

**INVENTION ALGORITHMIQUE DU MATÉRIAU COMPOSITIONNEL  
LES SÉRIES TOUS INTERVALLES DANS UNE OCTAVE ET EN ZIZAG (STIOZ), LES  
SÉRIES TOUS INTERVALLES IMBRIQUÉES DANS UNE SÉRIE  
MICRO-INTERVALLIQUE (STISMI)**

LOUIS BIGO / STÉPHANE DE GÉRANDO

RÉSUMÉ. Suite à la composition de deux nouvelles œuvres de Stéphane de Gérando, *Tempus est* (création en 2015) et *Le Chant des STISMI* (création en 2016), l'une pour deux orchestres d'harmonie et cloches électroniques, l'autre pour un orchestre de flûtes et électronique temps réel, nous présentons deux nouveaux matériaux compositionnels inventés pour l'occasion et calculés par ordinateur : les séries tous intervalles dans une octave et en zizag (STIOZ) et les séries tous intervalles imbriquées dans des séries micro-intervalliques (STISMI). Les algorithmes de recherche de ces séries sont programmés par Louis Bigo, les algorithmes compositionnels sont réalisés par Stéphane de Gérando dans MAX-MSP-JITTER.

MOTS CLÉS. Nouvelles combinatoires, STIOZ, STISMI, *Tempus est*, *Le Chant des STISMI*.

TABLE DES MATIÈRES

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduction à la notion de série tous intervalles   | 1  |
| 2. <i>Tempus est</i> ou l'invention algorithmique des séries tous intervalles dans une octave et en zizag (STIOZ) | 3  |
| 3. <i>Le Chant des STISMI</i> pour orchestre de flûtes et électronique temps réel                                 | 7  |
| 4. Récapitulatif, définitions des STIOZ et des STISMI   | 15 |
| 5. Conclusion   | 16 |
| Annexe A. <i>Tempus est</i> , extrait du résultat de l'algorithme   | 18 |
| Annexe B. <i>Tempus est</i> , extrait de la première partition - matériau brut                                    | 19 |
| Annexe C. <i>Tempus est</i> , extrait de la deuxième partition - partition des cloches                            | 20 |
| Annexe D. <i>Tempus est</i> , extrait de la troisième partition - conducteur (partie orchestrale)                 | 21 |
| Annexe E. <i>Tempus est</i> , extrait de la partition de xylophone lettre T                                       | 22 |
| Annexe F. <i>Tempus est (II)</i> , extrait de la nouvelle version pour orchestre à cordes, création en 2016       | 23 |
| Annexe G. <i>Homometric attractors IV</i> , extrait de la partition, création en 2016                             | 24 |
| Références  | 25 |

1. INTRODUCTION À LA NOTION DE SÉRIE TOUS INTERVALLES

1.1. **Le rêve de Schönberg.** Souvenons-nous du rêve d'Arnold Schönberg en 1909 qui aspire à une libération complète de toutes les formes, de tous les symboles de la cohérence

---

Louis Bigo est chercheur en informatique musicale, Maître de conférences à l'Université Lille 3 et collaborateur de l'IRCAM en France, créateur du logiciel HexaChord. Stéphane de Gérando est compositeur, professeur de composition et nouvelles technologies, Docteur Habilité à Diriger les Recherches, ancien directeur de département universitaire et directeur pédagogique de centre de formation supérieure des enseignants. Pour citer cet article : Bigo Louis, de Gérando Stéphane, *Invention algorithmique d'un matériau compositionnel. Séries tous intervalles dans une octave et en zizag (STIOZ), séries tous intervalles imbriqués dans une série micro-intervallique (STISMI)*, Paris, 3icar / icarEditions, 2017. Distribution électronique © 3icar / icarEditions (3icar.com). Tous droits réservés pour tous pays.

Thème (STI)

FIGURE 1. Extrait de la *Suite lyrique* d'Alban Berg.

Thème du premier mouvement de la *Suite lyrique* pour quatuor à cordes de A. Berg (1926)

(Remarques analytiques : en couleur, cycle des quintes et visualisation des symétries, série "à centre")

(-)1 (+)8 (-)3 (+)10 (-)5 (+)6 (-)7 (+)2 (-)9 (+)4 (-)11

Analyse des intervalles par ordre croissant

5J Triton 4J 2M 3m 3M 2m

7M 6m 6M 7m

11 8 9 10 7 6 5 2 3 4 1

FIGURE 2. Éléments d'analyse, *Suite lyrique* d'Alban Berg

et de la logique, en finir avec le « travail du motif ». Cette idée, même si elle a finalement échoué [5], a donné lieu à l'utilisation musicale de la série dodécaphonique en 1923 (5e pièce, valse de l'opus 23 pour piano), la série dodécaphonique schönbergienne étant l'énoncé sans répétition des douze hauteurs de l'échelle chromatique tempérée.

**1.2. Introduction historique à la notion de STI.** Les figures 1 et 2 illustrent un exemple bien connu de l'histoire de la musique : une série ayant des propriétés particulières utilisées par Alban Berg dans sa *Suite lyrique* pour quatuor à cordes (1925 - 1926).

Inventé par son ami le compositeur autrichien Fritz Heinrich Klein, ce matériau thématique représente à lui seul une nouvelle forme de complexité combinée et emboîtée. Par exemple l'existence d'un centre, la transposition au triton identique à la rétrogradation (24 formes distinctes possibles), la division de la série en deux groupes - intervalles naturels et altérés (fort changement de couleur harmonique), l'imbrication au sein de la série d'un cycle de quintes, un couplage symétrique de notes en triton, le croisement en zigzag des hauteurs (alternance d'intervalles positifs et négatifs) avec un ambitus supérieur à une octave...

Double propriété qui nous intéresse encore davantage, cette série est à la fois dodécaphonique (comportant une fois et une seule les douze hauteurs du total chromatique) et tous intervalles (comportant chacun les onze intervalles de la gamme chromatique).

FIGURE 3. STI, *Il canto sospeso* de Nono.FIGURE 4. STI, *Gruppen* et des *Klavierstück* de Stockhausen (les V, VII et IX) (intervalles, -4, +5, -3, -1, +2, -6 triton servant de centre, puis -2, +1, +3, -5, +4).

La première utilisation de ce type de série daterait de 1921 (Klein, composition d'une pièce pour piano à quatre mains *Die Machine*, op 1.).

**1.3. Remarques historiques et analytiques sur la notion d'intervalle.** Soulignons que la référence à la notion de série tous intervalles apparaît souvent encore aujourd'hui de manière confuse, avec des définitions différentes selon les contextes de recherche.

Les musicologues parlent indifféremment de STI pour une œuvre comme *Il canto sospeso* de Nono (totalité des 11 intervalles non répétés comme pour la *Suite Lyrique de Berg*) ou des œuvres comme *Gruppen* ou des *Klavierstück* de Stockhausen (les V, VII et IX) (intervalles non répétés de la seconde mineur à la quarte, la seconde moitié de la série étant le rétrograde de la première). Dans ce cas, nous utilisons la définition habituelle et communément admise de la notion d'intervalle en musique (perception d'une distance entre hauteurs par exemple).

D'une autre manière, les STI font référence à la *Set Theory* développée notamment par Allen Forte [9] et plus globalement aux efforts de théorisation, de formalisation, de production algorithmique ou d'analyse scientifique des STI [1]. Dans cet autre contexte d'étude bien postérieur à la *Suite lyrique*, l'exemple de Berg apparaît comme un cas particulier de STI, aucun intervalle classiquement perçu n'étant répété.

Afin d'espérer un premier matériau conséquent quantitativement, nous choisirons dans cette recherche de nous inspirer de la *Set Theory* pour réaliser nos algorithmes : la notion d'intervalle sera bien interprétée comme une distance dirigée entre classes de hauteurs, considérant par ailleurs qu'un intervalle et son inverse font partie d'une même classe.

**1.4. Quelques chiffres au sujet des STI.** Le nombre total de séries dodécaphoniques correspond au nombre de permutations possibles des 12 premiers entiers qui s'élève à 479 001 600 (12!). La contrainte sur les intervalles réduit le nombre possible de séries tous intervalles (STI) à 46272, soit 0,1% des séries dodécaphoniques [2]. Si l'on considère comme équivalentes les STI liées par transposition, ce nombre est réduit à 3856, puis les STI liées par inversion d'intervalles (par ex. 0-1-4-9-3... équivalent à 0-11-8-3-9...), on décompte 1928 STI.

## 2. *Tempus est* OU L'INVENTION ALGORITHMIQUE DES SÉRIES TOUS INTERVALLES DANS UNE OCTAVE ET EN ZIGZAG (STIOZ)

**2.1. Le contexte.** Nous décrivons le contexte de la commande et l'imaginaire originel de l'œuvre.

**2.1.1. Le cahier des charges de la commande.** La composition de la première œuvre répond à une commande pour un double orchestre d'harmonie franco-allemand des villes de Belfort et de Leonberg, avec un dispositif électroacoustique. Les répétitions tutti (deux orchestres et électronique) sont prévus sur deux jours (4h), après cinq semaines de

répétitions pour les deux formations (moyens techniques - salle de 867 places avec régie plateau, régie son, sonorisation 5.1, régie lumière).

2.1.2. *Idées compositionnelles générales de départ.* L'objectif compositionnel initial est d'utiliser un matériau rare, "positionné historiquement", avec une double potentialité combinatoire à la fois spectrale et mélodique réalisable par un ensemble instrumental ou un instrument seul. Un autre aspect concerne plus spécifiquement la recherche d'une forte cohérence entre l'écriture du son électrique et la partition instrumentale.

Plus spécifiquement, le compositeur imagine une cloche géante spatialisée autour du public dans laquelle s'intègre l'orchestre d'harmonie placé en miroir, une ombre diffractée d'un même espace, lieu possible d'une altérité.

Autre objectif important, "quasi-pédagogique voire institutionnel", écrire une œuvre contemporaine qui soit réalisable par des musiciens majoritairement amateurs, en défendant l'idée que le répertoire des musiques d'harmonie peut évoluer, tout en gardant une identité culturelle propre à ce type d'ensemble. Par ailleurs, ce qui est frappant à l'écoute du travail du chef d'orchestre Xavier Scheid avec cette harmonie, c'était la force obtenue par un "collectif" via des écritures de type harmonique.

2.1.3. *Exemples de filiations historiques musicales "immédiates".* Curieusement dans ce projet, les filiations historiques n'ont pas au départ de rapports directs avec la notion de STI, elles dépassent chronologiquement le strict cadre des périodes dodécaphonique (1923), sérielle (1949) voire post-sérielle (1954). "Le charme des impossibilités" (modes à transposition limitée, rythmes non rétrogradables....) cher à Messiaen dans l'ensemble de son œuvre revient comme un axe général de réflexion et d'écoute, tout comme ses orchestrations par blocs instrumentaux. De la même manière, lorsque l'on évoque des sons de cloches dans l'écriture contemporaine, on ne peut faire abstraction de la période spectrale à partir de 1973, avec notamment une œuvre comme *Gondwana* de Tristan Murail (1980) ou à la même époque l'œuvre *Mortuos plango, vivos voco*, pour sons concrets traités par ordinateur d'Harvey. Notre mémoire fait tout aussi référence au début de la musique électronique comme avec les sons synthétiques ou transformés de *Gesang der Jünglinge* (1956) de Stockhausen ou de la cloche "décomposer /recomposer" (analyse /resynthèse) de *Mutation* (1969) de Jean-Claude Risset. Sur un autre plan, les expériences puissantes d'"écritures simplifiées" des grandes masses Xenakiennes de la dernière période de sa vie à partir de 1994 (*Dämmerchein*, 1994, *Iolkos* 1996) inspirent une rationalisation efficace des questions de notation de la partition et de son exécution.

2.1.4. *Au croisement des catégories esthétiques - une double combinatoire spectrale et sérielle.* Tentant de dépasser une appréhension cloisonnée de l'histoire musicale - relations binaires et schématiques entre techniques d'écriture et incidences esthétiques - et tel que nous l'avons brièvement rappelé, la notion de série sert ici une écriture instrumentale spectrale de type inharmonique, comme un écho à son double de la partition électronique et au son des cloches qui sera créée électroniquement par modèle physique.

Le deuxième objectif compositionnel est donc d'utiliser ces mêmes STI pour des passages instrumentaux mélodiques, référence cette fois-ci aux premières utilisations des séries chez Schoenberg. Pour créer ce type de matériau associé à cette double combinatoire, outre la recherche "classique" en algorithmique des STI, nous lui associons une règle du zigzag mélodique pour pouvoir restreindre son ambitus dans une octave.

2.2. **L'invention des STIOZ.** Dans cette partie, nous décrivons le processus d'invention du concept même de STIOZ<sup>1</sup>.

1. Le code développé pour l'énumération des STIOZ est disponible à l'url [http://www.lacl.fr/~lbig0/\\_media/code\\_STIOZ\\_STISMI.zip](http://www.lacl.fr/~lbig0/_media/code_STIOZ_STISMI.zip).

2.2.1. *Introduction à la notion de STIO Zigzag.* Précisons dans ce cadre que les séries de hauteurs toutes intervalles (STI) correspondent à des séries de 12 hauteurs toujours distinctes faisant aussi apparaître les 11 classes d'intervalles distinctes, intervalles analysés en mouvement ascendant.

Pour cette recherche, les 3856 STIS ont été énumérées à l'aide d'un algorithme de backtracking [8]. Une STI intègre en conséquence un ordonnancement systématiquement ascendant des 12 classes de hauteurs imposant des distances entre chaque classe de hauteur. Ces distances conditionnent l'ambitus global qui caractérise la réalisation de ce type de série (c'est-à-dire la distance séparant la note la plus grave de la note la plus aiguë) ainsi que le contour mélodique produit (caractère ascendant ou descendant du mouvement mélodique entre chaque note successive).

Une STI comprenant nécessairement les 12 classes de hauteurs, elle se réalise dans un ambitus global au moins égal à 11 demi-tons. Cet ambitus minimum de 11 demi-tons survient dans le cas où les 12 hauteurs sont les plus rapprochées possible les unes des autres, c'est à dire situées dans une unique octave. Une STIO correspond à la réalisation d'une STI caractérisée précisément par cet ambitus de 11 demi-tons. Les STIO sont par conséquent les plus « étroites » réalisations possibles de STI.

Une STIO Zigzag correspond à la réalisation d'une STIO caractérisée par un contour mélodique alternant systématiquement sa direction à chaque note (d'où le terme zigzag). Cette double contrainte (ambitus global réduit à une octave et variation systématique du contour mélodique) rend ce matériau encore plus rare. En effet, un grand nombre de STI ne sont pas réalisable sous la forme de STIO zigzag. La liste exhaustive des STIO zigzag (à transposition près) est trouvée grâce à un algorithme implémentée spécialement pour la composition de *Tempus Est*.

2.2.2. *Algorithme de réalisation de STI sous la forme d'une STIO Zigzag.* L'instanciation d'une STI dans un ambitus minimum et suivant un contour mélodique variant à chaque note est réalisée automatiquement à partir du choix de la direction du premier intervalle qui peut être ascendant ou descendant. La direction des intervalles suivants se fait de manière automatique afin de respecter la contrainte du zigzag. Ainsi, à chaque note de la série, l'algorithme cherche dans la direction imposée la note la plus proche respectant la prochaine classe de hauteur dans la STI.

Pour calculer ce matériau, les 3856 STI sont réalisées dans un ambitus minimal et avec un mélisme mélodique en zigzag sous les deux formes possibles (premier intervalle ascendant ou descendant). Cette démarche permet d'aboutir à 7712 séries de hauteurs (3856 x 2). Parmi elles, 992 (à peu près 13%) ont un ambitus couvrant 11 demi-tons et correspondent ainsi à des STIO Zigzag.

Ci-dessous une copie des premières lignes du fichier résultat obtenu par le programme.

1.  
intervalles : [5, 4, 1, 10, 7, 8, 3, 11, 6, 9, 2]  
pitch classes : [0, 5, 9, 10, 8, 3, 11, 2, 1, 7, 4, 6]  
série : [60, 65, 57, 58, 56, 63, 59, 62, 61, 67, 64, 66]
2.  
intervalles : [5, 3, 2, 11, 4, 6, 9, 10, 1, 8, 7]  
pitch classes : [0, 5, 8, 10, 9, 1, 7, 4, 2, 3, 11, 6]  
série : [60, 65, 56, 58, 57, 61, 55, 64, 62, 63, 59, 66]
3.  
intervalles : [7, 6, 9, 1, 4, 11, 2, 5, 8, 3, 10]  
pitch classes : [0, 7, 1, 10, 11, 3, 2, 4, 9, 5, 8, 6]  
série : [60, 55, 61, 58, 59, 51, 62, 52, 57, 53, 56, 54]
4.  
intervalles : [11, 4, 5, 2, 9, 6, 8, 7, 10, 3, 1]

pitch classes : [0, 11, 3, 8, 10, 7, 1, 9, 4, 2, 5, 6]  
 série : [60, 59, 63, 56, 58, 55, 61, 57, 64, 62, 65, 54]

2.2.3. *Exemple de calcul d'une STIO Zigzag.* Prenons un exemple du calcul des STIO zigzag. La série d'intervalles 11-6-3-7-1-10-8-9-2-4-5 correspond, à transposition près, à la série de classes de hauteurs 0-11-5-8-3-4-2-10-7-9-1-6

1) concrétisée en commençant par un intervalle ascendant (hauteurs en midi) : 60-71-65-68-63-64-62-70-67-69-61-66 Les notes extrêmes sont 60 et 71, l'ambitus couvre donc 11 demi-tons, celle-ci est valable.

FIGURE 5. Exemple de résultat du calcul d'un même matériau présenté dans ses deux états, la STI (aspect spectral) et la STIOZ (aspect mélodique).

2) concrétisée en commençant par un intervalle descendant : 60-59-65-56-63-52-62-58-67-57-61-54 Les notes extrêmes sont 52 et 67, l'ambitus couvre 15 demi-tons, celle-ci n'est pas valable.

### 2.3. La réalisation de l'œuvre.

2.3.1. *Première partition : du matériau brut synchronique à la notion de trajectoire.* A l'écoute de ces exemples de matériau nouvellement calculé, la stratégie compositionnelle se précise.

L'objectif est de constituer un matériau brut, une première partition d'environ sept minutes puis de la "sculpter" (filtrage des STIOZ), à l'image du sculpteur qui façonne la pierre. Pour ce faire, le compositeur réalise un programme temps réel dans l'environnement MAX-MSP-JITTER pour créer automatiquement cette première partition de cloches qui servira par la suite l'écriture de la partition d'orchestre.

La conception de ce matériau brut est ici associée à deux principes, l'un synchronique avec l'utilisation de ces STIOZ déjà calculées (matériau combinatoire), l'autre diachronique, avec l'invention de trajectoires dans l'espace de ces STIOZ. Ces trajectoires relèvent d'une forme d'imprévisibilité et de non répétition répondant à notre manière à l'esthétique des STIOZ. Les 992 STIO zigzag sont en conséquence enregistrées dans un fichier texte puis sélectionnées aléatoirement sans répétition dans MAX. Correspondant à la durée de la commande, le programme sélectionne une suite de 183 accords (ou spectres inharmoniques) dont il filtre les notes basses et aigues pour éviter les répétitions. Au moment du tirage, ces mêmes données sont stockées sous la forme non plus verticale mais horizontale (séries zigzag) pour être appliquées aux durées de ces accords. D'une certaine manière, la mémoire des hauteurs est réinjectée dans la mémoire du temps sous forme canonique et polymorphique, passage d'une utilisation des STI au STIOZ appliquées aux différents paramètres du son - hauteurs et durées. La partition brute est alors réalisée en une seule fois et enregistrée en temps réel en midi avec les données de l'analyse sous la forme d'un fichier texte (cf. annexe A).

2.3.2. *Partitions des cloches et orchestre.* La seconde étape consiste à finaliser la partition des cloches électroniques afin de pouvoir les enregistrer et les mixer en 5.1 dans Protools via le contrôle d'un synthétiseur par modèle physique. Comme le montre un extrait des deux partitions, le matériau brut de la première partition est filtré pour créer cette partition des cloches (cf. annexes B et C).

Pour la composition de la partition orchestrale, troisième et dernière partition, le compositeur précise "à l'oreille" la trajectoire de l'œuvre en orchestrant la partition des cloches, de nouveau par filtrage, superpositions, résonances spectrales, notions de proximités, contrôle harmonique et mélodique favorisant des équilibres dynamiques et spatiaux (tessitures).

Outre cette idée de mémoire des hauteurs réinjectées dans la mémoire du temps, l'entrée de l'ostinato du xylophone (cf. annexe E) annonce la fin de l'œuvre qui traduit à son tour cette double forme canonique et polymorphe : la partie du xylophone est la contraction mélodique (STIOZ) de toute l'écriture harmonique de l'œuvre (STI).

Superposée à cette contraction mélodique, la fin de " *Tempus est*" est l'expression d'une saturation, avec l'exploitation des STIOZ de densités harmoniques et spectrales maximales sans les notes extrêmes répétées (accords de dix hauteurs différentes).

2.3.3. *Création de Tempus est et autres versions.* *Tempus est* a été créée le 18 octobre 2015 à la Maison du Peuple à Belfort à l'initiative de Philippe Barthod et sous la direction de Xavier Scheid, avec les collaborations des chefs allemands Herward Heidinger et Erwin Gutmann. Depuis sa création, cette œuvre connaît différentes versions comme le montrent les extraits de partitions, annexes F et G. Soulignons qu'à partir du même matériau brut (première partition), chaque nouvelle nomenclature instrumentale impose une relecture singulière de cette notion de trajectoire, d'une relecture harmonique nécessaire dans le cadre de la version pour cordes à la réinvention d'une nouvelle œuvre pour le quatuor.

### 3. *Le Chant des STISMI* POUR ORCHESTRE DE FLÛTES ET ÉLECTRONIQUE TEMPS RÉEL

3.1. **Recherche d'un nouveau matériau combinatoire micro-intervallique.** Nous présentons le contexte de cette autre commande et la problématique musicale.

3.1.1. *La problématique musicale.* Ce nouveau projet d'œuvre, *Le Chant des STISMI*, répond à une commande de l'École de Musique d'Héricourt pour trente élèves flûtistes et électronique. Dans le prolongement de l'écriture de *Tempus est*, l'idée compositionnelle initiale est de créer un nouveau matériau combinatoire micro-intervallique à partir du concept des STIOZ et jouable par de jeunes élèves, puis de l'utiliser de manière poétique et ludique en intégrant des objectifs pédagogiques.

La pièce fait donc intervenir des quarts de tons, ce qui revient mathématiquement à un découpage de l'octave en 24 parties égales, et non pas 12 comme dans la pièce précédente.

On rappelle que les séries tous intervalles modulo 24 sont des séries satisfaisant les deux contraintes suivantes :

- (1) faire apparaître une fois exactement chacune des 24 classes de hauteurs,
- (2) faire apparaître une fois exactement chacune des 23 classes d'intervalles (analysées en mouvement ascendant).

La complexité de l'algorithme de backtracking utilisé pour énumérer les 3856 STIS dans le cadre chromatique ne permet pas d'étendre cette méthode au cadre microtonal. L'énumération en modulo 12 s'effectue en moins d'une seconde, elle passe à 11 minutes en modulo 16 et n'est pas réalisable avec notre contrainte de temps sur une machine standard en modulo 24. Alors que la génération de séries chromatiques pour la pièce *Tempus est* s'effectue suivant une approche énumérative, l'explosion combinatoire de

solutions liée au cadre microtonal suggère la production de séries suivant une heuristique de recherche.

Une série comprenant des quarts de ton peut être jouée par deux groupes d'instruments, le premier accordé à 440Hz, le second accordé à 440Hz moins un quart de ton. Les deux groupes se répartissent les notes de la série en fonction de leur fréquence. Dans le cas d'une série dodécaphonique<sup>2</sup>, cette répartition permet de faire jouer à chaque groupe la moitié des notes constituant la série. Une contrainte d'alternance systématique est formulée afin de mélanger au maximum les deux univers sonores :

- (3) l'alternance dans la série de classes de hauteur "demi-ton" (ex : do, do#, ré, etc.) et de classes de hauteur "quart de ton" (ex : do+, do#+, ré+, etc.)

Dans une division de l'octave en 24 parties égales, les classes de hauteur correspondant aux demi-tons (C, C#, etc.) sont représentées par les entiers pairs (0, 2, etc.) et les classes de hauteur correspondant aux quarts de ton (C+, C#+, etc.) sont représentées par les entiers impairs (1, 3, 5, etc.). Une alternance systématique de classes de hauteur paires et impaires (contrainte (3)) produit nécessairement une séquence d'intervalles exclusivement impairs qui ne permet pas le respect de la contrainte d'unicité des intervalles propres aux STI (contrainte (2)). A ce stade de notre recherche, il est donc nécessaire d'effectuer un choix exclusif entre la contrainte (2) (unicité des intervalles) et la contrainte (3) (alternance de classes de hauteurs demi-tons /quarts de tons). C'est la contrainte sur l'alternance (3) qui fût finalement privilégiée essentiellement pour des raisons perceptives : une "diversité formelle" ne s'accorde pas toujours avec une diversité perceptive et musicale elle-même en lien avec l'histoire, l'existence de demi-tons successifs dans une série pouvant anéantir la perception d'une musique micro-intervallique. La restriction aux intervalles impairs permet d'éviter ces succession de notes en demi-ton en renforçant au même moment la cohérence esthétique du matériau (diversité et unité). L'objectif consistant à rechercher des séries "alternées" s'avère donc prioritaire. Afin de conserver une notion de diversité sur les intervalles, la contrainte d'unicité des intervalles (2) sera toutefois remplacée par une contrainte de non répétition d'intervalles qui s'avère plus souple et compatible avec la contrainte sur l'alternance des classes de hauteur :

- (4) deux intervalles consécutifs ne peuvent avoir la même valeur.

La contrainte (3) permet de distinguer dans la série de 24 notes deux séries de 12 notes imbriquées, chacune jouée par un groupe d'instruments distincts dans un système de hauteur séparée par un quart de ton. Afin de renforcer l'exploitation des STI, on ajoute la contrainte suivante portant sur ces deux séries imbriquées :

- (6) chacune des deux séries imbriquées constitue une STI dans le système de demi-tons qui lui est propre (440 Hz pour la première, différence d'un quart de ton pour la seconde)

Voici un exemple de série respectant cette dernière contrainte :

do,do+,ré,do#+,ré#,ré#+,do#,ré+,sol,la+,si,fa+,la#,la#+,fa,mi+,sol#,sol+,mi,si+,la,sol#+,fa#,fa#+

La série de classes de hauteurs associée en modulo 24 est

0, 1, 4, 3, 6, 7, 2, 5, 14, 19, 22, 11, 20, 21, 10, 9, 16, 15, 8, 23, 18, 17, 12, 13

Cette série se décompose en deux séries imbriquées :

— 0,4,6,2,14,22,20,10,16,8,18,12

— 1,3,7,5,19,11,21,9,15,23,17,13

Ces deux séries ramenées à une notation en demi-ton correspondent chacune à une STI :

2. le terme dodécaphonique bien qu'habituellement réservé au cadre chromatique s'étend naturellement au cadre microtonal et fait référence à des séries de N classes de hauteurs distinctes pour une division de l'octave en N parties égales (24 dans le cas de la présente pièce)

— 0,2,3,1,7,11,10,5,8,4,9,6 (CI : 2,1,10,6,4,11,7,3,8,5,9)

— 0,1,3,2,9,5,10,4,7,11,8,6 (CI : 1,2,11,7,8,5,6,3,4,9,10)

On remarque d'autre part que la série en quarts de ton ne fait apparaître aucune répétition d'intervalles consécutifs (contrainte 4).

Poursuivant la démarche des STIOZ, on cherche à instancier ces séries par des séries de notes produisant un contour mélodique variable dans un ambitus global minimal.

Un nouveau problème apparaît, avec la nécessité de contrôler les ambitus des doubles séries alternées. En effet, la contrainte d'alternance demi-ton / quart de ton (contrainte 3) combinée avec la stratégie de d'instanciation en zigzag a tendance à faire émerger une indépendance des voix produite par la série demi-ton qui ne se mélange pas à la série quart de ton, une des deux séries se retrouvant généralement jouée "au dessus" de la seconde. Cette séparation des séries s'avère indésirable dans l'approche compositionnelle de la pièce.

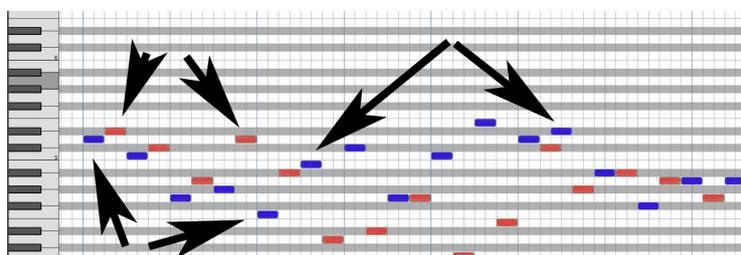


FIGURE 6. Exemple de série en quart de ton montrant la nécessité de croiser davantage les deux STI imbriquées. En bleu la STI à 440 Hz, en rouge la STI à 440 Hz moins un quart de ton.

La FIGURE 6 illustre ce problème avec deux séries imbriquées (rouge et bleu) qui se croisent rarement. Cet exemple permet de se rendre compte facilement que la stratégie d'instanciation en zigzag est en grande partie responsable de ce phénomène. Chaque changement de direction dans le contour mélodique de la série contribue à "isoler" les deux séries imbriquées l'une de l'autre. La stratégie d'instanciation est donc modifiée de manière à minimiser le nombre de changements de direction dans le contour mélodique (contrairement à la stratégie zig-zag qui produit un maximum de changements de direction), tout en restant dans un ambitus raisonnable.

L'algorithme recherche les séries par ordre croissant de classes de hauteur, c'est pourquoi la série commence par des notes très proches les unes des autres (do, do+, ré, do#+, ré#, ré#+, do#, ré+, ... dans l'exemple ci-dessus).

Dans un souci de diversification diachronique du matériau, l'algorithme est modifié dans le but d'effectuer la recherche sur l'ensemble des classes de hauteurs ordonné initialement de manière aléatoire. Pour un ordonnancement donné, la recherche s'effectue durant une durée fixée à 15 secondes. Au terme de cette durée, la STI trouvée (si il y en a) pouvant se concrétiser dans le plus petit ambitus est sélectionnée.

L'ordonnancement des classes de hauteurs est ensuite ré-initialisé aléatoirement afin de réitérer le processus de recherche dans une autre région de l'espace des séries microtonales. La démarche consistant à changer de région de manière aléatoire permet de trouver des séries dissimilaires et va dans le sens d'une plus grande imprévisibilité.

La section suivante récapitule les contraintes algorithmiques fixées au terme de cette phase d'expérimentation permettant de définir le concept de *STISMI*.

**3.2. L'invention d'un nouveau matériau, les STISMI.** Nous présentons les STISMI, nouveau matériau combinatoire micro-intervallique (en quart de ton).

3.2.1. *Définition des STISMI.* Les séries tous intervalles imbriquées dans une série micro-intervallique (STISMI) constituent des séries en quart de ton composées de deux STI singulières en demi-ton et alternées. Appliquées aux hauteurs, elles peuvent tout aussi bien traduire une organisation mélodique ou spectrale et harmonique.

Une STISMI mélodique a donc la particularité d'être jouable en demi-ton par au minimum deux instruments accordés avec un quart de ton de différence.

Ce type de série comprend cinq contraintes :

- (1) faire apparaître une fois exactement chacune des 24 classes de hauteurs dans un ambitus limité (type deux octaves maximum),
- (2) faire apparaître une alternance stricte de classes de hauteurs "demi-ton" (ex : do, do#, ré, etc.) et de classes de hauteurs "quart de ton" (ex : do+, do#+, ré+, etc.),
- (3) faire apparaître deux séries imbriquées (naturellement induites par la contrainte précédente) correspondant chacune à une STI en demi tons,
- (4) ne jamais faire apparaître deux intervalles successifs ayant la même valeur,
- (5) limiter les changements de direction dans le contour mélodique afin de forcer l'enchevêtrement des deux STI imbriquées.

Traduisant une notion d'imprévisibilité des trajectoires (analyse diachronique), la liste des STISMI calculées est regroupée dans un fichier, avec comme caractéristique :

- (1) un choix aléatoire de chaque série,
- (2) un choix aléatoire de la première note de chaque série (séries translatées),
- (3) ne jamais faire apparaître de séries similaires.

3.2.2. *Le programme informatique en JAVA.* Le code java du programme est consultable à l'url [http://www.lacl.fr/~lbig0/\\_media/code\\_STIOZ\\_STISMI.zip](http://www.lacl.fr/~lbig0/_media/code_STIOZ_STISMI.zip).

L'interface utilisateur programmée au final en 2016 par Louis Bigo permet de définir 3 contraintes, l'ambitus maximum en nombre de 1/4 de ton, le nombre minimum de croisement entre les deux STI imbriquées et la durée de recherche de STISMI dans une même région.

Lorsque l'algorithme cherche dans une certaine région durant la "region search time" définie par l'utilisateur, il sélectionne les STISMI ayant des croisements de voix supérieurs ou égaux à la valeur du paramètre "croisements min" et dans un ambitus global inférieur au paramètre "ambitus max". Parmi ces séries, le programme retient la série qui a le plus petit ambitus global. Si dans une même région deux séries répondent aux mêmes paramètres, la première est retenue, la seconde est ignorée. Par ailleurs s'il ne trouve pas de série dans le temps défini ("region search time"), l'algorithme recommence ses calculs dans une autre région.

Soulignons que plus le paramètre "croisements min" est élevé, plus les séries sont rares et difficiles à trouver, 12 étant le nombre de croisements maximum. Par conséquent, dans une zone de recherche donnée, l'algorithme trouve forcément plus de STISMI dont les STI se croisent "croisements min" fois plutôt que "croisements min + x" fois. Autrement dit, la STISMI élue au terme des x secondes de recherche a de très grandes chances d'avoir ses STISMI qui se croisent exactement "croisements min" fois (et pas plus).

3.2.3. *Présentation générale des résultats des calculs algorithmiques d'une STISMI.* Chaque résultat d'un calcul d'une STISMI associé à des éléments d'analyse est en définitive présenté de la manière suivante dans un fichier texte :

- (1) l'ambitus (intervalle et notes midi),
- (2) le nombre de "croisements des séries imbriquées",

- (3) le nombre de "melodic turns" (changement de direction de la mélodie ou "piques").  
Un pique est une note de la STISMI dont les 2 notes voisines (avant et après) sont soit toutes les 2 plus hautes, soit toutes les 2 plus basses.
- (4) la série de hauteurs avec le nom des notes associé aux numéros d'octaves,
- (5) les hauteurs en midi,
- (6) les intervalles,
- (7) des durées associées aux classes de hauteurs,
- (8) des nuances associées aux classes de hauteurs,

Voici ci-dessous pour une STISMI un exemple de résultat tel qu'il se présente dans un fichier texte, avec le paramétrage suivant, "ambitus max" à 24, "croisements min" à 10 et "region search time" à 10 :

```
ambitus : 20.0 [47.5-67.5]
croisements des series imbriquees : 10
melodic turns : 10

fa#[4],sol+[4],mi[4],re+[4],la[3],la#[3],si[3],la+[3],re#[4],fa#[4],
re[4],do+[4],la#[3],mi+[3],do#[3],fa+[3],sol[3],re#[3],sol#[3],
sol#[3],fa[3],si+[2],do[3],do#[3];

66.0,67.5,64.0,62.5,57.0,58.5,59.0,57.5,63.0,66.5,62.0,60.5,58.0,
52.5,49.0,53.5,55.0,51.5,56.0,56.5,53.0,47.5,48.0,49.5;

3 17 21 13 3 1 21 11 7 15 21 19 13 17 9 3 17 9 1 17 13 1 3;

noir_pointee,noir_pointee+double_pointee,noir,croche+triple,
blanche+double, blanche+croche+triple,blanche+croche+double,
blanche+double_pointee,croche_pointee, noir_pointee+triple,croche,
triple,blanche+croche,noir+triple,double, noir+double_pointee,
noir_pointee+double,croche+double_pointee,blanche,blanche+triple,
noir+double,blanche+croche+double_pointee,appo,double_pointee;

mp,mf,p,pp,f,ff,fff,ff,pp,mf,pp,ppp,ff,p,ppp,mp,mf,p,f,f,mp,fff,
ppp_possible,ppp;
```

Les deux graphismes figures 8 et 9 confirment l'exactitude des résultats du programme : cette STISMI y a bien comme annoncé 10 "melodic turns" (changements de direction de la mélodie ou "piques") et 10 croisements entre deux STI imbriquées.

**3.3. Réalisation de l'œuvre, le *Chant des STISMI*.** Nous présentons l'œuvre réalisée avec ce matériau en cours de programmation, le *Chant des STISMI*.

**3.3.1. Introduction au *Chant des STISMI*.** Comme le rappelle la note de programme du *Chant des STISMI*, la collaboration entre les disciplines musicale et informatique permet d'enrichir l'imaginaire de l'œuvre via l'invention du matériau :

"*Le Chant des STISMI*, pour un orchestre de flûtes en quart de ton et électronique temps réel, a la particularité de pouvoir être aussi bien interprétée par des professionnels que par des élèves (du cycle 1 au cycle 2). Le STISMI est un acronyme inventé le 8 décembre 2015 par Louis Bigo et Stéphane de Gérando pour désigner un type particulier de séries tous intervalles imbriquées en séries micro-intervalliques, matériau calculé par ordinateur. Les STISMI, « personnages » singuliers qui tendent vers la non répétition, résonnent ici pour la première fois sous formes improvisées ou écrites, du bruit au son

The musical score consists of three staves. The top staff is in treble clef. The middle and bottom staves are in grand staff (treble and bass clefs). The notes are marked with fingerings: 'm' for middle finger, 'J' for thumb, and 'M' for index finger. Numbers 1-7 indicate specific melodic turns. The bottom staff has a red '8<sup>th</sup>' marking at the beginning.

FIGURE 7. Analyse musicale de l'exemple d'une STISMI (ambitus : 20.0 [47.5-67.5], croisements des séries imbriquées : 10, melodic turns : 10), résultat d'un extrait du calcul de l'algorithme présenté au paragraphe 3.2.3.

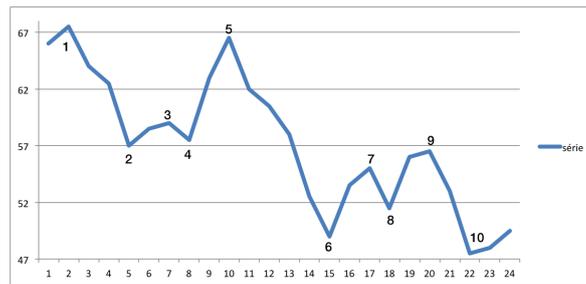


FIGURE 8. Vérification du nombre de "melodic turns" de la STISMI (figure 7).

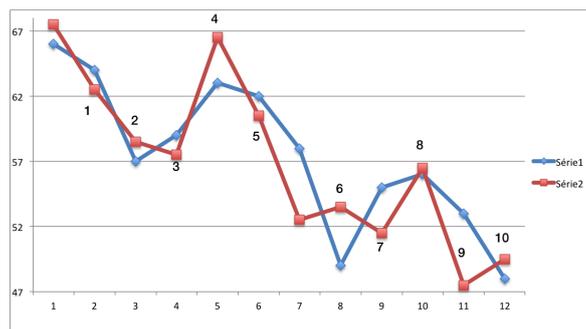


FIGURE 9. Vérification du nombre de croisements entre les deux STI imbriquées (figure 7).

harmonique. Le contrôle de la partie électronique, de la transformation temps réel du son de la flûte et sa spatialisation autour du public, est aussi composé à partir du calcul algorithmique des STISMI".

Les STISMI sont donc devenues des objets d'imagination, des personnages poétiques, ludiques et pédagogiques. Dans la partition et pour les jeunes élèves, ils sont décrits

comme des personnages étranges, tous différents, qui n'apparaissent qu'une fois et par surprise. Les STISMI sont par ailleurs constamment en relation les uns avec les autres. Chaque STISMI est singulière, qu'elle soit improvisée ou notée sur une partition, *Le Chant des STISMI* n'étant "jamais" le même.

3.3.2. *La structure du Chant des STISMI*. L'œuvre se présente en trois moments différents ou séquences enchaînées - trois « partitions » :

- (1) Nuages de STISMI, avec électronique (présence discrète) : improvisation selon les règles (« partition 1 »)
- (2) Le chant d'une STISMI, avec électronique : improvisation selon les règles (« partition 2 »)
- (3) STISMI choral (accompagné d'un fichier son 5.1) : lecture d'une partition écrite (« partition 3 »)

Dans l'architecture de l'œuvre, les STISMI représentent un même personnage pour différents rôles :

- (1) Les Nuages de STISMI (1ère partition) : nuages simples, combinés, enchaînés (éolien, percussions de clef, whistle tones, pizz)
- (2) Le(s) STISMI-FOLLET(S) : quelques traits mélodiques ascendants – descendants imprévisibles, les plus véloces possible, accompagnés par un mouvement "désordonné" et des changements de doigté à toute vitesse, les traits variant sans cesse entre hauteur et souffle.
- (3) Le(s) STISMI-CHEF(S),
- (4) Le STISMI-PARLEUR, stoppe *Le Chant des STISMI* ; il déclame un court texte.
- (5) *Le Chant des STISMI* : chant virtuel généré en temps réel par l'ordinateur à partir du son des flûtistes,
- (6) Le STISMI-CHORAL (3ème partition).

A travers l'organisation diachronique de ces rôles, l'œuvre transite :

- (1) d'une situation improvisée non dirigée à l'interprétation d'une partition précisément dirigée,
- (2) du bruit au son harmonique (harmonies en quart de ton) voire à des spectres inharmoniques,
- (3) de l'électronique temps réel à une partition mixte instrumentale accompagnée d'un fichier son 5.1.

3.3.3. *L'électronique temps réel contrôlée par les STISMI*. Sans entrer dans le détail des règles d'improvisation et du scénario des partitions 1 et 2 (se référer pour cela à la partition), soulignons que par analogie, les STISMI provoquent l'imagination d'espaces basés sur l'écoute, la spatialisation des corps et des sons, la découverte des timbres, la notion d'autonomie et d'échange dans un rapport individuel et collectif, le tout dans une appréhension non répétitive des paramètres du son, l'interprète tentant d'imaginer par surprise!... Outre ces analogies distancées et poétiques, c'est dès le début de l'œuvre et selon la décision des interprètes que l'électronique pourra faire "le pont" avec la dernière partie de l'œuvre composée directement à partir des résultats des calculs algorithmiques des séries micro-intervalliques. En effet, si dans cette première partie de l'œuvre, le jeu ou son instrumental est bien improvisé, sa possible transformation électronique en temps réel est, elle, totalement dirigée par les STISMI selon trois principes simples.

Les STISMI contrôlent :

- (1) les fréquences d'un harmoniseur qui transpose les sons des flûtes,

- (2) les différentes durées associées à ces fréquences (phrases mélodiques rapides égrainant de manière continue les deux cents séries calculées),
- (3) et la spatialisation indépendante de trois sources (flûtes) ponctuellement captées à partir de trois microphones éclairés dans des ronds et qui vont servir un jeu d'"actions-réactions", de déplacements et de transformations des sons des interprètes.

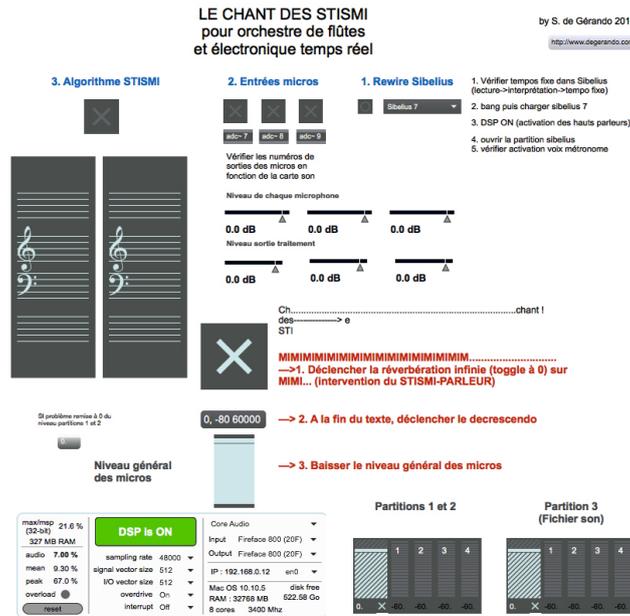


FIGURE 10. *Le chant des STISMI*, l'interface de contrôle programmée dans MAX-MSP.

Dans le prolongement du scénario énoncé et de ce même principe continu de transformation algorithmique des sons, on comprend mieux l'intérêt du passage des sons bruités (nuages de bruits de clefs...) au son harmonique tenu (si4) qui fera apparaître *Le Chant des STISMI* avant la fin de l'œuvre et le STISMI-CHORAL. Ce chant est donc à la fois le produit d'une virtualité calculée et réalisée par l'ordinateur et d'une réalité incarnée par ces sons tenus et transformés en temps réel des flûtes.

3.3.4. *LE STISMI-CHORAL, dernière partition.* Dans le prolongement de *Tempus est*, le compositeur réalise un programme dans MAX-MSP permettant l'écriture d'un fichier midi qui sert la réalisation du fichier son 5.1 (Protools) et de la partition (Sibelius). Le choix aléatoire des séries ne se fait plus dans MAX contrairement au programme de *Tempus est* mais en suivant les calculs proposés par l'algorithme initial. Les différentes voix micro-intervalliques sont automatiquement divisées dans MAX-MSP par pupitres instrumentaux selon l'organisation de la partition en 3 groupes de niveaux divisés eux-même en deux sous-groupes, l'un accordé à 440 Hz, l'autre à 440 Hz moins un quart de ton. Les STISMI organisent la double architecture de cette partition partagée entre une écriture chorale avec des densités d'accords allant jusqu'à 10 notes à des traits mélodiques fulgurants joués virtuellement ou entonnants l'hymne de la fin, sons joués et chantés en même temps. Le fichier son diffusé lors de l'interprétation du choral a un rôle principal de soutien et de dédoublement de la musique dans une autre dimension acoustique très réverbérée et en 5.1, la lecture de la partition se faisant ici sur écran d'ordinateur à partir de Sibelius synchronisé en ReWire avec Max.

FIGURE 11. *Le chant des STISMI*, extrait de la fin de la partition.

#### 4. RÉCAPITULATIF, DÉFINITIONS DES STIOZ ET DES STISMI

**4.1. Définition d'une STIOZ.** Les séries tous intervalles dans une octave et en zizag (STIOZ) sont des STI concrétisées dans un ambitus d'une octave et dont le contour mélodique change de direction à chaque note (d'où le terme "zig-zag"). Il en existe 992 (13% du nombre total de STI).

**4.2. Définition d'une STISMI.** Les séries tous intervalles imbriquées dans une série micro-intervallique (STISMI) sont des séries en quart de ton composées de deux STI singulières en demi-ton et alternées.

Ce type de série comprend cinq contraintes :

- (1) faire apparaître une fois exactement chacune des 24 classes de hauteurs dans un ambitus limité (type deux octaves maximum),
- (2) faire apparaître une alternance stricte de classes de hauteurs "demi-tons" (ex : do, do#, ré, etc.) et de classes de hauteurs "quart de tons" (ex : do+, do#+, ré+, etc.),
- (3) faire apparaître deux séries imbriquées (naturellement induit par la contrainte précédente) correspondant chacune à une STI en demi-ton,
- (4) ne jamais faire apparaître deux intervalles successifs ayant la même valeur,
- (5) limiter les changements de direction dans le contour mélodique afin de forcer l'enchevêtrement des deux STI imbriquées.

Traduisant une notion d'imprévisibilité des trajectoires (analyse diachronique), la liste des STISMI calculées est regroupée dans un fichier, avec comme caractéristique :

- (1) un choix aléatoire de chaque série,
- (2) un choix aléatoire de la première note de chaque série (séries translátées),
- (3) ne jamais faire apparaître de séries similaires.

## 5. CONCLUSION

**5.1. Un premier bilan.** Replacé dans une lecture critique et historique, la force du couplage entre invention formelle et l'utilisation des technologies numériques ouvrent des perspectives créatives, pédagogiques et artistiques nouvelles : comme exemple, cette transformation du son en temps réel qui nous renvoie à l'écriture d'une partition qui fait elle-même référence à l'invention et au calcul d'un nouveau matériau en temps différé : les STIOZ et les STISMI.

En écho à cette recherche, l'efficacité musicale immédiate du matériau calculé est particulièrement frappante. Plus encore, depuis 2015, de nouvelles œuvres ont été composées à partir de ce matériau, *Frapocalypse* pour ensemble instrumental créée le 24 mai 2016 à Paris ou cette dernière composition algorithmique pour ordinateur et ensemble instrumental, avec une partition et un accompagnement qui se réalisent en temps réel à partir des STISMI (création de *Stellar wave* le 9 juin 2017 en nocturne à la Citadelle de Belfort).

D'une certaine manière face à la richesse et la quantité de données engendrées, à l'image de données scientifiques qu'il est nécessaire d'analyser et "de faire parler", nous sommes entrés dans une phase de connaissance et d'appropriation de ce matériau qui provoque indirectement de nouvelles situations de jeu et d'interaction.

D'une autre manière, on pourrait dès aujourd'hui établir un premier bilan critique et décrire des perspectives de recherche. Au niveau méthodologique par exemple, il semblerait à l'avenir plus efficace de continuer à distinguer le calcul "brut" du matériau de son utilisation musicale (notre première approche liée au STIOZ). Il est par exemple possible d'utiliser les STISMI à partir d'un processus de translation tiré lui-même des STISMI choisies en temps réel (procédés canoniques) pour réaliser une œuvre. Dans notre seconde approche (les STISMI), cela deviendrait incohérent si l'on s'en tient aux trois fichiers calculés qui intègrent déjà dans leurs résultats des translations aléatoires de séries.

**5.2. Nouvelles problématiques de recherche.** Nous décrivons huit problématiques de recherche pour approfondir et élargir la connaissance de ce matériau, avec l'objectif constant de renouveler l'invention de l'œuvre :

- (1) optimiser l'interface utilisateur du compositeur pour le calcul des STISMI afin à la fois d'élargir son utilisation et de faciliter un contrôle plus spécifique des résultats (profils mélodiques et harmoniques singuliers et invention des trajectoires) ;
- (2) calculer un cas rare de STIOZ et de STISMI avec des séries ne comportant aucune répétition classiquement perçue d'intervalle (ne plus considérer qu'un intervalle et son inverse font partie d'une même "classe" comme la seconde mineure et septième majeure tous deux représentés par 1 dans la *Set-Theory*), séries rares à répertoire et plus directement similaires à l'exemple de Berg cité en introduction ;
- (3) pour approfondir les univers micro-intervalliques, rechercher les STISMI en 16ème de ton, avec une réflexion sur les changements d'échelle de perception, du microcosme au macrocosme ;
- (4) développer et complexifier la notion de trajectoire (imprévisible) dans l'espace des STIOZ et des STISMI, avec l'intégration de nouvelles contraintes algorithmiques comme le contrôle des notions d'entropie, de proximité ou de discontinuité / continuité (notes communes, combinatoire sur les ensembles, notion de distance entre ensembles...), l'analyse et la classification des profils mélodiques de chaque série et leur modification dynamique, le choix de certains intervalles harmoniques et spectraux (notions d'harmonicité, d'inharmonicité et de bruit) ;

- (5) formaliser et programmer une "extension" du concept des STIOZ et des STISMI sur les autres paramètres du son et l'invention d'un espace-temps musical post-relativiste [7, 8];
- (6) établir la liste complète des STISMI (programmation d'un algorithme adapté);
- (7) implémenter des algorithmes appropriés en JAVA dans MAX pour le calcul temps réel des trajectoires (voire éventuellement du matériau lui-même);
- (8) inventer et contrôler des STISMI hybrides sonores et visuelles (STISMI-SV), via par exemple le contrôle de "points et de surfaces" dans JITTER associés au son.

Autant de perspectives qui décrivent de nouveaux enjeux diachroniques à la fois scientifiques et artistiques.

ANNEXE A. *Tempus est*, EXTRAIT DU RÉSULTAT DE L'ALGORITHME

|                                |         |           |
|--------------------------------|---------|-----------|
| 1, 1 7 6 9 4 2 1 1 5 1 0 3 8;  | 1, 1;   | 1, 125;   |
| 2, 8 7 1 6 9 1 0 4 2 3 1 1 5;  | 2, 7;   | 2, 875;   |
| 3, 8 7 6 4 9 1 5 1 0 3 2 1 1;  | 3, 6;   | 3, 750;   |
| 4, 8 2 1 1 4 6 7 9 5 1 1 0 3;  | 4, 9;   | 4, 1125;  |
| 5, 2 7 4 3 1 1 8 6 5 9 1 1 0;  | 5, 4;   | 5, 500;   |
| 6, 4 1 0 1 5 3 1 1 7 2 6 8 9;  | 6, 2;   | 6, 250;   |
| 7, 2 1 1 3 7 4 6 8 5 9 1 1 0;  | 7, 11;  | 7, 1375;  |
| 8, 2 6 5 9 1 8 1 0 4 7 1 1 3;  | 8, 5;   | 8, 625;   |
| 9, 4 9 1 0 3 5 8 6 1 1 2 7 1;  | 9, 10;  | 9, 1250;  |
| 10, 9 8 2 6 7 3 1 1 5 1 1 0 4; | 10, 3;  | 10, 375;  |
| 11, 1 1 2 9 4 7 6 5 8 3 1 0 1; | 11, 5;  | 11, 625;  |
| 12, 9 1 1 0 5 3 1 1 2 6 8 7 4; | 12, 8;  | 12, 1000; |
| 13, 1 1 0 9 2 5 6 8 1 1 3 7 4; | 13, 7;  | 13, 875;  |
| 14, 4 9 2 1 1 7 1 0 1 3 6 5 8; | 14, 1;  | 14, 125;  |
| 15, 7 8 1 0 3 5 2 1 1 4 6 9 1; | 15, 6;  | 15, 750;  |
| 16, 1 7 9 2 3 1 1 6 8 5 1 0 4; | 16, 9;  | 16, 1125; |
| 17, 4 1 1 2 8 7 6 5 3 1 1 0 9; | 17, 10; | 17, 1250; |
| 18, 2 9 6 5 3 8 7 1 1 4 1 1 0; | 18, 4;  | 18, 500;  |
| 19, 1 0 3 4 2 9 5 1 1 6 1 8 7; | 19, 2;  | 19, 250;  |
| 20, 1 0 3 6 4 9 7 1 1 2 5 8 1; | 20, 3;  | 20, 375;  |
| 21, 4 3 2 1 1 7 1 0 1 9 6 5 8; | 21, 11; | 21, 1375; |
| 22, 1 0 3 7 6 9 4 1 5 8 2 1 1; | 22, 11; | 22, 1375; |
| 23, 3 7 1 1 5 2 9 4 6 8 1 1 0; | 23, 8;  | 23, 1000; |
| 24, 7 4 1 1 6 1 0 3 8 2 5 1 9; | 24, 7;  | 24, 875;  |
| 25, 5 9 1 7 1 1 2 8 6 3 4 1 0; | 25, 6;  | 25, 750;  |
| 26, 1 0 1 9 5 3 1 1 6 8 2 7 4; | 26, 4;  | 26, 500;  |
| 27, 2 7 1 1 0 9 8 6 4 5 1 1 3; | 27, 9;  | 27, 1125; |
| 28, 2 9 8 6 4 1 1 5 1 1 0 7 3; | 28, 1;  | 28, 125;  |
| 29, 7 3 1 0 1 8 6 4 1 1 2 9 5; | 29, 5;  | 29, 625;  |
| 30, 3 1 1 2 4 5 8 1 9 1 0 6 7; | 30, 10; | 30, 1250; |
| 31, 8 3 1 0 5 1 1 2 4 9 6 7 1; | 31, 3;  | 31, 375;  |
| 32, 9 1 5 1 1 2 7 8 6 4 3 1 0; | 32, 2;  | 32, 250;  |
| 33, 5 9 1 8 1 0 4 7 2 6 3 1 1; | 33, 3;  | 33, 375;  |
| 34, 3 7 1 0 1 5 1 1 4 6 8 9 2; | 34, 8;  | 34, 1000; |
| 35, 3 1 1 6 5 4 2 9 7 1 0 1 8; | 35, 2;  | 35, 250;  |
| 36, 3 1 0 6 7 8 1 1 2 5 4 9 1; | 36, 11; | 36, 1375; |
| 37, 1 1 4 5 1 1 0 7 3 8 9 6 2; | 37, 4;  | 37, 500;  |
| 38, 1 0 5 1 9 8 1 1 3 6 2 7 4; | 38, 6;  | 38, 750;  |
| 39, 4 1 1 2 9 5 6 8 1 1 0 3 7; | 39, 7;  | 39, 875;  |
| 40, 8 5 9 4 7 2 6 1 0 1 3 1 1; | 40, 9;  | 40, 1125; |
| 41, 4 9 6 7 3 1 0 5 1 2 1 1 8; | 41, 5;  | 41, 625;  |
| 42, 1 0 1 9 5 8 6 2 1 1 3 7 4; | 42, 1;  | 42, 125;  |
| 43, 9 1 1 0 3 5 1 1 2 8 6 7 4; | 43, 10; | 43, 1250; |
| 44, 7 4 9 2 1 1 6 1 1 0 3 8 5; | 44, 10; | 44, 1250; |
| 45, 9 6 1 7 8 1 0 3 2 4 1 1 5; | 45, 2;  | 45, 250;  |
| 46, 3 1 1 5 9 1 6 1 0 4 7 2 8; | 46, 7;  | 46, 875;  |
| 47, 7 8 1 0 3 1 6 9 2 1 1 5 4; | 47, 4;  | 47, 500;  |
| 48, 9 2 8 3 7 1 1 4 6 1 1 0 5; | 48, 3;  | 48, 375;  |
| 49, 7 8 1 1 0 6 9 4 2 1 1 3 5; | 49, 11; | 49, 1375; |
| 50, 1 0 3 7 1 1 2 6 8 5 1 9 4; | 50, 8;  | 50, 1000; |
| 51, 7 6 8 1 1 0 3 5 1 1 2 9 4; | 51, 6;  | 51, 750;  |
| 52, 7 9 1 1 2 3 6 8 1 1 0 4 5; | 52, 5;  | 52, 625;  |
| 53, 1 0 3 4 6 8 1 7 1 1 2 5 9; | 53, 9;  | 53, 1125; |
| 54, 9 1 4 1 1 3 7 6 2 8 5 1 0; | 54, 1;  | 54, 125;  |
| 55, 5 6 8 3 1 0 1 7 9 2 1 1 4; | 55, 9;  | 55, 1125; |
| 56, 8 5 3 1 1 2 6 1 0 1 9 7 4; | 56, 4;  | 56, 500;  |
| 57, 9 1 4 6 7 2 8 1 0 5 3 1 1; | 57, 10; | 57, 1250; |
| 58, 4 1 0 1 5 1 1 3 7 6 2 8 9; | 58, 1;  | 58, 125;  |
| 59, 2 7 4 9 5 8 6 1 1 3 1 1 0; | 59, 5;  | 59, 625;  |
| 60, 1 0 1 8 6 4 9 2 5 1 1 7 3; | 60, 3;  | 60, 375;  |
| 61, 1 8 6 5 3 1 1 7 2 9 1 0 4; | 61, 11; | 61, 1375; |
| 62, 3 1 1 2 7 6 4 1 0 1 5 9 8; | 62, 7;  | 62, 875;  |
| 63, 7 6 9 5 1 1 2 4 3 1 0 8 1; | 63, 2;  | 63, 250;  |
| 64, 1 1 4 7 1 0 1 5 3 8 6 9 2; | 64, 6;  | 64, 750;  |
| 65, 1 8 1 0 3 5 1 1 2 4 9 6 7; | 65, 8;  | 65, 1000; |
| 66, 8 5 4 6 1 0 1 9 7 2 1 1 3; | 66, 10; | 66, 1250; |
| 67, 1 0 5 1 9 8 2 6 3 1 1 7 4; | 67, 2;  | 67, 250;  |
| 68, 7 9 6 4 1 1 2 5 3 1 0 8 1; | 68, 11; | 68, 1375; |
| 69, 5 2 8 1 0 3 7 1 1 4 6 1 9; | 69, 3;  | 69, 375;  |
| 70, 1 1 0 8 3 5 2 1 1 4 6 7 9; | 70, 7;  | 70, 875;  |
| 71, 5 4 1 0 1 6 9 2 3 1 1 7 8; | 71, 4;  | 71, 500;  |
| 72, 7 4 9 1 8 1 0 1 1 2 6 3 5; | 72, 6;  | 72, 750;  |
| 73, 5 1 1 3 2 4 9 1 0 6 1 8 7; | 73, 8;  | 73, 1000; |
| 74, 7 6 1 0 9 1 8 5 4 2 1 1 3; | 74, 5;  | 74, 625;  |
| 75, 8 3 1 1 7 2 9 5 6 1 0 1 4; | 75, 9;  | 75, 1125; |
| 76, 9 8 3 7 1 0 1 5 4 1 1 6 2; | 76, 1;  | 76, 125;  |

FIGURE 12. *Tempus est*, extrait du résultat du tirage des STIOZ (première colonne de gauche) appliqué au choix des durées en millisecondes (colonne de droite) - programme réalisé dans MAX pour produire un fichier midi, puis une première partition liée à la composition des cloches électroniques

ANNEXE B. *Tempus est*, EXTRAIT DE LA PREMIÈRE PARTITION - MATÉRIAU BRUT

Tempus est  
Matériau brut résultat de l'algorithme

Résultat  
algorithme

3  
P.

5  
P.

7  
P.

10  
P.

12  
P.

FIGURE 13. *Tempus est*, matériau brut (première partition), extrait du résultat de l'algorithme

ANNEXE C. *Tempus est*, EXTRAIT DE LA DEUXIÈME PARTITION - PARTITION DES CLOCHES*Tempus est*

Stéphane de Gérando (juillet 2015)  
Pour orchestre d'harmonie et cloches 5.1  
Partie cloches électroniques - son 5.1

The musical score is written for four electronic bells, labeled Cloche 1 through Cloche 4. The music is in 4/4 time and consists of two systems of staves. The first system begins at measure 1, and the second system begins at measure 5. Cloche 4 has the most complex rhythmic pattern, while Cloche 1 is the simplest. The score includes various musical notations such as notes, rests, and accidentals.

FIGURE 14. *Tempus est*, partition des cloches (2ème partition, filtrage du matériau brut, figure 3)

ANNEXE D. *Tempus est*, EXTRAIT DE LA TROISIÈME PARTITION - CONDUCTEUR (PARTIE ORCHESTRALE)

## Tempus est

The image displays a complex musical score for a conductor, titled "Tempus est". The score is written for a large orchestra and includes various instruments such as strings, woodwinds, brass, and percussion. The tempo is marked "Allegretto" and the time signature is 4/8. The score is divided into measures, with some measures containing multiple rests or specific markings. The conductor's part is written in a large, clear font, making it easy to read. The score is titled "Tempus est" and is an extract from the third partition of the conductor's part.

FIGURE 15. *Tempus est*, conducteur (3ème partition, orchestration de la partition des cloches, 2ème partition)

ANNEXE E. *Tempus est*, EXTRAIT DE LA PARTITION DE XYLOPHONE LETTRE T

Xylophone

3

113 **T** **Xyl**  
*f*

115

117

119

121 *ff*

123 **U**

125

127

V.S.

FIGURE 16. *Tempus est*, extrait de la partition de xylophone lettre T, contraction mélodique (STIOZ) de toute l'écriture harmonique de l'œuvre (STI)

ANNEXE F. *Tempus est (II)*, EXTRAIT DE LA NOUVELLE VERSION POUR ORCHESTRE À CORDES, CRÉATION EN 2016

**Tempus est (II)**  
pour orchestre à cordes

un opus - une partition - six éditions électroniques - édition n° 1.0

Richard de Clément

The musical score is presented in two systems. The first system (top) contains staves for Violins I-IV, Violas I-IV, Cellos, and Double Basses. The second system (bottom) contains staves for Violins I-IV, Violas I-IV, Cellos, and Double Basses. The score is highly complex, featuring a variety of time signatures and dynamic markings. The first system includes a section marked 'Section' and another marked '2/4 A'. The second system includes a section marked '2/4 B' and another marked '2/4 C'. The score is written for a string orchestra and includes detailed performance instructions.

FIGURE 17. *Tempus est (II)*, nouvelle version pour orchestre à cordes

ANNEXE G. *Homometric attractors IV*, EXTRAIT DE LA PARTITION, CRÉATION EN 2016

4

## Frapocaplyspe

Ensemble instrumental  
(Algorithme temps réel et comédiens en option)  
Fragment I

Stéphane de Gérando

♩ = 100

Clarinette en Sib

Violon

Violoncelle

Piano

Ordinateur  
(phases de déclenchements de l'algorithme)

Cl.

V.

Vc.

P.

Ordi.

© icarEditions 2016

FIGURE 18. *Frapocaplyspe*, extrait de la partition réalisée avec le même matériel que *Tempus est*, créée le 24 mai 2016 à Paris

## RÉFÉRENCES

- [1] Andreatta Moréno, *Méthodes algébriques en musique et musicologie du XXème siècle : aspects théoriques, analytiques et compositions*, thèse de doctorat en musicologie, EHESS 2012.
- [2] Bigo Louis, *Représentations symboliques musicales et calcul spatial*, thèse en informatique, Université Paris-Est LACL/IRCAM, 2013.
- [3] Bigo Louis, Giavitto Jean-Louis, Spicher Antoine. *Building topological spaces for musical objects*. International Conference on Mathematics and Computation in Music. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [4] Forte, Allen. The structure of atonal music. Vol. 304. Yale University Press, 1973.
- [5] de Gérando Stéphane, *L'œuvre contemporaine à l'épreuve du concept*, préface de Paul Méfano, postface de Jean-Yves Bosseur, Paris, L'Harmattan, 2012.
- [6] de Gérando Stéphane, *Dialogues imaginaires. Une expérience de la création contemporaine et de la recherche*, Paris, Inactuelles (2010). Ouvrage accompagné d'un disque monographique, en collaboration avec Radio-France, MFA, 3icar – icarEnsemble, Inactuelles
- [7] de Gérando Stéphane, Pétri Jérôme, *Cinq lois artistiques relativistes. Du concept d'espace-temps en astrophysique à l'invention sonore et visuelle*, Paris, 3icar /icarEditions, 2015.
- [8] de Gérando Stéphane, Mourougane Christophe, *Espace fibré et composition sonore et visuelle. De l'élément simple aux dimensions cachées et enchevêtrées*, Paris, 3icar /icarEditions, 2015.
- [9] Riotte André, Mesnage Marcel, *Formalismes et modèles musicaux 1*, Delatour, 2006.