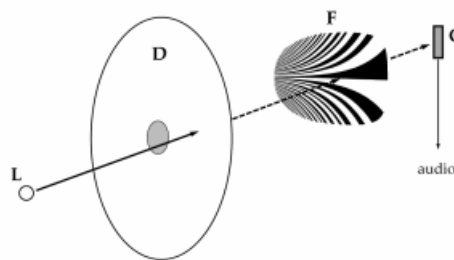
### Mots clefs

Synthèse photosonique, simulateur numérique, geste créatif, Informatique musicale

## 1. Les instruments photosoniques optiques et numériques

### 1.1. Les instruments optiques

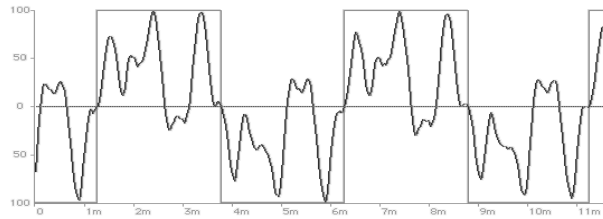
Le module générateur d'un instrument photosonique optique<sup>1</sup> est composé essentiellement de 4 éléments : une ou plusieurs sources lumineuses mobiles dans l'espace (L) ; des disques semi-transparents (D), interchangeables, sur lesquels sont dessinées des ondes sonores ; des "filtres optiques" (F) aux formes diverses, maniés à la façon d'un archet, mais contrôlant la dynamique et la sonorité ; enfin, un capteur photo-voltaïque (C), branché tel un microphone à un amplificateur audio ordinaire :



#### exemple 1 : Principe de fonctionnement de l'instrument photosonique optique

Le disque en est le cœur, l'élément vibreur, qui par sa rotation pulse les rayons lumineux le traversant à des fréquences audibles, et la lumière recueillie par la cellule photoélectrique est convertie en un signal électrique directement amplifié. Le capteur lit en permanence non pas un point, mais une certaine surface du disque, réalisant un lissage important, doublé d'un certain filtrage des ondes dessinées. Ainsi un signal carré, qui devrait être théoriquement issu d'une alternance de noirs et de blancs, est-il transformé en une onde complexe pouvant varier d'une onde quasi sinusoïdale à une somme d'harmoniques, selon la fréquence, la vitesse, le rayon, la distance de la lumière et l'interprétation. L'exemple suivant le démontre avec le dessin de l'onde d'un disque (signal carré) rapporté à l'échelle du signal audio obtenu (sans même l'utilisation du filtre optique), lequel montre bien l'importance de l'interprétation effectuée par le capteur :

<sup>1</sup> J. Dudon & D. Arfib, "synthèse photosonique, 1er congrès français d'acoustique, les éditions de physique, Lyon (1990)



exemple 2 : le signal sonore en sortie du capteur pour une onde carrée sur le disque

Dans tous les instruments photosoniques, la synthèse sonore s'effectue donc en 2 étapes : conception des disques photosoniques (hors temps réel), et interprétation musicale en temps réel. Si cette lecture des disques reste à chaque instant entièrement créative, au moyen de dispositifs additionnels et de contrôles gestuels variés, néanmoins la qualité musicale des sons dépend essentiellement de la précision graphique des disques, et de leur conception géométrique, laquelle est le résultat d'un savoir-faire qui s'est continuellement enrichi au cours des années<sup>2</sup>.



Treize prototypes différents d'instruments photosoniques ont été réalisés à ce jour, complétés de différents dispositifs comme le séquenceur optique, le rotofiltre ou autres automatismes opto-mécaniques (Double rotofiltre à interprétation coronale, instrument pour installations sonores interactives, 1997). Le dernier en date de ces instruments (Argo, 2000, ci-contre) est équipé d'un boîtier transparent protégeant du vent un disque d'ondes et un disque séquenceur (un précédent prototype, Aton, 1988, permettait un jeu en extérieur, mais faisant exclusivement usage du Soleil). Il dispose aussi d'un gouvernail qui permet de positionner plus précisément la lumière en face des couronnes.

## 1.2. le simulateur photosonique

La simulation numérique du disque photosonique a été réalisée par Daniel Arfib d'abord de façon expérimentale en 1999<sup>3</sup> et est désormais parvenue au stade opérationnel d'un instrument musical. Le processus de synthèse est simulé à l'aide d'un programme écrit en Max-Msp, qui utilise le résultat numérique du programme de conception de disques *Waveloom* comme tables d'ondes, en lieu et place des disques photosoniques, et simule l'action de la lumière et du filtre de manière numérique. L'effet de surface du capteur est modélisé par l'addition pondérée du balayage des formes d'ondes composant le disque, au moyen d'une courbe de lissage calculée de manière à obtenir un son équilibré, c'est-à-dire reproduisant le fait que la cellule capte plusieurs couronnes du disque, et que ceci doit être sensible que ce soit avec ou sans l'usage du filtre. Pour le filtrage lui-même, il a été choisi de mettre en œuvre un filtre FIR à 256 coefficients, ceux-ci étant choisis en fonction des coordonnées du positionnement du filtre<sup>4</sup>.



exemple 3 : Utilisation de l'instrument photosonique en version numérique

<sup>2</sup> J. Dudon, "Music of water and light", in Gravi-kords, whirllies & pyrophones, Bart Hopkin, Ellip-sis Arts editions, New York (with a CD) (1996)

<sup>3</sup> D. Arfib, J. Dudon, "A digital version of the photosonic instrument", proceedings ICMC99, Pekin, novembre pp 288-290, (1999)

<sup>4</sup> D. Arfib & J. Dudon, "A digital emulator of the photosonic instrument", submitted to the 2002 Conference on New Instruments for Musical Expression (NIME-02), Dublin, Ireland, May 24-26, 2002

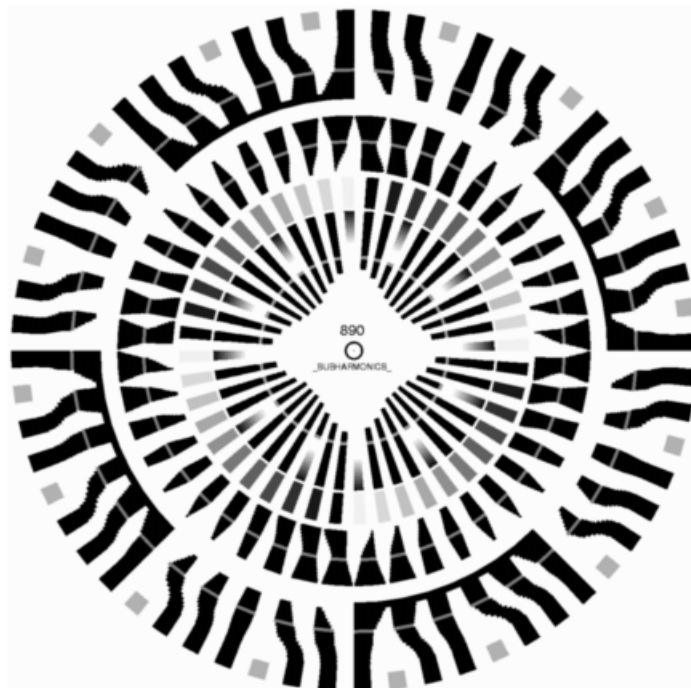
Le lien avec le geste, si précieux pour un usage virtuose et expert<sup>5</sup>, mais aussi au niveau pédagogique, est et reste un des points déterminants du jeu instrumental photosonique. Avec cet instrument numérique, les gestes initiaux de contrôle des déplacements de la lumière et du filtre optique, assurés respectivement par la main gauche et la main droite de l'instrumentiste, sont reproduits ici au niveau du déplacement d'un stylet et d'un pointeur à la surface d'une tablette graphique reliée à un ordinateur Macintosh, qui génère les sons en temps réel.

## 2. Les disques photosoniques

Les disques photosoniques<sup>6</sup> sont des "palettes" d'ondes et d'harmonies sonores conçues géométriquement. La synthèse photosonique permet ainsi la reproduction de timbres et d'intonations de données extrêmement précises, puisque matérialisées sous forme graphique, que la lumière permet d'interpréter ensuite de façon très souple et toujours renouvelée, au moyen de différents systèmes optiques et contrôles gestuels<sup>7</sup>. La conception acoustique des disques photosoniques fait appel à des procédés qui peuvent présenter des analogies avec certains principes propres à la synthèse numérique (synthèses additive, par modulation de fréquence, granulaire) mais présentent des originalités propres à une approche purement géométrique des ondes sonores.

La production des disques est passée par plusieurs stades, depuis les disques de 1<sup>ère</sup> génération (1984, découpés manuellement dans des feuilles de carton), suivis par une 2<sup>ème</sup> génération (logiciel "Déploiement disques" développé par D. Arfib en 1986, programmation de tracés à l'encre sur calques et tirage photographique par contact), jusqu'à une 3<sup>ème</sup> et dernière génération (logiciel WaveLoom développé par Patrick Sanchez en 1996<sup>8</sup> et régulièrement perfectionné. Nous en sommes à la version 2.2, avec images numériques au format PostScript, intégrant niveaux de gris, fonctions, import et export d'ondes sous forme de fichiers audio, etc. Les ressources sonores des disques photosoniques sont les mêmes pour les deux instruments, optique et numérique, excepté le fait que si le disque optique utilise une surface, le simulateur ne garde qu'un ensemble de couronnes de largeur identique (21 actuellement). Sans entreprendre un inventaire exhaustif des procédés géométriques de conception des ondes photosoniques, nous en donnerons ici quelques exemples qui seront illustrés à chaque fois par des enregistrements sonores de l'instrument optique, puis du simulateur.

exemple 4 :  
disque 890



<sup>5</sup> D. Arfib & L.Kessous, L "Gestural control of sound synthesis and processing algorithms", in gesture work-shop 2001 book, London Wachsmuth I., Sowa T. (eds.) to be published by Springer-Verlag (2002)

<sup>6</sup> J. Dudon, "The photosonic disk", in Experimental musical instruments, vol 14, #4 (with audio cassette) PO Box 784 Nicasio, CA 94946 USA (1999)

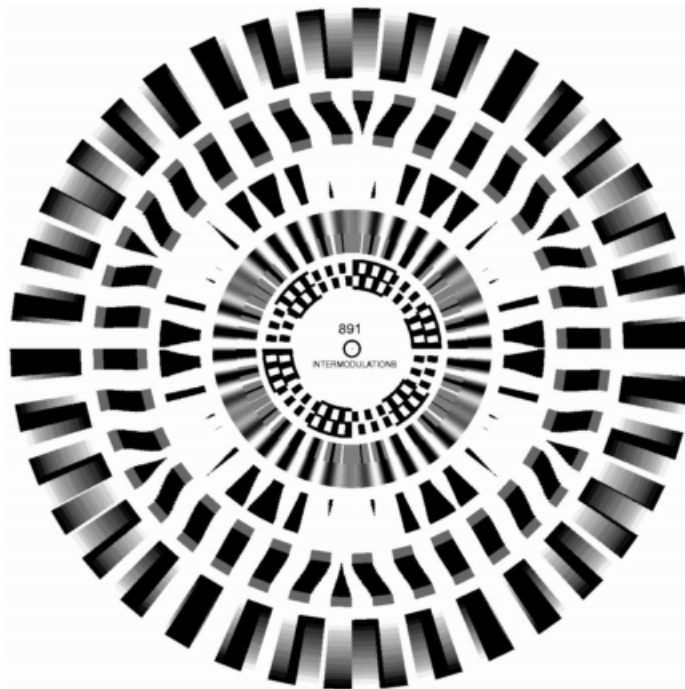
<sup>7</sup> B. Dubreuil, "Les harmoniques lumineuses de Jacques Dudon", in Musicworks, n° 55, Toronto (with a CD) (1993)

<sup>8</sup> D. Arfib, J. Dudon, P. Sanchez, "Waveloom, logiciel d'aide à la création de disques photosoniques", 3emes Journées d'Informatique musicale, actes du colloque, Cahiers du GREYC, université de Caen, France. (1996)

Dans un premier disque (n° 890) nous pouvons observer comment à partir d'une même fréquence de répétition (44 ici), peut être générée une onde subharmonique entièrement périodique (de fréquence 4) présentant différentes formes, donc différents timbres, au moyen de diverses techniques graphiques. Par ordre de complexité, du centre à la périphérie, nous avons utilisé :

- la technique des "omissions" périodiques (en nombre variable) des zones opaques d'une onde de départ, composée ici d'une simple alternance de noirs et de blancs ;
- la technique des "omissions composées" dans laquelle un certain nombre d'éléments (3 par onde ici) ont été gommés, pour générer une harmonique intermédiaire (une gradation a été appliquée radialement pour doser cet effet) ;
- puis une gradation circulaire donne à la même onde un profil en dent de scie ;
- un autre profil en dent de scie est obtenu ensuite au moyen d'une modulation du rapport cyclique, atténué progressivement pour revenir à l'onde de départ et se transformer selon un profil sinusoïdal ;
- enfin un profil d'onde carrée est appliqué au même moyen d'une modulation du rapport cyclique, atténué progressivement pour revenir à l'onde de départ et se transformer à nouveau en une onde d'omission composée basée sur une autre fréquence génératrice (de 60 zones au lieu de 44).

exemple 5 :  
disque 891

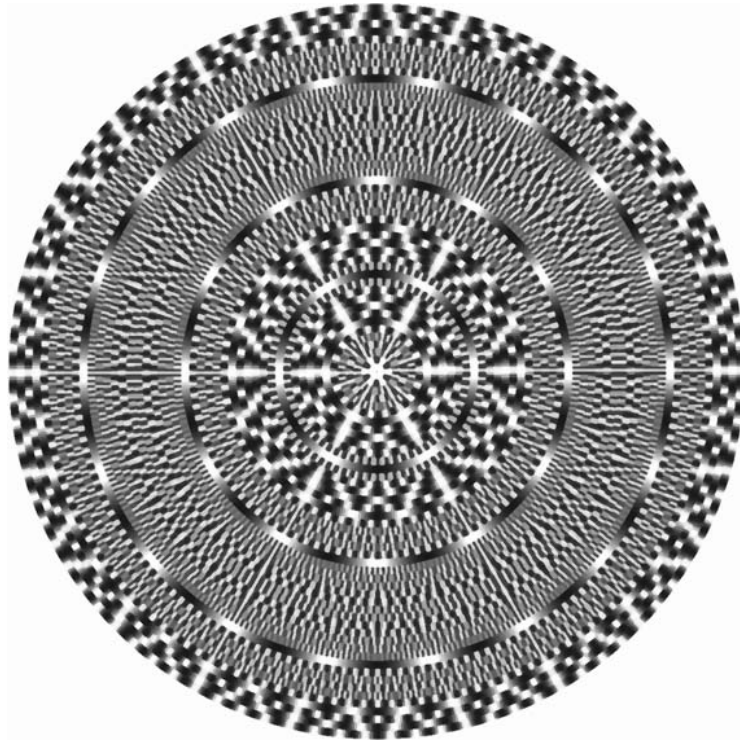


Le deuxième disque (n°891) présente à la différence du premier des modifications de type semi-périodique, au moyen de différents types d'intermodulations entre cette fois deux ondes de départ, de fréquences ici 32 et 38. De telles intermodulations, obtenues par des techniques graphiques, peuvent générer plus ou moins de sons différentiels, qui sont une ressource importante des disques photosoniques, dans lesquels timbres et hauteurs sont accordés dans une recherche de résonance globale. La fréquence différentielle de 38 et 32, soit 6, bien visible, y apparaît ainsi d'une manière plus ou moins marquée selon les techniques utilisées :

- au centre, ces deux fréquences sont simplement mises côte à côte, entourées de leur fréquence différentielle (6) pour permettre à la lecture, le capteur lisant une largeur variable de couronnes, un mixage de sons : c'est la manière la plus pure d'additionner les sons d'un disque ;
- la même opération est réalisée ensuite par une moyenne des niveaux de gris des deux ondes, en deux méthodes différentes ;
- la couronne suivante réalise d'abord un produit des mêmes niveaux de gris, se transformant graduellement en la somme des deux mêmes ondes mais dont le rapport cyclique est progressivement modulé selon la fréquence du son différentiel (6) ;
- une "moyenne d'angles" est ensuite déployée entre les deux fréquences, pour un effet encore différent ;
- enfin un "fondu radial" est réalisé entre les deux fréquences, qui propose un autre type de gradation.

Tous ces exemples montrent, comme pour le disque précédent, la variété des techniques possibles et cumulables pour ajouter un harmonique ou effectuer des mélanges de sons de manière géométrique et graphique.

exemple 6 :  
disque 751



Une autre application des niveaux de gris grâce au logiciel WaveLoom est celle des cycles d'angles, une technique proche de la synthèse par modulation de fréquence, qui permet la création de toutes sortes d'ondes et surtout de véritables "glissandos" de timbres particulièrement appropriés à un déploiement par micro-couronnes (disque n°751).

Ici une simple gradation de gris, est effectuée, la même fréquence modulante (37) étant appliquée ad libitum à un nombre croissant d'arcs de couronnes pour donner naissance à une série infinie d'ondes alternant entre sinusoïdes et mélanges d'harmoniques plus ou moins complexes selon le rapport trouvé entre un tour complet et l'angle modulant.

#### disque 889

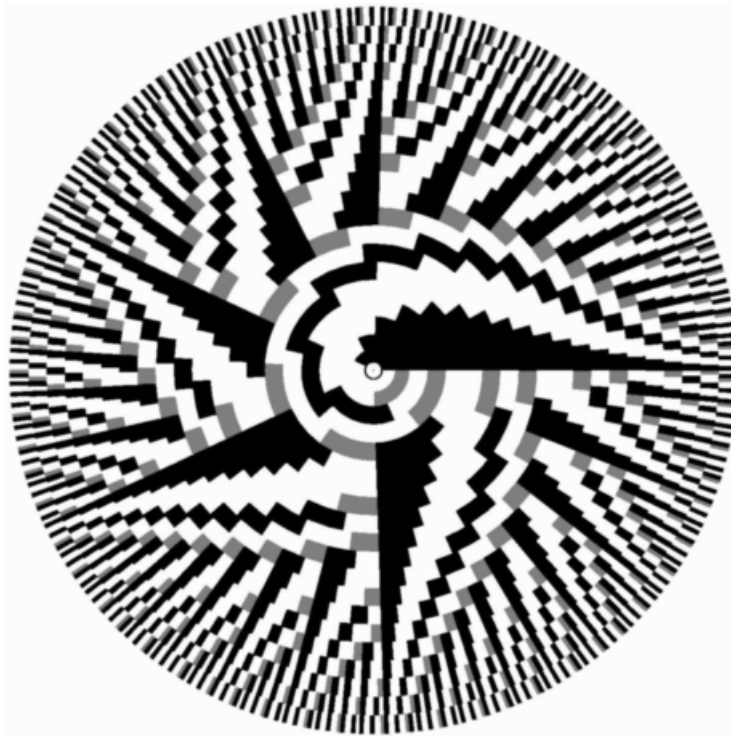
Un autre domaine de synthèse d'ondes semi-périodiques est enfin celui des ondes fractales. Celles-ci appliquent des lois de concaténation purement géométriques pour réaliser le déploiement de timbres de type inharmonique aux matières (vents, gongs, textures, bruits) et applications musicales très différentes des autres ondes. Chaque onde fractale illustre un "algorithme de consonance" bien précis, qui détermine des séries infinies de fréquences venant graduellement enrichir le spectre harmonique de l'onde. Leur nombre est limité, et une quinzaine d'ondes fractales seulement ont pu être géométriquement résolues à ce jour.

Le disque n° 889 rassemble les premiers développements de l'onde fractale Natté, qui satisfait le double algorithme de cohérence différentielle<sup>9</sup>  $x^5 - x^4 = x^3 - x = 1$  (où  $x$  = le rapport de répétition de l'onde, ici 1.324717957244745, vers lequel vont tendre ses harmoniques successives). L'estompage en gris d'une partie des éléments a comme but ici une harmonisation des fréquences basses de la série produite, 2 3 4 5 7 9 12 16 21 28 37 49 65 86 114 151 200 265 351 465 616 816 etc. (tandis que dans d'autre cas certaines techniques de flou pourront au contraire atténuer les fréquences aiguës).

---

<sup>9</sup> J. Dudon, "Cohérence différentielle : une nouvelle approche de la consonance", in Actes des JIM'98, CNRS-LMA, Marseille, France (1998)

exemple 7 :  
disque 889



### 3. Le jeu musical, l'interprétation

Dans les deux types d'instruments, optique et numérique, l'interprétation musicale des disques<sup>10</sup> s'effectue en temps réel au moyen de deux catégories de contrôles gestuels de base<sup>11</sup> qui sont :

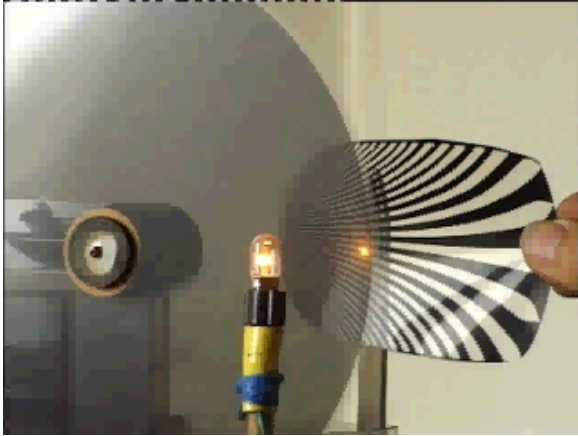
- le déplacement de la lumière (dans un plan horizontal) ;
- le déplacement du filtre optique (dans un plan vertical pour l'instrument optique, ramené au même plan horizontal d'une tablette graphique pour l'instrument virtuel) ;

L'implémentation de ces contrôles dans l'interface numérique a nécessité des choix qui ne sont pas seulement techniques -il fallait deux capteurs de données précis et indépendants- mais aussi ergonomiques: il s'agit de réaliser un instrument de musique effectif. Le choix porté sur une tablette Wacom format A4 étendu (carrée) s'est révélé judicieux: les bras humains peuvent exercer librement leur geste, la précision est excellente, et le délimitage de zones précises pour le geste de "la lumière" et "du filtre" tient compte de la physiologie humaine.

Les deux instruments, optique et numérique, diffèrent au niveau de l'interprétation. Dans l'instrument optique, la distance de la lumière influe accessoirement sur le timbre et la largeur de la zone lue du disque, mais est surtout utilisée pour contrôler le volume sonore ; avec le simulateur, les mouvements en x/y d'une souris tenue de la main gauche reproduisent le déplacement de la lumière (rayon lu et contrôle du volume), tandis qu'un réglage supplémentaire au moyen d'un curseur permet de mélanger une plus ou moins grande largeur de couronnes adjacentes. Le repérage des couronnes lues, qui permet un seul des prototypes optiques, est possible à la fois sur la tablette graphique et sur l'écran de l'ordinateur où les numéros de couronnes sont affichés.

<sup>10</sup> J. Dudon, "Lumières audibles", CD available for 20\$ including postage from the Atelier d'Exploration Harmonique, les Camaïls, 83340 Le Thoronet, France (tel : +33 494 73 87 78).

<sup>11</sup> D. Arfib & J. Dudon, "Photosonic disk: interactions between graphic research and gestural controls", in CD-ROM "Trends in Gestural control of music", editeurs M. Wanderley & M. Battier, publication Ircam, (2000)



exemple 8 : les gestes photosoniques en optique et en numérique

La mémorisation et le rappel de positions précises de la lumière sont deux des fonctions du numérique. Le filtre optique sur l'instrument virtuel, manœuvré de la main droite au moyen d'un stylet déplacé sur une autre zone de la même tablette graphique, fournit un repérage visuel des fréquences filtrées, inexistant dans l'instrument optique. Enfin, l'interface numérique permet un accord microtonal très précis et une mémorisation de "vitesses" virtuelles de rotation, qui peuvent être programmées pour être appelées en temps réel à partir du clavier de l'ordinateur (exemple sonore : échelle Thaï), avec en option une durée réglable de portamento. Ces vitesses peuvent être de plus doublées ou quadruplées instantanément à partir du bouton du stylet, pour obtenir différentes octavations des ondes interprétées. En revanche, l'interface numérique ne permet pas pour le moment l'usage polyphonique de deux ou plusieurs lumières comme dans l'instrument optique.

La virtualisation du disque photosonique libère donc les ondes des contraintes physiques du disque. Les possibilités instantanées de transposition, obtenues au moyen du bouton transpositeur d'octave ou du clavier de vitesses, renforcent encore cette émancipation des ondes de leur support physique, et ouvrent le champ des rotations lentes, inabordable jusqu'alors pour des raisons de besoin de planéité du disque physique. En résumé, le disque virtuel recentre les techniques de création des disques photosoniques sur les ondes elles-mêmes, plus que sur leur déploiement, pour lesquels les disques graphiques montrent jusqu'à présent plus de libertés.

#### **4. Conclusion**

L'instrument photosonique original, créé par Jacques Dudon, est un instrument optique qui s'appuie pour la synthèse du son sur des disques photosoniques, et est l'objet d'une recherche approfondie et persévérante de l'Atelier d'Exploration Harmonique. La fabrication numérique de disques photosoniques s'effectue grâce à un programme, Waveloom, créé et étendu par Patrick Sanchez. La simulation par ordinateur faite par Daniel Arfib dans le cadre du projet "le geste créatif en Informatique musicale" soutenu par le CNRS et le Conseil général des Bouches-du-Rhône, reprend l'essentiel des données des disques photosoniques, et émule en temps réel le processus de combinaison d'ondes et de filtrage. L'ensemble de ces deux instruments de musique fait désormais partie de l'instrumentarium de la synthèse photosonique.

