

VERS UN MODELE POUR L'ANALYSE DE L'ORCHESTRATION : RAPPORT DE RECHERCHE EN COURS

Didier Guigue
UBPB – Mus³ – CNPQ
didierguigue@gmail.com

RÉSUMÉ

Cette communication présente l'état actuel de mon projet d'élaboration d'un modèle méthodologique pour l'analyse de l'impact que les stratégies d'orchestration peuvent avoir sur la dynamique formelle et sa perception. Le modèle aborde l'œuvre à partir de deux angles: la partition, de laquelle sont extraites les informations d'orchestration et instrumentation consignées par le compositeur, et un ou plusieurs enregistrements, qui sont analysés par des descripteurs ad hoc afin de juger de l'effet concret de ces prescriptions, et de voir jusqu'à quel point leur impact sur la forme en est le reflet. Ce modèle fait appel à des outils informatiques qui aident le musicologue dans l'obtention des données nécessaires. Ceux-ci sont développés dans Audiosculpt et OpenMusic. Au final, ces outils pourraient aboutir à une application dédiée. Ce projet, qui en est à son début, est réalisé dans le cadre d'une collaboration entre le groupe de recherche Mus3 et le centre de recherche NICS, au Brésil, et l'IRCAM, en France, et reçoit l'apport financier du CNPQ au Brésil.

1. UNE PROCEDURE POUR L'ANALYSE DE L'ORCHESTRATION

Le processus de « désymbolisation » des instruments de l'orchestre, entamé au début du XIXe siècle, en particulier par Berlioz ([20]:63), a contribué à l'intégration définitive des stratégies d'orchestration aux dimensions structurantes de la composition. Mon objectif est d'établir, au moyen d'applications expérimentales sur divers répertoires, une procédure d'analyse qui permettrait d'évaluer l'impact de ces stratégies sur la structure ou sur l'expression musicales. En effet, si le développement de logiciels d'aide à l'orchestration a commencé à mettre récemment à la disposition du compositeur plusieurs produits fonctionnels [4, 19], la littérature n'a encore apporté que très peu de propositions qui satisfassent à une approche analytique systématique de l'utilisation de ressources orchestrales pour l'expression de la forme. Tout ce que nous disposons sur ce sujet fournit, au mieux, quelques bons indices [2, 7, 10, 12, 22], ou consiste en des approches limitées ou trop simplistes [5, 9]. Ma contribution ne se situe pas au niveau d'un logiciel dédié, tout au moins pour l'instant; elle propose un cadre méthodologique, et quelques outils informatiques dans l'environnement *OpenMusic*, dont le but est d'aider le

musicologue dans l'organisation des données pertinentes et l'appréciation de leur fonctionnalité.

La figure 1 reproduit l'organigramme de la procédure envisagée. La terminologie anglophone en sera conservée dans la description qui suit. Dans ce modèle, l'orchestration est évaluée à partir de deux points de départ. D'un côté – *Score Analysis* – on recense les prescriptions consignées par le compositeur dans la partition, en comptabilisant les diverses combinaisons instrumentales (*Local Sonic Setup* ou LSS) utilisées au cours de l'œuvre et en les qualifiant en fonction de leur organisation interne.

D'autre part – *Sound Analysis* –, les fichiers audio de ces mêmes LSS sont auscultés au moyen de descripteurs ad hoc afin de jauger l'effet concret des prescriptions, et de voir jusqu'à quel point leur impact sur la forme en est le reflet.

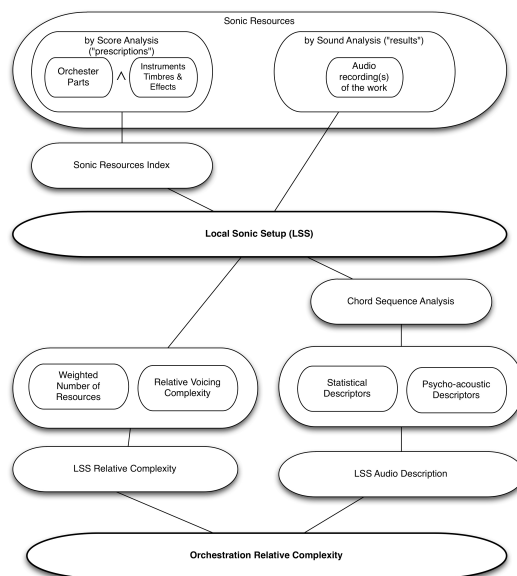


Figure 1. Organigramme du modèle d'analyse de l'orchestration.

En d'autres termes, il s'agit d'aborder l'objet d'étude en même temps au niveau prescriptif du code écrit et au niveau concret de sa réalisation sonore, deux angles d'approche dont on pressent que la convergence et synchronie ne seront pas toujours au rendez-vous. L'objectif est de rendre le modèle capable de supporter ces éventuelles dichotomies comme intrinsèques à la

dimension orchestration, étant donné que l'infinité d'impondérables qui peuvent intervenir dans la réalisation d'une œuvre pour orchestre en situation de concert n'a jamais inhibé les compositeurs dans leur volonté de fixer sur le papier les moindres détails de l'exécution, comme si ceux-ci fussent aussi objectifs et stables qu'une indication métronomique.

Pour illustrer cet exposé, j'ai choisi un fragment de la 5e Symphonie de Beethoven (1807), précisément la transition qui relie la fin du 3e mouvement (à partir de la m. 237) au début du 4e mouvement (m.1-4). Cet extrait me semble caractéristique de l'importance du rôle de l'orchestration dans la gestion de la tension dramatique chez ce compositeur. En effet, il part d'un presque rien sonore (Figure 2) pour aboutir progressivement à un colossal tutti orchestral, sans précédent à l'époque pour une symphonie (Figure 3). Cette transition provoque comme une suspension thématique et temporelle dans laquelle règne la fragmentation sonore. C'est pourquoi elle m'a paru offrir un excellent terrain d'expérience.

Figure 2. Beethoven, Symphonie n°5. IIIème mouvement, m. 231-239.

Figure 3. Beethoven, Symphonie n°5. IVème mouvement, m. 1-4.

2. SCORE ANALYSIS : EVALUATION DE LA COMPLEXITE RELATIVE DES CONFIGURATIONS INSTRUMENTALES

Le premier volet du modèle, qui analyse les prescriptions compositionnelles, a été décrit récemment en détail [18]. Je ne vais qu'en résumer ici l'essentiel.

L'œuvre (ou le fragment) est découpée en une séquence de "configurations instrumentales locales" (*Local Sonic Setup*). Ces configurations sont considérées comme des sous-ensembles de l'ensemble des instruments, techniques de jeu et effets que le compositeur utilise dans l'œuvre – ce que j'appelle les "ressources sonores" (*Sonic Resources*), dont on aura préalablement établi un *Index* complet (Figure 4). Sur un vecteur du simple au complexe, plus une configuration s'approche de l'ensemble, plus elle sera dite "complexe" et recevra un poids proche de (1.0)¹.

Cette quantification (*Weighted Number of Resources*, ou WNR) est ensuite qualifiée par un composant appelé *Relative Voicing Complexity* (RVC), qui évalue la manière par laquelle les ressources sonores sont combinées dans chaque setup en des flux plus ou moins indépendants. Je prends comme base une relecture de la Théorie des Partitions par Gentil-Nunes [11], ainsi que le modèle d'analyse des textures de Wallace Berry [2]. Plus les ressources sont "agglomérées" (homophonie, homorythmie, ...), plus le *Voicing* est considéré comme "simple"; et plus elles sont "dispersées", "complexe". RVC agit alors comme un modulateur de WNR, c'est-à-dire qu'il en modifie la pondération initiale dans une proportion qui va de zéro à un maximum fixé par l'utilisateur. D'une manière générale, on peut s'attendre à observer une plus grande indépendance des parties instrumentales (pondérations plus élevées de RVC) chez un Webern que chez Mozart, par exemple, mais, par contre, il est probable que les configurations locales des symphonies de ce dernier soient plus fournies (WNR plus élevé) que celles du compositeur sériel².

On obtient en synthèse une évaluation globale du setup appelée *Local Sonic Setup Relative Complexity*. Une feuille de calcul *Excell* (Figure 4) et un patch *OpenMusic* (Figure 5) facilitent ces opérations, encore que la collecte des données de base doive se faire à la main et à l'œil, si je puis dire, car un fichier numérique ou encodé en MIDI de la partition est de peu de secours pour ces finalités. Un graphique (Figure 6) montre l'évolution de la complexité relative des setup de l'extrait de la Symphonie de Beethoven.

¹ Je reviens sur la notion de *complexité relative* plus avant.

² A propos de cet aspect de l'orchestration de Webern, cf. [17, 18, 21].

	A	B	C	D	E
1	SRI bars->	237	242	246	252
2	piccolo				
3	flauto I				
4	flauto II				
5	Oboe I				
6	Oboe II				
7	Clarinetto I		1		
8	Clarinetto II		1		
9	Fagotto I		1	1	1
10	Fagotto II		1		
11	Contrabaf.				
12	Corno I		1		
13	Corno II		1		
14	Tromba I				
15	Tromba II				
16	Trombone Alt				
17	Trombone Ten				
18	Trombone Bs				
19	Timp.				
20	Violino I arco				
21	Violino I pizz				1
22	Violino II arco				
23	Violino II pizz				1
24	Viola arco				
25	Viola pizz				1
26	Cello arco	1	1		
27	Cello pizz			1	1
28	CB arco	1	1		
29	CB pizz				
30	LSS	2	8	2	8
31	WNR	0,21	0,52	0,21	0,48
32	Relative Voicing Comp	0,08	0,54	0,08	0,73
33	Setup Rel Complexit	0,22	0,82	0,22	0,66

Figure 4. Vue partielle de la feuille de calcul Excell pour le relevé et l'analyse des *Local Sonic Setup*. La colonne de gauche constitue l'*Index des Ressources Sonores* (SRI) utilisées dans la 5e Symphonie. Les setup (disposés sur l'axe horizontal) sont étiquetés par le numéro de mesure où ils commencent.

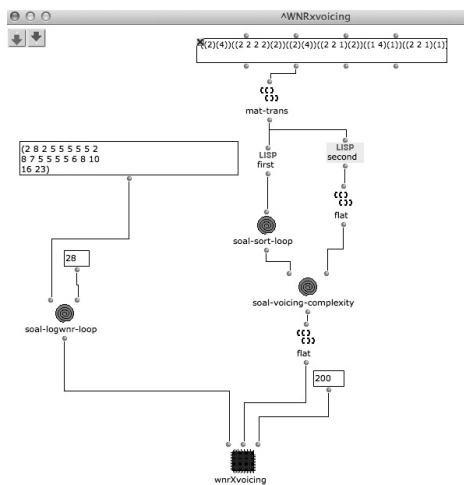


Figure 5. Premier niveau du patch *OpenMusic* pour le relevé et l'analyse des *Local Sonic Setup*.

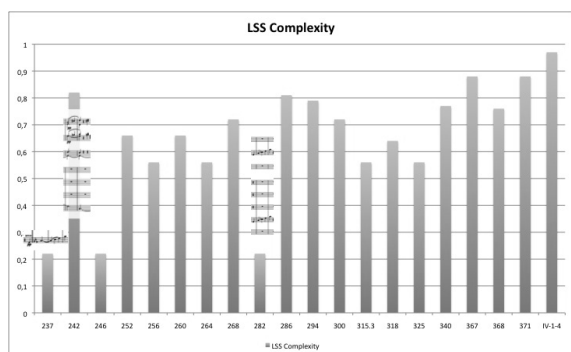


Figure 6. Histogramme de l'évolution de la complexité relative des *Local Sonic Setup* dans l'extrait de Beethoven. Les données sont étiquetées par le numéro de mesure.

3. SOUND ANALYSIS : ANALYSE DU RESULTAT SONORE DES PRESCRIPTIONS ECRITES

3.1. Préparation du matériel audio

Le découpage de la partition en unités sonores consistantes du point de vue de l'orchestration, expliqué ci-dessus, doit être reproduit à l'identique pour le fichier audio de l'œuvre, ceci afin d'analyser comment et jusqu'à quel point se concrétisent les prescriptions écrites, et d'évaluer les convergences et divergences entre l'une et l'autre³. Cette tâche peut être automatisée grâce à la fonction *Generate Markers* disponible dans le logiciel *Audiosculpt*⁴. La programmation adéquate des paramètres du générateur exige quelques essais et dépend en tout état de cause de l'œuvre et de son enregistrement. Selon mon expérience, la segmentation par *Positive Spectral Differencing* détecte très finement les changements d'énergie, lesquels, en règle générale, correspondent aux changements de sonorités, c'est-à-dire de *setup*. On ajuste ensuite manuellement les marqueurs qui ne seraient pas placés exactement où on le souhaite – une attaque synchrone sur la partition peut ne pas l'être autant dans le monde réel de sa réalisation acoustique –, on ajoute les segments que la partition induit mais qui sont passés inaperçus à la détection (ou on reparamètre la fonction pour qu'elle les reconnaisse), on retranche ceux qui ne correspondent pas à la segmentation préétablie – à moins que l'on ne préfère les incorporer au découpage original (et revenir à l'étape antérieure).

L'étape suivante, toujours dans *Audiosculpt*, utilise la fonction *Chord Sequence Analysis* et sa méthode de calcul du spectre moyen (*Average Spectrum*). *Audiosculpt* entend par « accord » un groupe de partiels et d'amplitudes normalisés, dont le début et la fin sont déterminées par les marqueurs. L'analyse calcule la moyenne du spectrogramme sur le segment et fait coïncider un partiel à chaque pic [8]. J'ai utilisé, pour la musique d'orchestre, un nombre maximum entre 40 et 60 partiels, et un seuil d'amplitude de -70 dB ou lié au sonogramme. Les résultats de l'analyse (comme celle représentée Figure 7) sont sauvegardés, d'une part sous forme d'une collection de petits fichiers audio dont chacun correspond à un segment, donc à un LSS, et d'autre part sous forme d'un fichier unique SDIF. C'est ce matériel qui va être requis pour l'analyse de l'orchestration proprement dite, dans *OpenMusic*.

³ C'est aussi par ce moyen que l'on pourra analyser divergences entre enregistrements différents de la même oeuvre.

⁴ *Audiosculpt* n'est bien sûr pas le seul logiciel sur le marché à proposer une génération automatique de marqueurs. Mais ce sont les fonctionnalités complémentaires auxquelles je fais appel qui le rendent préférable pour mon projet.

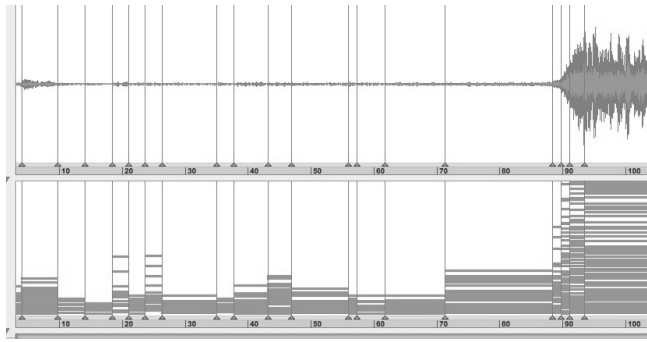


Figure 7. Une capture d'écran d' *Audiosculpt* montrant, fenêtre du bas, les résultats de la *Chord Sequence Analysis by Average Spectrum*, pour le même extrait de Beethoven. Les LSS sont identifiés par les marqueurs verticaux, et chaque ligne horizontale correspond à un des partiels détectés par l'analyse.

3.2. SOAL et l'analyse de l'orchestration

Dans le cadre de mon projet d'analyse de la musique à partir du concept de *sonorité* [13, 14, 15], j'ai été amené, avec mon groupe de recherches *Mus*³ et en convention avec l'IRCAM, à développer une bibliothèque dédiée pour *OpenMusic*, *SOAL* (pour *Sonic Object Analysis Library*) [16]⁵. Le concept-clé de la bibliothèque est la segmentation de l'œuvre en une séquence d'*unités sonores composées* (*sonic object* dans le jargon de *SOAL*) ([15]:37 *et sq.*) et d'analyser l'évolution de celles-ci au cours de l'œuvre par divers descripteurs (appelés *composants*) de leurs caractéristiques « hors-temps » et « en-temps ». Ces composants sont, pour la plupart, d'ordre statistique: densités, ambitus, modes de distribution « spatiale » et temporelle des sons, entropie relative, entre autres. La règle pour l'évaluation de l'importance d'un composant donné est le calcul de son taux de *complexité relative*. Celle-ci établit un poids maximum (1.0), qui correspond à la configuration musicale qui rendrait la sonorité la plus "complexe" possible, dans le domaine du composant. Les configurations observées sont donc calibrées sur un vecteur de simplicité/complexité relative⁶. Cette règle de relativité universelle est fondamentale (tous les composants doivent pouvoir se soumettre à cette normalisation) pour le succès de l'analyse, car c'est le seul moyen de comparer et manipuler des paramètres musicaux hétérogènes, dont les qualités intrinsèques ne sont pas comparables ([15]:40 *et sq.*).

Programmé d'abord exclusivement pour l'analyse de fichiers MIDI, l'interface de lecture *soal-reader* a évolué et accepte depuis, entre autres, les fichiers au format SDIF. En fait, les données transmises par le format SDIF sont converties internement au format MIDI avant

d'être traitées, ce qui permet de tirer profit des fonctions développées jusqu'alors pour le MIDI. Le *midicent*, qui est l'unité standard pour la codification des hauteurs dans *OpenMusic*, permet une transcription suffisamment approchée des fréquences exprimées en Herz (sans passer par une normalisation chromatique). Les autres conversions (time en onsets, amplitudes linéaires en *velocity*) se font aussi sans perte significative d'informations.

Parmi la collection de fonctions analytiques proposée par *SOAL*, un certain nombre peut déjà fournir des informations pertinentes pour notre objectif, soit en l'état, soit adaptées ou incluses dans un patch approprié. Je ne vais pas redécrire ici ces fonctions, encore moins leurs algorithmes, puisque ces informations sont disponibles depuis longtemps en ligne⁷. Je vais plutôt mettre l'accent sur la contribution qu'elles peuvent apporter à une compréhension de la fonction de l'orchestration sur la forme.

L'analyse réalisée par *Audiosculpt* retient pour chaque setup un certain nombre de partiels. *SOAL* peut extraire de cela des séries de données, toutes normalisées sur le vecteur simplicité-complexité et qui, une fois transposées visuellement (graphes, histogrammes...), donnent une image de l'évolution de l'impact de l'utilisation des ressources sonores sur la forme en fonction: (1) du nombre de partiels par setup; (2) de la densité relative de partiels par setup; (3) de la distribution de ces partiels le long du spectre, sur un vecteur où la distribution la plus harmonique est pondérée comme la plus "simple"; (4) de l'ambitus relatif – c'est-à-dire la distance observée entre les premier et dernier partiels – de chaque setup; (5) de la manière dont les partiels se répartissent le long du spectre, donnant si nécessaire un relevé du nombre de partiels pour chaque bande de fréquence choisie, et une pondération des setup en fonction du registre des bandes occupées⁸; (5) de l'amplitude moyenne relative de chaque setup; et, si pertinent dans le contexte, (6) de la durée relative de chaque setup.

A titre d'exemple de la fonctionnalité de ces descriptions, la Figure 8 met en corrélation l'évolution des LSS telle que déjà montrée Figure 6, avec celle des densités relatives et de la « linéarité » relative. Pour cette dernière, il faut noter que les pondérations les plus basses indiquent une structure spectrale qui tend à l'harmonicité, comme c'est le cas du dernier LSS, qui correspond au tutti en Do Majeur du début du 4e mouvement de la symphonie. La figure 9 est une capture d'écran du patch *OpenMusic* montrant le fonctionnement de *SOAL* à partir du fichier SDIF de Beethoven.

⁷ Ainsi que, pour les plus anciennes, dans [13].

⁸ Ces bandes de fréquences et ces pondérations sont définies par l'utilisateur. On peut penser qu'une analyse peut souhaiter pondérer plus lourdement les setup possédant une majorité de fréquences très graves ou très aiguës, par exemple, à cause de leur gros impact sur la complexité sonore globale.

⁵ Accessible, avec sa documentation, sur: www.ccta.ufpb.br/mus3.

⁶ Pour la densité, par exemple, le vecteur circulera du *vide* au *saturé*.

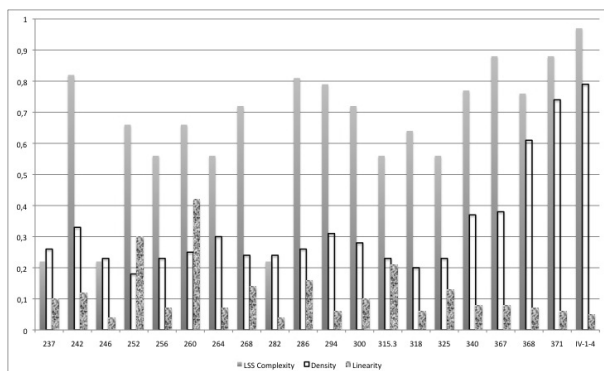


Figure 8. Une analyse de l'extrait de Beethoven par deux descripteurs de SOAL.

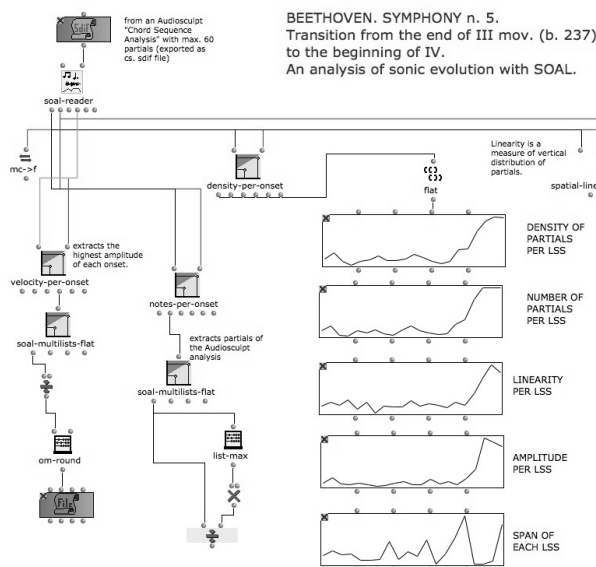


Figure 9. Patch *OpenMusic* montrant l'analyse de Beethoven avec SOAL.

3.3. Un réseau de descripteurs psycho-acoustiques

Outre les descripteurs d'ordre statistique énumérés ci-dessus, il est fondamental d'aborder également l'analyse de l'impact de l'orchestration à partir d'un où plusieurs descripteurs psycho-acoustiques. Comme l'a déjà bien montré Philippe Lalitte dans son analyse de la *Sequenza VII* de Berio, « l'extraction d'informations sub-symboliques opérée par les descripteurs psychoacoustiques offre la possibilité d'approcher la perception de plusieurs dimensions musicales telles que le temps [...], la hauteur (rugosité, saillance, [...], etc.) et le timbre (brillance, inharmonicité, enveloppe, clarté spectrale, etc.) » ([24]:116). Une des bibliothèques la plus connue et peut-être la plus ample est celle développée par l'Université Queen Mary de Londres, pour le logiciel *Sonic Vizualizer* [6]⁹. Un grand nombre d'entre eux peut se montrer adéquat pour mettre en

évidence le domaine du timbre que l'orchestration du compositeur affecte le plus, ou celui qui offre le plus de saillance à la perception. Le problème réside en fait dans la quantité de descripteurs disponibles, et l'hétérogénéité des informations produites. En effet, il est important de garder à l'esprit que le concept de base d'un descripteur est d'« aplatir » un composant multi-dimensionnel, le timbre, sur une seule dimension. En d'autres termes, chacun opère une réduction orientée du signal, en fonction de l'information qu'il est censé retourner. Par conséquent, aucun n'est capable, tout seul, de fournir l'ensemble des informations que nous souhaitons. L'idée est donc de constituer un réseau modulable de descripteurs auxquels il serait fait appel en fonction des contextes, et normaliser leurs résultats sur le même vecteur de complexité relative auquel ont été soumis les autres composants du modèle. L'avantage de cette formulation est qu'elle peut produire une vision plus synthétique, plus hollistique, du comportement des configurations sonores sur le temps. En effet, il ne s'agit pas tant de qualifier les setups dans l'absolu, mais plutôt d'évaluer le degré de différence, ou distance, entre un setup et l'autre, dans un domaine donné.

3.4. Un descripteur psycho-acoustique experimental: *Formantic Centroid*

Plusieurs descripteurs ont déjà été, ou sont, testés par notre groupe de recherche sur plusieurs œuvres, avec des résultats dont la pertinence varie en fonction du contexte musical, et, surtout, de ce que l'on cherche à mettre en évidence. Un des plus connus est la *Spectral Centroid*. De nombreuses études ont déjà qualifié ce descripteur comme étant un bon outil pour l'analyse musicale, étant donné sa forte corrélation avec la perception de la brillance du son (cf. [23, 25, 26]). Comme on le sait, il indique où se situe le « centre de gravité » du spectre. Une manière simple de le décrire consiste à dire que la centroïde spectrale est le résultat de la moyenne des fréquences d'un spectre, de la plus grave à la plus aiguë, pondérée par leurs amplitudes respectives..

Le problème de cette formule est que cette moyenne arithmétique peut définir un point sans existence physique réelle dans l'objet observé. Il est possible aussi que par ce calcul, malgré la pondération exercée par les amplitudes, la toujours grande quantité de fréquences aiguës biaise un peu la réalité perceptive de l'objet sonore, en poussant irréallement les moyennes vers le haut du spectre. Il semble donc permis de penser qu'une sélection préalable des fréquences les plus proéminentes pourrait engendrer une corrélation plus fine avec la perception. Or, les fréquences les plus saillantes d'un spectre se regroupent en ce que l'on appelle des *formants*, qui sont le résultat de pics d'énergie dans une région plus ou moins étroite du spectre [8]. D'où il semble logique qu'un calcul de la centroïde des formants puisse mieux décrire la brillance de certains complexes sonores. Nous avons donc élaboré une fonction qui opère ce calcul, *Formantic Centroid*, que nous avons

⁹ Mais voir aussi [1, 3], entre autres.

implémentée dans *OpenMusic* (Figure 10) de manière à faciliter son inclusion dans le modèle d'analyse de l'orchestration¹⁰. Cette inclusion implique entre autres une normalisation sur le vecteur de complexité relative, pour laquelle il est nécessaire de fixer une valeur paradigmatique maximum. Pour celle-ci, j'ai adopté la Formant Centroid d'un bruit blanc (10.922,781 Hz), que l'on peut considérer comme le son le plus complexe dans ce domaine. On obtient alors, par factorisation, la *Relative Formant Centroid* (RFC) de chaque setup.

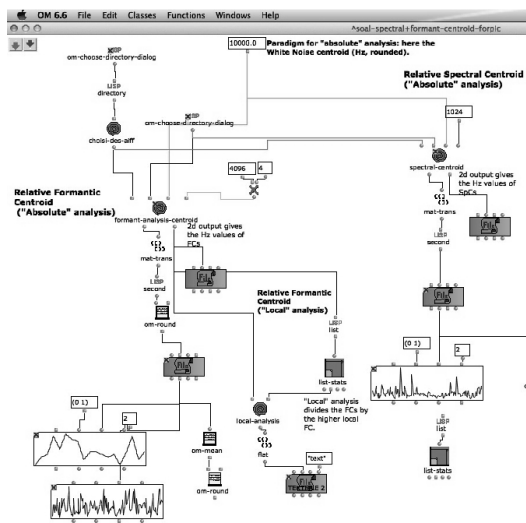


Figure 10. Le patch *OpenMusic* pour l'analyse comparée de la *Spectral Centroid* et de la *Formant Centroid*. *Absolute Analysis* correspond à la normalisation des valeurs sur une échelle où celle du bruit blanc est le maximum. *Local Analysis* prend comme paradigme l'unité locale possédant la plus haute valeur.

RFC doit encore passer par une batterie de tests, y compris en comparaison avec la centroïde spectrale conventionnelle. Au cas où elle s'avère réellement fonctionnelle dans certains contextes, sa description détaillée fera l'objet d'une publication en temps opportun.

Pour l'heure, la figure 11 montre l'évolution de la RFC pour le même extrait de Beethoven, mise en relation avec celle obtenue par le calcul de la *Relative Spectral Centroid* (c'est-à-dire le calcul standard calibré sur l'échelle de complexité relative à partir du bruit blanc), ce qui permet de constater que les deux descripteurs retournent des évaluations différentes. Dans la plupart des cas (les exceptions sont les LSS 367 et 368), RFC retourne des pondérations inférieures au calcul standard, ce qui signifie qu'elle tend à rebaisser la centroïde vers des fréquences plus graves¹¹. Il reste donc

à étudier si cette rectification traduit mieux la réalité de la perception des timbres orchestraux.

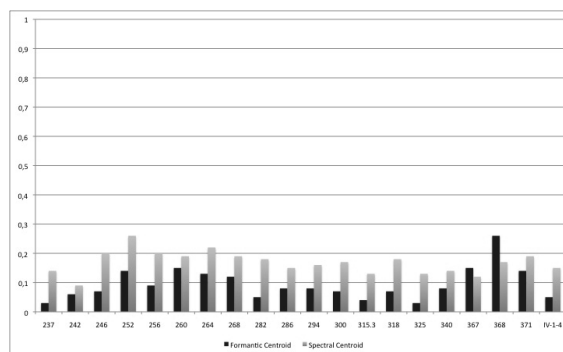


Figure 11. Le même extrait de Beethoven analysé par deux formules de calcul de la centroïde.

4. CONCLUSION

Cet exposé a montré l'ossature d'un modèle pour l'analyse de l'orchestration. Celle-ci constitue une sorte de guide pour le développement, non seulement d'une méthode et de ses outils informatiques d'appui, mais aussi, simultanément, d'une théorie. S'agissant d'une dimension encore peu formalisée dans le domaine de l'analyse musicale, j'ai choisi une méthode empirique, qui consiste à tester systématiquement les composantes du modèle sur des œuvres tenues pour exemplaires, pour juger de leur éventuelle validité. Le but est de parvenir le plus tôt possible à un modèle assez cohérent – encore que toujours perfectible, bien évidemment – pour produire des résultats musicologiquement pertinents sur certains corpus d'œuvres, au sujet desquelles on sait le rôle fondamental de l'orchestration sans pour autant être en mesure de l'explicitier plus rigoureusement. Illustrations, figures et tableaux

5. REFERENCES

- [1] Bogdanov, D. *et al.* « Essentia: An Audio Analysis Library For Music Information Retrieval », *Proceedings of 14th International Society for Music Information Retrieval Conference, Curitiba, ISMIR 2013*, p. 493-498.
- [2] Berry, W. *Structural functions in music*, Dover, New York, 1987.
- [3] Cabrera, D., *et al.* « PsySound3: an integrated environment for the analysis of sound recordings », *Acoustics 2008: Proceedings of the Australian Acoustical Society Conference, Geelong, 2008*.
- [4] Carpentier, G. "Aide logicielle à l'orchestration: Un état des lieux". *Musimediane*, 2011, n. 6. <http://www.musimediane.com/spip.php?article134>.
- [5] Cogan, R. *New Images of Musical Sound*, Harvard University Press, Cambridge, 1984.

¹⁰ Je remercie Mikhail Malt pour sa contribution dans le développement de cette fonction.

¹¹ Puisque le paradigme de complexité maximum est le bruit blanc à 10.922 Hz (valeur (1,0) de l'échelle), la hauteur des histogrammes indique donc la hauteur relative de la fréquence de la centroïde.

- [6] Cook, N.; Leech-Wilkinson, D. *A Musicologist's guide to Sonic Visualiser*, King's College, London, 2009.
- [7] Dalbavie, M.A. « Pour sortir de l'avant-garde », *Le timbre, métaphore pour la composition* (Barrière, J.B., org.), Christian Bourgois, Paris, 1991, p. 303-334.
- [8] Diatkine, C. *Audiosculpt 3.0 User Manual*, IRCAM, Paris, 2011. <http://support.ircam.fr/docs/AudioSculpt/3.0/co/AudioSculptguideWeb.html>.
- [9] Dolan, E. I. *The Orchestral Revolution. Haydn and the Technologies of Timbre*, Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- [10] Erickson, R. *Sound structure in music*, University of Chicago Press, Berkeley, 1975.
- [11] Gentil-Nunes, P. *Análise particional: uma mediação entre composição musical e a teoria das partições*, Thèse de Doctorat. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [12] Goubault, C. *Histoire de l'instrumentation et de l'orchestration*, Minerve, Paris, 2009.
- [13] Guigue, D. *Une Etude 'pour les Sonorités Opposées' – Pour une analyse orientée objets de l'oeuvre pour piano de Debussy et de la musique du XXe siècle*, Atelier National de Reproduction des Thèses, Lille, 1997.
- [14] _____, et al. « SOAL For Music Analysis : A Study Case With Berio's Sequenza IV », *Actes des JIM05 — Journées d'Informatique Musicale*, CICM, Paris, 2005. <http://jim2005.mshparisnord.org/articles.htm>.
- [15] _____ *Esthétique de la Sonorité. L'héritage de Debussy dans la musique pour piano du XXe siècle*, L'Harmattan, Paris, 2009.
- [16] _____ *Sonic Object Analysis Library – OpenMusic Tools For Analyzing Musical Objects Structure*. Software Documentation. *Mus³*, João Pessoa, 2010. <http://www.ccta.ufpb.br/Mus3.est>
- [17] _____ « Diário de bordo. Webern, Variações para orquestra op. 30 », *IV. Seminário Ciência Música Tecnologia: Fronteiras e Rupturas*, São Paulo, ECA/USP, 2012. <http://www2.eca.usp.br/smct/ojs/index.php/smct/issue/view/6> (visité en 07/2013).
- [18] _____ . « Une méthode d'analyse de l'orchestration: rapport de recherche appliquée aux Variations op. 30 de Webern », *Actes des Journées d'Analyse Musicale*, Société Française d'Analyse Musicale, Rennes, 2013 (sous presse).
- [19] Hummel, T. *conTimbre*. Software documentation. 2014. http://www.contimbre.com/index.php?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=82&lang=en.
- [20] Kaltenecker, M. « Confiture de neige. Le bruit dans la musique du 19^e siècle, entre discours esthétique et pratique instrumentale », *Analyse Musicale*, n° 56, p. 60=72, 2007.
- [21] Kim, J. *Représentation et analyse musicale assistée par base de données relationnelle de la partition des Variations pour orchestre op. 30 d'Anton Webern*. Thèse de Doctorat, Université de Paris-IV-Sorbonne, Paris, 2007.
- [22] Koechlin, Ch. *Traité de l'Orchestration*, Max Eschig, Paris, 1954.
- [23] Lalitte, P. « Densité 21,5 de Varèse : un condensé d'harmonie-timbre » in: Horodyski, T. & Lalitte, P. *Edgard Varèse. Du son organisé aux arts audio*, L'Harmattan, Paris, 2008, p. 245-277.
- [24] _____ . « Du son au sens : vers une approche sub-symbolique de l'analyse musicale assistée par ordinateur. » *Musurgia*, Vol. XVIII, p. 100.116, 2011.
- [25] Maia, I. L.; Schaub, S. « Analyzing textural progressions in Iannis Xenakis's Aroura (1971) for twelve strings - Some Preliminary Results. », *XXII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Música (ANPPOM)*, João Pessoa, ANPPOM, Vol. 1, p. 496-503, 2012.
- [26] Malt. M., & Jourdan, E. « Le « BStD – une représentation graphique de la brillance et de l'écart type spectral, comme possible représentation de l'évolution du timbre sonore. » in: Hashner, X., & Ayari, M. *L'analyse musicale aujourd'hui, crise ou (r)évolution?* Université de Strasbourg/SFAM, Strasbourg, 2009 (document communiqué par les auteurs).