

## Traité Signal et Image

Le traité SIGNAL ET IMAGE répond au besoin de disposer d'un ensemble d'ouvrages de référence et de synthèse des connaissances et méthodes nécessaires à la maîtrise du traitement et de l'analyse des signaux et des images.

SIGNAL ET IMAGE couvre les domaines suivants pour la composante SIGNAL :

- Représentations, modélisation et décompositions des signaux
- Méthodes de traitements du signal élémentaires et avancées
- Méthodes d'optimisation, de décision et de reconnaissance basées sur les signaux

Domaines couverts pour la composante IMAGE :

- Traitement, analyse et interprétation des images
- Vision, perception
- Reconnaissance des formes
- Traitements des objets tridimensionnels

Chaque ouvrage décrit aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux. Une classification des différents chapitres contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus dans le cas d'expérimentations réelles.



[www.hermes-science.com](http://www.hermes-science.com)



Systemes d'interaction émotionnelle

Catherine Pelachaud



## Traité Signal et Image

# Systemes d'interaction émotionnelle

*sous la direction de*  
Catherine Pelachaud



*Lavoisier*

## Chapitre 10

# Musique et émotions

### 10.1. Une présence croissante de la musique dans notre société

Avec son faible coût et la simplicité des technologies de reproduction, la musique est désormais omniprésente dans notre vie quotidienne. Des transports publics aux salles de concert, théâtre, ou ascenseurs, il est difficile désormais de rester plus de deux heures sans être exposé à la musique [SLO 01]. Selon un rapport récent, le temps passé à écouter la musique surpasse le temps consacré à d'autres loisirs tels que regarder la télé ou aller au cinéma [REN 03]. Comme le suggère Zentner, pour occuper un tel espace dans nos vies humaines, la musique doit offrir une gratification exceptionnelle à ses auditeurs (*music must be uniquely rewarding to its listeners*) [ZEN 08]. Qu'est-ce que la musique a de si spécial ? Qu'est-ce qui la rend si gratifiante ?

Depuis l'Antiquité, les qualités émotionnelles induites par la musique ont été évoquées comme une possible explication. Aristote, en s'inspirant de *La République* de Platon, donne une description relativement détaillée des effets émotionnels de chacun des modes musicaux. Tandis que le mode myxolidien tend à rendre les gens tristes, le mode phrygien les rendrait enthousiastes (*Politiques*, livre VIII). Au début du XVII<sup>e</sup> siècle, Monteverdi renouait avec un style *rappresentativo* qui autorisait des libertés d'écriture (dissonance, rythme, etc.) destinées à renforcer l'expression des sentiments. Dès Platon, et en parallèle à l'évolution de la pratique musicale, la musique et les émotions ont été un des sujets de prédilection de la philosophie comme en atteste le nombre impressionnant de théories sur le sujet [BUD 85, DAV 94b, ROB 05].

---

Chapitre rédigé par Donald GLOWINSKI et Antonio CAMURRI.

Depuis près d'un siècle cependant, les théories sur la capacité de la musique à susciter, à réguler ou à altérer l'humeur et l'émotion ont été confirmées par des recherches empiriques [JUS 01, JUS 02, SCH 01a]. La majorité des études se sont d'abord concentrées sur la manière dont les auditeurs (*listeners*) perçoivent les émotions exprimées dans la musique et sur le lien entre ces émotions perçues et les paramètres sonores et musicaux [CLY 77, COO 59]. Plus récemment, des études ont exploré les situations dans lesquelles la musique révèle son pouvoir émotionnel : en laboratoire, la musique offre des moyens efficaces d'induction des émotions [VAS 02, WES 96] ; dans notre vie quotidienne, la musique peut être utilisée pour modifier le comportement des consommateurs [ALP 05, BRU 90] ; en termes d'applications thérapeutiques, la musique constitue un outil pour le traitement des désordres affectifs (*emotional disorder*) [GOL 04]. Ce pouvoir émotionnel de la musique se vérifie par ailleurs dès le plus jeune âge : Zentner et Kagan ont observé des réactions émotionnelles à la musique chez des nourrissons de 4 mois [ZEN 96, ZEN 98]. Enfin, l'intensité du plaisir procuré par la musique n'aurait rien à envier à celui procuré par d'autres sources de plaisirs plus « terre à terre ». Blood, Zatorre, Menon ou Levitin ont relevé que les régions cérébrales activées par les émotions ressenties à l'écoute de la musique sont similaires à celles activées par des gratifications intenses telles que le sexe, la nourriture et les drogues [BLO 01, MEN 05]. Ces études confirment que la musique est généralement appréciée en raison de la récompense émotionnelle qu'elle procure à ses auditeurs [ZEN 08].

Ce rôle central des émotions dans la musique peut expliquer l'intérêt qu'elle suscite dans le développement de nouvelles interfaces informatiques, et en particulier, des interfaces dites « émotionnelles » [PIC 97]. En effet, la possibilité d'employer la musique pour influencer les réactions émotionnelles ou *vice versa*, la possibilité de modéliser les réactions émotionnelles de l'utilisateur pour modifier en temps réel la musique, offrent des perspectives nouvelles d'interactions expressives avec l'ordinateur.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux systèmes informatiques (interfaces) développés ces dernières années qui autorisent le contrôle de la synthèse musicale par le biais des émotions. Nous distinguerons deux types de recherche : le premier se concentre sur la communication de certaines émotions à travers les modifications automatiques d'extraits sonores et de pièces musicales. Le second se concentre sur les possibilités d'interaction entre l'homme et le contenu musical tel qu'il est synthétisé par l'ordinateur. Nous nous attacherons à rendre compte des théories et des modèles des émotions qui ont contribué à élaborer ces nouvelles interfaces musicales. Précisons que nous retenons de l'émotion deux aspects essentiels qui font l'objet d'un consensus dans la communauté scientifique : (i) l'émotion est une réaction à des événements qui sont considérés comme pertinents par rapport aux besoins, aux buts, ou à l'intérêt de l'individu, (ii) l'émotion intègre des composants physiologiques, comportementaux et cognitifs [IZA 77].

## 10.2. Reconnaissance des émotions et caractéristiques structurelles de la musique

Les émotions reconnues dans un morceau de musique ont deux sources : le compositeur et l'interprète. Cependant la perception et le déclenchement d'une émotion par la musique dépendent de multiples facteurs en interaction : les paramètres sonores, le spectateur, la performance, et le contexte [SCH 01a]. Le premier de ces facteurs (paramètres sonores) est celui, qui de loin, a été le plus étudié et a donné l'occasion de plusieurs implémentations réussies. Nous présentons les méthodes employées pour établir une relation entre la reconnaissance des émotions et les paramètres sonores ainsi que les résultats obtenus et leur utilisation dans la conception de modèles computationnels.

### 10.2.1. Comprendre les réactions émotionnelles des auditeurs

La méthode communément employée consiste à faire écouter une œuvre musicale à des participants, et à reporter ensuite leurs impressions dans un questionnaire. Les réponses peuvent prendre la forme d'un (i) commentaire libre, (ii) du choix d'un terme dans une liste d'émotions, (iii) de l'évaluation du bien-fondé d'un terme pour décrire la musique en question. Ce type de recherche a révélé de nombreux éléments sur les aspects sonores qui modifient la réponse émotionnelle de l'auditeur à la musique. Ces éléments sont liés à la partition (*score features*) : la hauteur (aigu/grave), les intervalles (court/étendu), l'harmonie (consonant/dissonant), la pulsation (régulière/irrégulière). La dynamique de ces éléments sonores est aussi considérée et elle dépend en grande partie de l'interprétation instrumentale (*performance features*) : les accents rythmiques, l'articulation (*staccato/legato*), les variations du timbre (richesse spectrale, modes d'attaque, etc.) (pour une revue détaillée [GAB 01b]).

Précisons qu'un nombre majeur d'études se concentre sur la *perception* qu'ont les auditeurs des émotions. Or Sloboda souligne justement qu'il est possible d'émettre un jugement sur la base de caractéristiques conventionnelles sans pour autant éprouver l'émotion considérée [SLO 01]. De plus, Kallinen *et al.* relèvent que des émotions perçues comme négatives par l'auditeur peuvent aussi être ressenties comme positives [KAL 05]. Cependant, de récentes études en laboratoire ont comparé la perception et l'induction des émotions en employant des extraits musicaux inconnus aux participants. Ces études montrent que les émotions évoquées sont en majorité similaires aux émotions perçues [SCH 07, KAL 06].

Cette recherche fondée sur l'examen des commentaires subjectifs a révélé qu'un grand nombre des paramètres sonores décrits précédemment seraient présents dans les modulations vocales que nous utilisons pour émouvoir. L'examen de cent quarante-deux articles scientifiques traitant respectivement de l'expression vocale (cent un articles) et de l'interprétation musicale (quarante-et-un articles) ont permis à Juslin et

Laukka d'identifier plusieurs similarités [JUS 03a]. Trois paramètres acoustiques en particulier évoluent de manière semblable dans l'expression vocale et musicale : le débit de la parole et le rythme, l'intensité vocale et l'intensité sonore augmentent pour la colère et la joie tandis qu'elles diminuent pour la tristesse et la tendresse. Enfin, l'énergie dans les hautes fréquences du spectre (une composante du timbre) augmente dans l'expression vocale et instrumentale de la joie et de la colère. Selon Juslin, cette similarité entre ces deux formes d'expressions justifie l'approche évolutionniste de la musique : les qualités expressives de la musique dériveraient des stratégies vocales développées durant l'évolution pour communiquer une émotion ou pour réguler l'état émotionnel de nos semblables (par exemple la mère et son enfant) [JUS 03b, TRA 08].

### 10.2.2. Approche catégorielle ou dimensionnelle ?

Choix méthodologique ou postulat théorique, de manière presque invariable, les termes proposés dans les questionnaires pour recueillir l'avis des auditeurs renvoient aux émotions de bases (*basic* ou *discrete emotions*) telles que la colère, la peur, la surprise, la joie ou la tristesse (approche catégorielle). Dans les autres cas, les termes se réfèrent au degré d'intensité (*arousal*) et à la positivité (*valence*) des émotions (approche dimensionnelle), deux dimensions usuelles du modèle circumplexe de Russell (*affective circumplex*) et de ses variantes [RUS 80]. Les études dans ce domaine reposent donc le plus souvent sur une approche catégorielle ou dimensionnelle de l'émotion. Comme le montrent Zentner *et al.* [ZEN 08], ces approches peuvent se révéler inadéquates pour caractériser les émotions musicalement induites. La musique semble en effet capable d'induire un bien plus grand panel d'états émotionnels que ces descripteurs sémantiques (*label*) ne le supposent. Les descripteurs sémantiques qui résultent de ces deux approches canoniques des émotions ne feraient donc pas justice des émotions suscitées par la musique. Plusieurs tentatives ont été menées pour créer des descripteurs qui soient adaptés à la situation phénoménologique particulière de l'écoute musicale [RIG 64, ASM 85]. Cependant, comme le remarque Scherer [SCH 01a], ces approches sont éclectiques par nature avec un choix de descripteurs des émotions fortement dépendants de la conception des auteurs. Une taxonomie des termes décrivant des émotions en rapport avec la musique reste à élaborer de manière empirique et systématique. Les récentes études statistiques conduites par Zentner *et al.* sur la classification par 1 393 sujets de descripteurs sémantiques en rapport avec des extraits musicaux de genres variés (classique, rock, jazz, etc.) constituent une tentative originale et préliminaire dans cette direction [ZEN 08]. Ces études mettent en évidence que des termes tels que *mélancolie* ou *enchantement* par exemple décrivent l'expérience des auditeurs mieux que les termes habituels de *tristesse* ou de *joie*.

Les études fondées sur une approche catégorielle ou dimensionnelle – largement majoritaires – ne considèrent donc pas la spécificité des émotions induites par la musique. Elles ont cependant contribué à révéler certaines caractéristiques musicales qui seraient à l'origine des réactions émotionnelles de l'auditeur.

### 10.3. Des règles pour modéliser l'expression musicale des émotions

La mise en évidence de motifs et de structures sonores et musicales caractéristiques de certaines émotions (souvent celles de base) à permis l'élaboration de modèles, la définition de règles régissant l'expression musicale des émotions et l'implémentation de systèmes de synthèse musicale expressive automatiques [GAB 03, GAB 01a, SCH 99, GAB 03, JUS 03a]. Sundberg, Friberg, Bresin et leurs collègues ont développé un système d'interprétation à base de règles (*rules-based system*), le *Director Musices-KTH rule system*, pour générer des interprétations musicales expressives [FRI 95, FRI 99, FRI 00, BRE 00, FRI 06a].

Ces règles modifient différents aspects de l'interprétation instrumentale : le phrasé par exemple. Une phrase musicale dessine habituellement un motif en arc de cercle : un début lent et doux, une accélération et une intensité renforcée en son milieu, et une conclusion lente en *diminuendo* ; la règle *phrase arch rule* modifie les caractéristiques de ce motif et détermine ainsi le parcours temporel et dynamique de la phrase [GAB 87, REP 92]. Un autre aspect de l'interprétation sur lequel agissent les règles est l'articulation. L'articulation détermine le caractère *legato* ou *staccato* avec lequel une note est jouée ; la règle *punctuation rule* sélectionne des fragments mélodiques courts, identifie la dernière note, allonge sa durée et la fait suivre d'une courte pause et renforce ou diminue la continuité mélodique du morceau. Enfin la règle *duration contrast* agit sur la durée qui sépare le début d'une note du début de la suivante. L'effet musical de cette règle est d'allonger les notes longues et de raccourcir les notes courtes, augmentant ainsi le contraste de durée entre les notes [SUN 82, FRI 91]. L'application ponctuelle de ces règles et la modification pour l'ensemble du morceau de paramètres plus généraux tels que le rythme, l'intensité sonore et l'articulation a permis à Bresin et Friberg de générer divers types d'expressions émotionnelles. Nous illustrons quatre d'entre elles dans la figure 10.1 : la joie, la tristesse, la colère et la tendresse [BRE 00].

	Joie	Tristesse	Colère	Tendresse
<b>Changements globaux</b>				
Rythme(pulsation)	rapide	lent	très rapide	lent
Niveau sonore	moyen	bas	élevé	bas
Articulation	très <i>staccato</i>	<i>legato</i>	<i>staccato</i>	<i>legato</i>
<b>Règles</b>				
Forme en arc-de-cercle de la phrase ( <i>phrase arch</i> )	resserrée	élargie	inversée	resserrée
<i>Ritardando</i> final	minimal			minimal
Ponctuation	renforcée	diminuée	moyenne	diminuée
Contraste de durée	renforcé	inversé	renforcé	

**Figure 10.1.** Valeurs suggérées des règles pour modifier l'expression émotionnelle de la synthèse musicale [FRI 06b]

Ces règles de l'expressivité musicale ont été initialement élaborées pour « humaniser » les performances de l'ordinateur de partitions MIDI il y a près de 20 ans

[FRI 95, FRI 06a]. Le format MIDI largement utilisé dans le monde de l'informatique musicale a l'avantage de coder une série d'information relative au jeu musical, mais il n'intègre aucune indication expressive et ses reproductions musicales semblent « mécaniques ». Le modèle développé par Friberg *et al.* désormais utilisé dans plusieurs applications logicielles permet d'« animer » une partition musicale de manière automatique. La procédure d'évaluation de ces règles se déroule en quatre étapes : (i) on sélectionne et on encode au format MIDI un ensemble de morceaux, le plus souvent empruntés au répertoire de musique classique occidentale ou alors à des musiques populaires de jeux vidéo [LIV 07] ; (ii) on diffuse auprès des participants le morceau sous une forme « neutre » sans aucune tonalité expressive ; (iii) dans les écoutes successives, le morceau est reproduit après avoir subi plusieurs modifications qui résultent de l'application des règles du modèle ; (iv) les participants doivent catégoriser les reproductions en fonction des nuances expressives qu'ils ont reconnues.

Par delà son utilité pratique – rendre expressives des partitions informatisées, l'application de ces règles illustre le succès d'une méthode d'*analyse-par-synthèse* qui se révèle efficace pour vérifier comment certains paramètres musicaux déterminent l'émotion qui est perçue ou ressentie [GAB 85, POL 04, CAN 04].

#### 10.4. Vers une mesure continue des réactions émotionnelles à la musique

La reconnaissance des émotions dans un contexte musical est fréquemment constatée par le biais de questionnaires. L'application de cette technique, standard en psychologie, peut conduire à ne pas considérer la nature profondément temporelle de la musique [MEY 56, MEY 67] et à ignorer la possibilité que l'émotion puisse varier durant l'écoute d'une même pièce musicale. Des procédures alternatives ont été développées pour permettre une mesure continue des réactions émotionnelles des sujets [NIE 83, SCH 01b].

Nelson a en particulier développé une technique de recherche qui consiste à enregistrer les tensions ressenties par un candidat au fur et à mesure qu'il écoute une œuvre musicale. Le participant doit, tout en écoutant la musique, appuyer sur des leviers avec une force comparable à la tension ressentie – plus il ressent de tension, plus il appuie avec force, et il relâche la pression lorsque la tension semble diminuer.

Plusieurs expériences ont contribué à imposer la mesure de la tension comme une technique de référence pour évaluer les émotions dans un contexte musical. Madsen et Fredrickson [MAD 93] ont analysé les corrélations entre une mesure continue de la tension et les jugements esthétiques des participants à l'écoute d'une œuvre classique (en l'occurrence, le premier mouvement de la symphonie n° 104 de Haydn) [MAD 93]. Leur étude a confirmé que la tension peut être considérée comme un attribut global de l'expérience musicale. Des facteurs musicaux de la tension ont été identifiés : la tessiture, la dynamique, l'intensité, les relations harmoniques et les attentes implicites

fondées sur l'expérience que chacun acquiert dans un genre musical [BIG 06, KRU 96, MEY 56]. L'âge, le niveau de compétence musicale et le niveau de familiarité avec le stimulus musical des participants conditionneraient aussi l'évaluation de la tension [VIN 06].

Krumhansl a par la suite observé que le jugement de la « force de l'émotion » était significativement corrélé avec l'évaluation de la tension [KRU 97a]. Son étude consistait à faire écouter plusieurs morceaux de musique caractéristiques de trois émotions de base, la tristesse (l'*Adagio* d'Albinoni), la peur (*La nuit sur le Mont Chauve* de Moussorgsky), et la joie (Le printemps des *Quatre Saisons* de Vivaldi) et à demander aux auditeurs d'ajuster la position d'un curseur sur l'ordinateur pour décrire combien la force de l'émotion variait dans le temps à l'écoute du morceau. Krumhansl a donc montré que la tension peut servir d'indice de l'émotion ressentie dans une pièce musicale. Krumhansl et Chapados ont par ailleurs cherché à caractériser plus finement les réactions émotionnelles des sujets lors d'une écoute musicale en corrélant cette mesure de la tension à des changements physiologiques relevant des fonctions cardiaques, vasculaires, respiratoires, et électrodermales [KRU 97a, CHA 08].

### 10.5. Multimodalité de l'expérience musicale

Que ce soit au moyen des questionnaires ou de la mesure continue de la tension, ces études ont confirmé que des émotions peuvent être communiquées par la musique [GAB 96, JUS 97a, JUS 97b]. Certaines caractéristiques sonores et musicales ont été mises en évidence de manière expérimentale comme vecteurs de cette communication émotionnelle. Cependant, il existe une multiplicité de styles et de manières d'exprimer une émotion musicalement qui semble encore faire obstacle à une modélisation fondée uniquement sur ces structures musicales. L'expression musicale implique en effet plusieurs modalités d'expression comme l'implique l'expression des émotions en général [WAL 86, SCH 85, DAV 03, LIV 06].

Une série d'études a montré que les émotions dans la musique sont communiquées non seulement à travers le son mais aussi à travers l'expression faciale et les autres mouvements du corps. Adoptant un point de vue ethnographique et historique Thompson, Graham et Russo [THO 05] mettent en évidence que l'information visuelle influence la perception et l'expérience que nous avons de la musique. L'influence du mouvement du corps sur la perception de la musique a été étudiée empiriquement [DAH 07, TIM 06, VIN 04, WAN 05, HEN 07]. Dahl et Friberg ont montré comment les émotions peuvent être transmises à travers les mouvements du musicien (en l'occurrence un joueur de marimba, un saxophoniste et un bassoniste) [DAH 07]. Ils ont en particulier précisé le rôle des différentes parties du corps durant l'expression d'une émotion. Le mouvement de la tête jouerait un rôle prédominant. Des résultats similaires ont été présentés par Davidson [DAV 94a]. Soumettant à plusieurs participants des vidéos montrant les interprétations de pianistes, l'auteur a observé que



les spectateurs prêtaient davantage attention à la tête pour distinguer les différentes tonalités expressives des interprétations musicales.

Dans une série d'études réalisée sur la perception du jeu des clarinettes, Vines *et al.* ont employé la mesure continue de la tension pour aborder ce problème de l'intégration multimodale (l'influence réciproque des informations auditives et visuelles) dans la reconnaissance des émotions [VIN 06]. Une étude exploratoire menée par Krumhansl et Schenck [KRU 97b] et utilisant cette mesure continue avait déjà permis d'identifier une similarité dans les réactions émotionnelles de trois groupes de participants confrontés séparément (i) à la vidéo d'un ballet, (ii) à la bande son et (iii) à l'ensemble original (vidéo et audio). Les réactions du troisième groupe dans lequel les participants voyaient et entendaient pouvaient même être modélisées comme une combinaison additive des jugements émis par les autres participants dans les deux autres conditions.

La contribution de la modalité visuelle a été re-vérifiée par l'étude de Vines *et al.* Trente participants, répartis en trois groupes, ont (i) observé la vidéo (ii) écouté le son (iii) vu et entendu l'interprétation par deux clarinettes de la *Seconde pièce* pour clarinette solo de Stravinsky. Les participants ont utilisé un potentiomètre coulissant pour évaluer la tension de manière continue (une mesure corrélée avec l'émotion). L'application d'une méthode d'analyse fonctionnelle des données (FDA) [VIN 05, PAS 07] a permis de corréliser en détail la dynamique de la réaction des participants avec la progression du morceau. Les résultats ont permis de montrer que les modalités visuelles et auditives transmettent de manière indépendante l'information émotionnelle mais qu'elles relaient de manière identique la structure musicale. Ils ont montré que les mouvements des musiciens avaient un rôle décisif pour augmenter ou amoindrir l'impact émotionnel de la musique et pour anticiper les changements d'intensité de l'émotion.

Ces études confirment que la reconnaissance d'une émotion lors d'une performance musicale implique une expérience multisensorielle où le son et l'image interagissent. La musique autant que l'observation du musicien en train de jouer ont un rôle dans les processus d'inférence et d'induction des émotions auprès des auditeurs. La compréhension de ces interactions sonores et visuelles supposent cependant de pouvoir caractériser en détail chacun des éléments entrant en jeu dans la communication émotionnelle. Si l'on adopte la perspective théorique de Brunswick [BRU 56] adaptée par Juslin au contexte musical [JUS 00], la communication des émotions peut être expliquée si l'on considère le chemin qui va de l'émetteur (*sender*) au receveur (*receiver*). L'analyse doit non seulement considérer la perception (en s'intéressant aux indices proximaux perçus par le *receveur*) mais elle doit aussi considérer l'expression (en relevant les indices distales produits par l'*émetteur*) [JUS 97b]. Comme nous l'avons vu, les éléments liés à la structure musicale ont été relevés avec précision mais les particularités du geste qui contribuent à l'expressivité du contenu musical restent encore méconnues.

La relative absence d'un protocole commun de codification de l'ensemble des mouvements du corps tel qu'il en existe pour l'expression faciale [EKM 83] a limité en partie la possibilité d'études quantitatives. Le développement technologique récent a cependant permis la mise au point d'instruments de capture du mouvement et d'analyse en temps réel qui ont permis de caractériser de manière inédite la dynamique gestuelle et sa relation à l'expressivité ([www.vicon.com](http://www.vicon.com), [www.eyesweb.org](http://www.eyesweb.org)). La corrélation entre les mouvements du corps et les caractéristiques acoustiques de l'interprétation musicale a ainsi été observée par Dahl [DAH 07]. Les interprétations ayant une tonalité joyeuse ou triste se caractériseraient par des mouvements du corps plus fréquents correspondant à des *tempi* plus rapides, et des mouvements du corps plus larges correspondraient à des sons d'intensité plus élevée. Dans les interprétations ayant une tonalité triste, des mouvements plus fluides soutiendraient une articulation musicale *legato*. Dans une récente analyse vidéo des mouvements corporels d'un duo de pianiste et violoncelliste, Castellano *et al.* ont non seulement confirmé l'importance des mouvements de la tête dans la communication d'une émotion, mais ils ont aussi précisé les dynamiques expressives de l'exécution musicale. Un nombre croissant d'études s'attachent désormais à préciser les caractéristiques multimodales et en particulier gestuelles de l'expression musicale [GLO 08, LEM 07, WAN 05, TIM 06]. Leurs résultats orientent déjà le développement d'interfaces d'expressions musicales originales [CAS 07, BER 08].

#### 10.5.1. Une plateforme multimodale de recherche pour l'expression musicale

Afin d'utiliser au mieux les nouvelles ressources technologiques d'analyse du mouvement et de la musique pour la compréhension et la modélisation de l'expressivité musicale, Camurri *et al.* ont établi une plateforme multimodale de recherche. Cette plateforme permet d'explicitier les différentes étapes à mener pour analyser les modalités de l'expression musicale et en particulier celles liées à la gestualité.

*Le geste expressif.* La notion de geste expressif est centrale dans cette analyse [CAM 05b]. Une tentative de définition est donnée par Camurri *et al.*, en partant de la conception par Kurtenbach et Hultheen's du geste comme un « mouvement du corps qui contient de l'information » [KUR 90]. Dans cette perspective, le geste expressif se caractérise par le fait que l'information qu'il contient et transmet est reliée au domaine émotionnel. Ce contenu se surimpose parfois à des significations dénotatives possibles (par exemple le doigt pointé sur un objet pour le désigner) mais il en est indépendant. Partant de ce point de vue, le geste peut être considéré comme expressif dès lors qu'il porte ce que Cowie *et al.* appellent « messages implicites » [COW 01], et ce que Hashimoto appelle *kansei* [HAS 97].

Dans le cadre du projet européen MEGA (*Multisensory Expressive Gesture Applications*), Camurri *et al.* ont développé un cadre conceptuel quadripartite pour l'analyse du geste expressif [CAM 05a]. Le processus d'analyse se résume à quatre principaux

points (figure 10.2) : (i) définir le type de données qui caractériseront l'activité du musicien ou celle de l'utilisateur ; (ii) identifier d'abord une collection appropriée de descripteurs pour décrire le geste expressif ; (iii) implémenter ces descripteurs sous la forme d'algorithmes pour obtenir une description continue du mouvement ; (iv) analyser les données obtenues par l'application de ces descripteurs pour obtenir une information de haut-niveau caractérisant l'expressivité du geste.

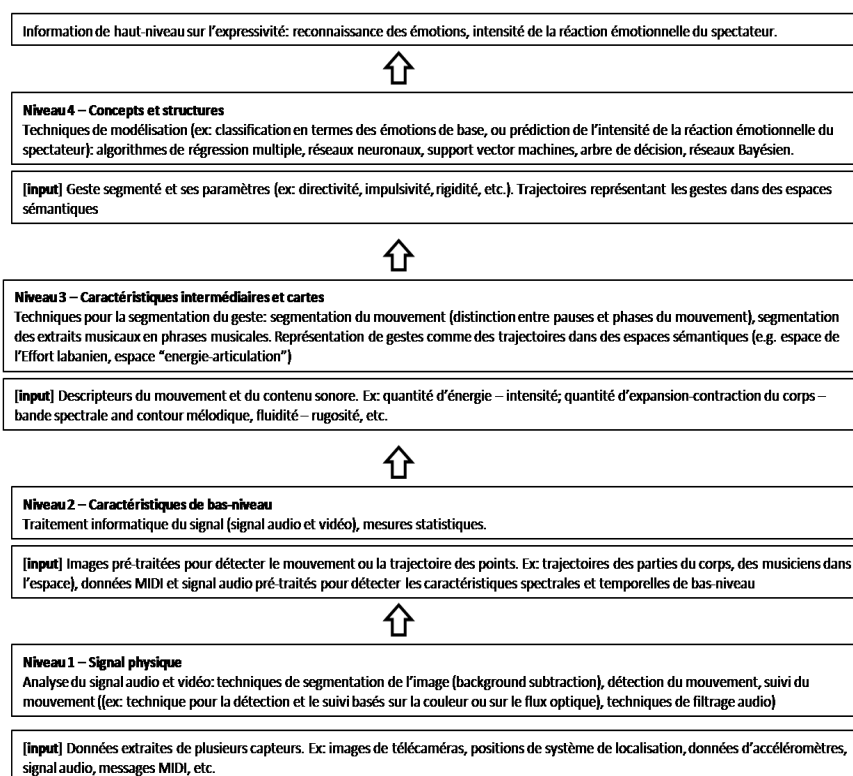
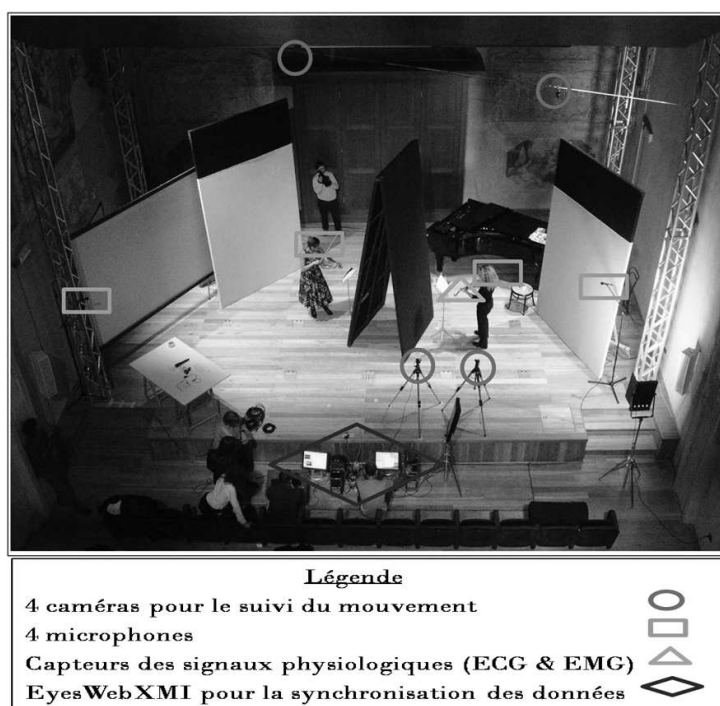


Figure 10.2. Schéma du cadre conceptuel quadripartite pour l'analyse du geste expressif

Le niveau 1 (le signal physique) correspond aux techniques utilisées pour collecter les données enregistrées par les capteurs (caméras vidéos, micro, capteurs sensoriels (*on-body sensors*)). Plusieurs sources sont considérées afin d'obtenir une description minutieuse du mouvement.

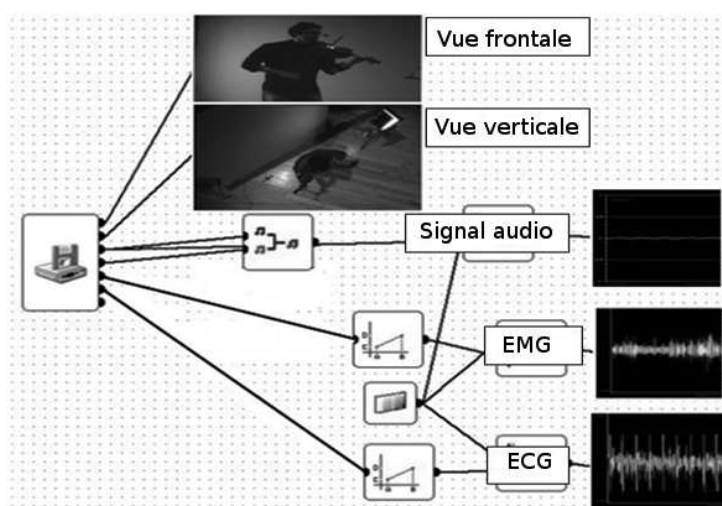
Pour illustrer ce premier niveau, nous nous référons au dispositif expérimental d'une récente expérience nommée le *Premio Paganini* [GLO 08] destinée à l'étude

des caractéristiques multimodales des processus émotionnels des musiciens en situation de concert. Dans le cadre d'une salle de concert (la Casa Paganini à Gênes) et à l'occasion d'un événement public (le concours international de violon Premio Paganini), un ensemble de capteurs vidéos (caméras), audio (microphones) et physiologiques (ECG, GSR, EMG) fut mis en place pour analyser les performances des violonistes (figure 10.3). Des solutions informatiques originales basées sur la plateforme logicielle EyesWeb ont été développées pour synchroniser et visualiser les données des capteurs (figure 10.4).



**Figure 10.3.** Un exemple de dispositif expérimental pour l'enregistrement de données multisensorielles en temps-réel d'une performance musicale (duo de violonistes, Chiara Noera et Lucia Marucci, à la Casa Paganini [GLO 08])

Le niveau 2 (les descripteurs) contient l'ensemble des descripteurs du mouvement et se fonde sur les mesures extraites au niveau 1. Dans le cas d'une interprétation musicale par exemple, les descripteurs incluent des mesures cinématiques : la quantité de mouvement, la quantité de contraction/expansion des bras par rapport au corps, etc. Ces descripteurs sont issus de la recherche en psychologie et de la pratique artistique, pour une revue détaillée : [BLA 07, WAL 98, BOO 98]. La référence à la théorie de



**Figure 10.4.** L'application EyesWeb XMI pour la synchronisation et la visualisation en temps réel des données multisensorielles de la performance musicale (le violoniste Alessio Gabriele à la Casa Paganini [GLO 08])

l'effort de Rudolf Laban a permis par exemple de modéliser des dimensions qualitatives du geste qui participent de l'expressivité telles que la rigidité ou la fluidité [LAB 47, LAB 63].

*Le niveau 3 (segmentation et représentation)* concerne deux thématiques : la segmentation - identifier les gestes au sein d'une séquence de mouvements - et la représentation - représenter de tels gestes dans des espaces adéquats. La difficulté est d'identifier les segments pertinents dans le flux des données initiales (musique, mouvement) et de les associer aux descripteurs de l'expressivité. Dans l'analyse des mouvements d'un interprète par exemple, un fragment de sa performance peut être segmenté en une séquence de gestes, chacun délimité en fonction des variations de vitesse et de direction. Chaque geste est ensuite décrit par un vecteur contenant les valeurs prises par chacun des descripteurs de l'expressivité.

L'ensemble de ces mesures permet de représenter le geste dans un espace multidimensionnel contenant les descriptions qualitatives et expressives du mouvement (par exemple, fluide *versus* rigide). Les séquences de gestes qui se déroulent dans le temps et l'espace sont donc identifiées comme des trajectoires dans des espaces de dimensions continues. Les trajectoires sont ensuite analysées pour trouver des similarités parmi elles et les grouper en *clusters*. Afin d'obtenir une bonne visibilité des données accumulées, des techniques d'analyse factorielle sont appliquées (analyse en composantes principales, analyse en composantes indépendantes, etc.). Ces techniques permettent de réduire un ensemble de données volumineux à un ensemble de taille plus

réduite, épuré de ce que l'on considèrera comme de l'information non pertinente ou non signifiante [POL 04, CAN 04].

*Le niveau 4 (catégories et concepts)* décrit les processus d'extraction d'information expressive de haut niveau, c'est-à-dire concernant la signification de ce qui est exprimé. En principe, ce niveau peut être conçu comme un réseau reliant les caractéristiques extraites des gestes à des concepts ou à des catégories. La performance musicale par exemple peut être analysée en terme d'intentions émotionnelles transmises. Les techniques d'apprentissage automatique (*machine learning*) sont fréquemment employées pour classifier les séquences de mouvements en catégories émotionnelles [CAM 03]. Ces techniques recouvrent des procédures variées comme les statistiques (par exemple, régression multiple, techniques linéaires généralisées), la logique floue ou les systèmes de raisonnement probabilistique (réseaux bayésiens), les réseaux neuronaux (par exemple, réseaux de *back-propagation*, réseaux de Kohonen), les *Support vector machines*, les arbres de décision, etc.

Ces quatre niveaux de l'analyse du contenu multimodal de l'expressivité musicale, et en particulier du geste expressif propose un parcours clair qui a montré son efficacité dans le domaine de la recherche. Une telle approche peut être suivie avec profit dans l'élaboration d'applications pour le public. La précision apportée par ce type d'étude a permis de relever de manière scientifique, méthodique, des aspects essentiels de l'expressivité musicale qui profitent à l'élaboration de nouvelles interfaces d'expression musicale.

## 10.6. Synthèse multimodale des émotions dans un contexte musical

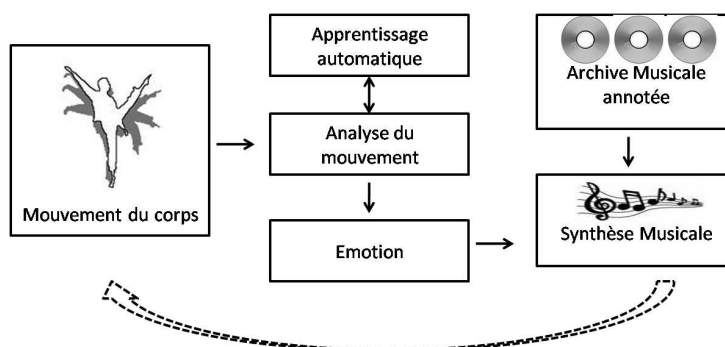
La prise en compte du contexte multisensoriel de l'expressivité est une donnée cruciale pour la création de nouvelles interfaces musicales. Depuis plusieurs années, la communauté de l'informatique musicale a cherché à identifier de nouveaux paradigmes d'interactions expressives avec les ordinateurs (pour une vue d'ensemble, on peut se référer aux actes des conférences NIME, *New Interfaces for Musical Expression*, [www.nime.org](http://www.nime.org)).

La référence à l'instrument de musique s'est fréquemment imposée ; les instruments virtuels, hyper-instruments et autres instruments augmentés ont représenté un horizon de recherche fructueux [BEV 06]. En 1965 déjà, dans *Variation V*, John Cage et Merce Cunningham ont utilisé le theremin pour retranscrire musicalement les mouvements de danseurs. L'utilisation de capteurs s'est développée dans les années 1970-80 pour créer des instruments invisibles, en réalité, des espaces actifs dans lesquels chaque mouvement de l'utilisateur est capturé, analysé et utilisé pour générer et contrôler des échantillons sonores. Ces développements ont conduit à la création d'environnements multimédias (*Multimodal Environments*, ME) qui favorisent une interaction continue et multimodale avec l'utilisateur. Cette forme renouvelée de l'interaction

peut être considérée comme une extension des possibilités d'interactions développées avec les instruments virtuels [CAM 05a, CAM 99].

Castellano *et al.* ont mis en place un environnement multimédia se concentrant sur la communication expressive et émotionnelle et qui autorise une totale liberté de mouvement [CAS 07]. Le système, élaboré avec la plateforme logicielle EyesWeb XMI, analyse en temps réel les mouvements de l'utilisateur en se concentrant sur les variations combinées de deux caractéristiques corporelles reconnues comme expressives : la quantité de mouvement et l'occupation spatiale du sujet [CAM 03]. Les valeurs des caractéristiques expressives du mouvement sont reliées (*mapped*) en temps réel au contrôle des paramètres acoustiques de l'expressivité musicale au moyen d'une librairie spécialisée du logiciel Pure Data ([www.puredata.org](http://www.puredata.org)). Afin de renforcer l'interaction émotionnelle, le système projette la silhouette du sujet qu'il colore en fonction de l'émotion. L'intégration des différents aspects multimodaux de l'expressivité musicale vise donc à renforcer « l'implication émotionnelle » (*emotional engagement*) du sujet.

Partant de ce principe d'intégration multimodale, Bernhardt et Robinson ont ajouté à cet environnement multimédia des techniques d'apprentissage automatique qui permettent, pour le sujet, de définir un vocabulaire de mouvements personnalisé [BER 08]. Lors de la phase d'entraînement du système, (i) un morceau de musique est sélectionné pour le type d'émotion dominante qu'il communique ; (ii) on demande à l'utilisateur de se déplacer librement en fonction de ce qu'il ressent à l'écoute de la musique. Suite à cet entraînement, le système peut reconnaître les émotions sur la base des mouvements naturels (c'est-à-dire, non contraints) de l'utilisateur. Cette approche a l'avantage que les règles du mouvement n'ont pas besoin d'être définies par avance dans l'interface et les utilisateurs n'ont pas à apprendre des gestes prescrits par l'expérimentateur ou par le logiciel (figure 10.5).



**Figure 10.5.** Schéma d'une interface émotionnelle musicale. La synthèse musicale est contrôlée par les mouvements expressifs du corps [BER 08]

De manière plus indirecte, la considération des facteurs multisensorielles de l'expressivité musicale a permis de favoriser l'interaction entre l'homme et des créatures virtuelles telles que les avatars. Mancini *et al.* ont créé, à la suite de DiPaola *et al.* [DIP 04], une application qui visualise les qualités expressives de la musique d'une performance musicale au moyen d'une tête virtuelle (l'avatar Greta) [MAN 07]. Quatre paramètres acoustiques ont été sélectionnés pour identifier l'intention émotionnelle de l'interprétation musicale : l'intensité sonore, le tempo, l'articulation (*legato-staccato*) [FRI 05]. Chacun de ces paramètres est relié à l'un des paramètres qui conditionne l'expression de la tête : rotation et accélération, durée et fréquence du mouvement de la tête, fluidité des mouvements. Cette visualisation en temps réel de la performance musicale à travers un visage expressif peut conduire à des types d'applications musicales originales : un lecteur audio portable muni d'un écran vidéo offrirait un retour visuel réactif à son utilisateur lorsque celui-ci parcourrait sa base de données ; un instrumentiste ayant besoin de pratiquer pourrait s'accompagner d'un professeur virtuel qui adapterait son jeu et son expression en fonction des intentions musicales du musicien.

La majorité de ces interfaces dédiées à l'expressivité musicale se concentre sur un utilisateur individuel. Pourtant l'expérience musicale peut être partagée non seulement comme spectateur mais aussi comme musicien : on joue en formation, en groupe, en orchestre... Cette dimension collective de la musique reste encore relativement ignorée lors de la conception d'interfaces émotionnelles musicales.

## 10.7. Le paradigme d'écoute sociale active : l'aspect collectif de l'émotion

### 10.7.1. Exemple : *Mappe per Affetti Erranti*

Camurri *et al.* ont créé une installation *Mappe per Affetti Erranti* (mot à mot : la carte des émotions errantes) qui montre les nouvelles possibilités d'une interaction « émotionnelle » entre des utilisateurs et un contenu musical préenregistré. Le matériel musical consiste en deux pièces chorales originales, interprétées par quatre chanteurs professionnels, de quatre manières : joyeuse, solennelle, intime, colérique. Ces différentes interprétations correspondent aux possibilités d'exploration émotionnelle du morceau qui seront données aux utilisateurs par la suite. Chaque chanteur est enregistré individuellement en studio car sa voix sera réutilisée de manière séparée dans l'installation.

Le lieu de l'installation (une scène de théâtre) est « découpé » en quatre espaces correspondant aux quatre voix de la musique polyphonique. La présence d'un utilisateur dans l'un de ces espaces déclenche la reproduction d'une des quatre voix. En parcourant l'ensemble de la scène, l'utilisateur peut traverser les différents espaces et écouter chacune des voix. S'il se maintient dans l'un des espaces, il écoute la voix



associée à cette aire séparément. Si l'utilisateur reste immobile, la musique s'arrête progressivement.

L'utilisateur peut façonner la voix qu'il est train d'écouter de différentes manières. Il peut intervenir sur les paramètres sonores. En ouvrant ses bras par exemple, l'utilisateur renforce la densité des voix (il écoute deux ou plusieurs voix à l'unisson). S'il se déplace vers le fond de la scène, le taux de réverbération augmente, tandis qu'en restant sur le devant de la scène, la voix devient plus sèche. L'utilisateur peut aussi modifier les caractéristiques expressives de la performance musicale. Le système analyse l'intention expressive transmise par l'utilisateur à travers ses mouvements et ses gestes expressifs et les traduit en une position (ou une trajectoire) dans un espace émotionnel virtuel. Cet espace émotionnel est lui-même divisé en quatre sections correspondant aux quatre interprétations expressives, pré-enregistrées, de la pièce musicale.

Les utilisateurs peuvent donc découvrir la pièce musicale de deux manières : en traversant l'espace physique, ils explorent la structure polyphonique ; en parcourant l'espace émotionnel, ils découvrent plusieurs possibilités d'interprétations. Un utilisateur seul, cependant, ne peut écouter et n'intervenir que sur une unique voix à la fois ; il ne peut écouter l'ensemble de la polyphonie et toutes les voix qui la composent. Seul un groupe d'utilisateurs peut avoir une expérience complète de *Mappe per Afferanti*. La pièce musicale ne peut en effet être entendue dans sa polyphonie complète que si le nombre d'utilisateurs est au moins égal à celui des voix qui sont en interaction dans l'installation. Mieux, comme chaque utilisateur contrôle l'interprétation de la voix en fonction de ses mouvements, l'entière pièce est exécutée avec la même intention expressive dans le cas unique où tous les utilisateurs se déplacent avec la même expressivité. Par conséquent, si les utilisateurs se déplacent avec des intentions expressives conflictuelles, le résultat sonore est incohérent et chaotique. A l'inverse, si les utilisateurs se déplacent avec la même qualité de mouvement et qu'ils collaborent, toutes les voix s'agrègent de manière cohérente, formant une interprétation harmonieuse et expressive de la pièce musicale.

Ce type d'interface renouvelle l'approche habituelle de l'expressivité musicale. La recherche sur les modèles computationnels de l'émotion (*affective computing*) et la modélisation du geste expressif se concentrent habituellement sur les utilisateurs individuels. Dans cette interface au contraire, le système ne reconnaît pas l'expressivité sur la seule qualité du mouvement des danseurs ; la qualité de la collaboration et de l'interaction entre les différents acteurs est également considérée. L'enjeu pour le développement de telles interfaces collaboratives est d'approximer l'intention expressive d'un groupe non plus seulement comme une moyenne des intentions expressives transmises par chacun de ses éléments, mais comme le résultat de dynamiques d'interaction plus complexes à l'intérieur du groupe (par exemple, *entraînement*, synchronisation, etc.) [CLA 04, DEM 08]. De telles dynamiques sociales d'interaction et leurs relations avec l'expression émotionnelle restent encore largement sous-explorées dans le domaine des interfaces d'expression musicales.

## 10.8. Conclusion et perspectives

La musique et les émotions sont liées. La nature de cette relation est discutée et fait l'objet d'un nombre croissant d'études scientifiques. La diversité des disciplines qui, de manière récente, s'intéressent à cette relation témoigne de la complexité des processus qui sont en jeu : neurosciences, psychologie expérimentale, physiologie, études cliniques, etc. L'analyse des relations entre les caractéristiques musicales des partitions et des interprétations et les réactions des auditeurs a permis de définir des propriétés acoustiques déterminantes pour l'expression et l'induction des émotions. D'autres modalités sensorielles (information visuelle, mouvements du corps) ont été examinées et leur rôle dans le processus de communication des émotions commence à être précisé.

La recherche sur les émotions suscitées par la musique a stimulé la production de prototypes et d'interfaces multimodales originales pour la création et l'expression artistique. Interactives et « sensibles » aux émotions, ces interfaces connaissent un engouement majeur car elles créent une boucle vertueuse où la musique se faisant l'écho des émotions de l'utilisateur, stimule sa pratique et renforce le plaisir de jouer. La possibilité d'interagir, libre de ses mouvements, avec un contenu musical, de le faire évoluer en fonction de ses déplacements et de ses intentions inaugurent des manières originales d'écoute et de partage de la musique. La communauté de l'informatique musicale a désormais atteint un niveau de maturité qui lui permet d'être reconnue comme un domaine de recherche autonome dont les productions scientifiques et les réalisations technologiques nourrissent notre compréhension des processus émotionnels suscités par la musique.

## 10.9. Bibliographie

- [ALP 05] ALPERT M., ALPERT J., MALTZ E., « Purchase occasion influence on the role of music in advertising », *Journal of Caca Research*, vol. 58, n°3, p. 369-376, Elsevier, 2005.
- [ASM 85] ASMUS E., « The development of a multidimensional instrument for the measurement of affective responses to music », *Psychology of Music*, vol. 13, n°1, Sempre, 1985.
- [BER 08] BERNHARDT D., ROBINSON P., « Interactive control of music using emotional body expressions », *Proceedings of the ACM Conference on Computer-Human Interaction CHI'08*, ACM Press, New York, 2008.
- [BEV 06] BEVILACQUA F., RASAMIMANANA N., FLÉTY E., LEMOUTON S., BASCHET F., « The augmented violin project : research, composition and performance report », *Proceedings of the 2006 conference on New interfaces for musical expression*, Citeseer, p. 402-406, 2006.
- [BIG 06] BIGAND E., *Musiciens et non-musiciens perçoivent-ils la musique différemment ?*, De Boeck Université, 2006.

- [BLA 07] BLAKE R., SHIFFRAN M., « Perception of Human Motion », *Annual Review of Psychology*, vol. 58, 2007.
- [BLO 01] BLOOD A., ZATORRE R., « Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, n°20, 2001.
- [BOO 98] BOONE R., CUNNINGHAM J., « Children's Decoding of Emotion in Expressive Body Movement : The Development of Cue Attunement », *Developmental Psychology*, vol. 34, p. 1007-1016, APA American Psychological Association, 1998.
- [BRE 00] BRESIN R., FRIBERG A., « Emotional Coloring of Computer-Controlled Music Performances », *Computer Music Journal*, vol. 24, n°4, p. 44-63, MIT Press, 2000.
- [BRU 56] BRUNSWIK E., *Perception and the Representative Design of Psychological Experiments*, University of California Press, Berkeley, 1956.
- [BRU 90] BRUNER G., « Music, mood and marketing », *Journal of Marketing*, vol. 54, n°4, p. 94-104, 1990.
- [BUD 85] BUDD M., *Music and the Emotions : The Philosophical Theories*, Routledge Kegan & Paul, Londres, 1985.
- [CAM 99] CAMURRI A., RICCHETTI M., TROCCA R., « EyesWeb-toward gesture and affect recognition in dance/musicinteractive systems », *Multimedia Computing and Systems, 1999. IEEE International Conference on*, vol. 1, 1999.
- [CAM 03] CAMURRI A., LAGERLÖF I., VOLPE G., « Recognizing Emotion from Dance Movement : Comparison of Spectator Recognition and Automated Techniques », *International Journal of Human-Computer Studies, Elsevier Science*, vol. 59, p. 213-225, juillet 2003.
- [CAM 05a] CAMURRI A., DE POLI G., FRIBERG A., LEMAN M., VOLPE G., « The MEGA Project : Analysis and Synthesis of Multisensory Expressive Gesture in Performing Art Applications », *Journal of New Music Research*, vol. 34, n°1, p. 5-21, Routledge, 2005.
- [CAM 05b] CAMURRI A., VOLPE G., DE POLI G., LEMAN M., « Communicating Expressiveness and Affect in Multimodal Interactive Systems », *IEEE Multimedia*, p. 43-53, IEEE Computer Society, 2005.
- [CAN 04] CANAZZA S., DE POLI G., DRIOLI C., RODA A., VIDOLIN A., « Modeling and control of expressiveness in music performance », *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, n°4, p. 686-701, 2004.
- [CAS 07] CASTELLANO G., BRESIN R., CAMURRI A., VOLPE G., « Expressive control of music and visual media by full-body movement », *Proceedings of the 7th international conference on New interfaces for musical expression*, ACM Press, New York, p. 390-391, 2007.
- [CHA 08] CHAPADOS C., LEVITIN D., « Cross-modal interactions in the experience of musical performances : Physiological correlates », *Cognition*, Elsevier, 2008.
- [CLA 04] CLAYTON M., SAGER R., WILL U., « In time with the music : The concept of entrainment and its significance for ethnomusicology », *ESEM Counterpoint*, vol. 1, p. 1-82, 2004.

- [CLY 77] CLYNES M., *Sentics : The Touch of Emotions*, Anchor Press, New York, 1977.
- [COO 59] COOKE D., *The Language of Music*, Oxford University Press, Londres, 1959.
- [COW 01] COWIE R., DOUGLAS-COWIE E., TSAPATSOU LIS N., VOTSIS G., KOLLIAS S., FELLE NZ W., TAYLOR J., « Emotion recognition in human-computer interaction », *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 18, n°1, p. 32-80, 2001.
- [DAH 07] DAHL S., FRIBERG A., « Visual Perception of Expressiveness in Musicians' Body Movements », *Music Perception*, vol. 24, n°5, p. 433-454, University of California Press, 2007.
- [DAV 94a] DAVIDSON J., « What type of information is conveyed in the body movements of solo musician performers », *Journal of Human Movement Studies*, vol. 6, p. 279-301, 1994.
- [DAV 94b] DAVIS M., « Folk music psychology », *The Psychologist*, vol. 7, n°12, 1994.
- [DAV 03] DAVIDSON R., SCHERER K., GOLDSMITH H., *Handbook of Affective Sciences*, Oxford University Press, New York, 2003.
- [DEM 08] DEMEY M., LEMAN M., BOSSUYT F., VANFLETEREN J., « The Musical Synchronon : using wireless motion sensors to study how social interaction affects synchronization with musical tempo », *Proceedings of the 8 th International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, 2008.
- [DIP 04] DI PAOLA S., ARYA A., « Affective Communication Remapping in MusicFace System », *Proceedings of the 10th European Conference on Electronic Imaging and the Visual Arts (EVA '04)*, 2004.
- [EKM 83] EKMAN P., FRIESEN W., *EMFACS-7 : Emotional Facial Action Coding System*, Unpublished manual, University of California, San Francisco, 1983.
- [FRI 91] FRIBERG A., FRYDÉN L., BODIN L., SUNDBERG J., « Performance Rules for Computer-Controlled Contemporary Keyboard Music », *Computer Music Journal*, vol. 15, n°2, p. 49-55, JSTOR, 1991.
- [FRI 95] FRIBERG A., « A Quantitative Rule System for Musical Performance », *Unpublished Doctoral dissertation, Royal Institute of Technology, Sweden*, 1995.
- [FRI 99] FRIBERG A., SUNDBERG J., « Does music performance allude to locomotion ? A model of final ritardandi derived from measurements of stopping runners », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, ASA, 1999.
- [FRI 00] FRIBERG A., COLOMBO V., FRYDEN L., SUNDBERG J., « Generating Musical Performances with Director Musices », *Computer Music Journal*, vol. 24, n°3, p. 23-29, MIT Press, 2000.
- [FRI 05] FRIBERG A., SCHOONDERWALDT E., JUSLIN P., « CU EX : An algorithm for extracting expressive tone variables from audio recordings », *Acoustica united with Acta Acoustica*, vol. 93, p. 411-420, 2005.
- [FRI 06a] FRIBERG A., « pDM : An Expressive Sequencer with Real-Time Control of the KTH Music-Performance Rules », *Computer Music Journal*, vol. 30, n°1, p. 37-48, MIT Press, 2006.

- [FRI 06b] FRIBERG A., BRESIN R., SUNDBERG J., « Overview of the KTH rule system for musical performance », *Advances in Cognitive Psychology*, vol. 2, n°2-3, p. 145-161, 2006.
- [GAB 85] GABRIELSSON A., « Interplay between analysis and synthesis in studies of music performance and music experience », *Music Perception*, vol. 3, n°1, p. 59-86, 1985.
- [GAB 87] GABRIELSSON A., « Once again : the theme from Mozart piano sonata in A Major (K 331) », *Action and Perception in Rhythm and Music*, vol. 55, p. 81-103, 1987.
- [GAB 96] GABRIELSSON A., JUSLIN P., « Emotional Expression in Music Performance : Between the Performer's Intention and the Listener's Experience », *Psychology of Music*, vol. 24, n°1, Sempres, 1996.
- [GAB 01a] GABRIELSSON A., *Emotions in strong experiences with music*, Music and emotion : Theory and research. Oxford : Oxford University Press, 2001.
- [GAB 01b] GABRIELSSON A., LINDSTROM E., « The influence of musical structure on emotional expression », *Music and emotion : Theory and research*, p. 223-248, 2001.
- [GAB 03] GABRIELSSON A., JUSLIN P., « Emotional expression in music », *Handbook of affective sciences*, p. 503-534, 2003.
- [GLO 08] GLOWINSKI D., CAMURRI A., VOLPE G., NOERA C., COWIE R., MCMAHON E., KNAPP B., JAIMOVICH J., « Using induction and multimodal assessment to understand the role of emotion in musical performance », *Proceedings of the 2008 conference on Emotion in Human-Computer Interaction*, Liverpool John Moores University, 2008.
- [GOL 04] GOLD C., VORACEK M., WIGRAM T., « Effects of music therapy for children and adolescents with psychopathology : a meta-analysis », *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, vol. 45, n°6, p. 1054-1063, Blackwell Synergy, 2004.
- [HAS 97] HASHIMOTO S., « KANSEI as the Third Target of Information Processing and Related Topics in Japan », *Proceedings of the International Workshop on KANSEI : The technology of emotion*, AIMI (Italian Computer Music Association) and University of Genova, 1997.
- [HEN 07] HENBING L., « A Gesture-based Typology of Sliding-tones in Guqin Music », *Journal of New Music Research*, vol. 36, n°2, p. 61-82, Routledge, 2007.
- [IZA 77] IZARD C., *Human Emotions*, Plenum Press, New York, 1977.
- [JUS 97a] JUSLIN P., « Perceived emotional expression in synthesized performances of a short melody : Capturing the listener's judgment policy », *Musicae Scientiae*, vol. 1, n°2, p. 225-256, European Society for the Cognitive Sciences of Music, 1997.
- [JUS 97b] JUSLIN P., « Emotional Communication in Music Performance : A Functionalist Perspective and Some Data », *Music Perception*, vol. 14, p. 383-418, University of California Press, 1997.
- [JUS 00] JUSLIN P., « Cue utilization in communication of emotion in music performance : relating performance to perception. », *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 26, n°6, p. 1797-813, 2000.
- [JUS 01] JUSLIN P., SLOBODA J., *Music and emotion : theory and research*, Oxford University Press, Oxford, 2001.

- [JUS 02] JUSLIN P., ZENTNER M., « Current trends in the study of music and emotion : Overture », *Musicae Scientiae*, vol. 6, n°1 ; SPI, p. 3-22, European Society for the Cognitive Sciences of Music, 2002.
- [JUS 03a] JUSLIN P., LAUKKA P., « Communication of Emotions in Vocal Expression and Music Performance : Different Channels, Same Code ? », *Psychological Bulletin*, vol. 129, n°5, p. 770-814, APA American Psychological Association, 2003.
- [JUS 03b] JUSLIN P., LAUKKA P., « Emotional Expression in Speech and Music Evidence of Cross-Modal Similarities », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1000, n°1, p. 279-282, NYAS, 2003.
- [KAL 05] KALLINEN K., « Emotional ratings of music excerpts in the western art music repertoire and their self-organization in the Kohonen neural network », *Psychology of Music*, vol. 33, n°4, Sempre, 2005.
- [KAL 06] KALLINEN K., RAVAJA N., « Emotion perceived and emotion felt : Same and different », *Musicae Scientiae*, vol. 10, n°2, European Society for the Cognitive Science of Music, 2006.
- [KRU 96] KRUMHANSL C., « A Perceptual Analysis of Mozart's Piano Sonata K. 282 : Segmentation, Tension, and Musical Ideas », *Music Perception*, vol. 13, p. 401-432, University of California Press, 1996.
- [KRU 97a] KRUMHANSL C., « An exploratory study of musical emotions and psychophysiology », *Canadian journal of experimental psychology*, vol. 51, n°4, p. 336-353, Canadian Psychological Association, 1997.
- [KRU 97b] KRUMHANSL C., SCHENCK D., « Can dance reflect the structural and expressive qualities of music ? : A perceptual experiment on Balanchine's choreography of Mozart's Divertimento n. 15 », *Musicae Scientiae*, vol. 1, p. 63-86, European Society for the Cognitive Science of Music, 1997.
- [KUR 90] KURTENBACH G., HULTEEN E., « Gestures in Human-Computer Communication », *The Art of Human-Computer Interface Design*, p. 309-317, 1990.
- [LAB 47] LABAN R., LAWRENCE F., *Effort*, Macdonald and Evans, Londres, 1947.
- [LAB 63] LABAN R., *Modern Educational Dance*, Macdonald and Evans, Londres, 1963.
- [LEM 07] LEMAN M., *Embodied Music Cognition and Mediation Technology*, Mit Press, Cambridge, 2007.
- [LIV 06] LIVINGSTONE S., THOMPSON W., « Multimodal Affective Interaction », *Music Perception*, vol. 24, n°1, p. 89-94, University of California Press, 2006.
- [LIV 07] LIVINGSTONE S., « Controlling musical emotionality : an affective computational architecture for influencing musical emotions », *Digital Creativity*, vol. 18, n°1, p. 43-53, Routledge, 2007.
- [MAD 93] MADSEN C., FREDRICKSON W., « The Experience of Musical Tension : A Replication of Nielsen's Research Using the Continuous Response Digital Interface », *Journal of Music Therapy*, vol. 30, p. 46-46, National Association for Music Therapy Inc, 1993.

- [MAN 07] MANCINI M., BRESIN R., PELACHAUD C., « A Virtual Head Driven by Music Expressivity », *IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing*, vol. 15, n°6, IEEE, 2007.
- [MEN 05] MENON V., LEVITIN D., « The rewards of music listening : Response and physiological connectivity of the mesolimbic system », *Neuroimage*, vol. 28, n°1, p. 175-184, Elsevier, 2005.
- [MEY 56] MEYER L., *Emotion and Meaning in Music*, University of Chicago Press, Chicago-Londres, 1956.
- [MEY 67] MEYER L., *Music, the arts and ideas*, University of Chicago Press, Chicago-Londres, 1967.
- [NIE 83] NIELSEN F., *Oplevelse af musikalsk spænding*, Akademisk Forlag, 1983.
- [PAS 07] PASSWORD F., « Functional Data Analysis, edited by JO Ramsay and BW Silverman », *Biometrics*, vol. 63, n°1, p. 300-301, Blackwell Synergy, 2007.
- [PIC 97] PICARD R., *Affective Computing*, MIT Press, Cambridge, 1997.
- [POL 04] POLI G., « Methodologies for Expressiveness Modelling of and for Music Performance », *Journal of New Music Research*, vol. 33, n°3, p. 189-202, Routledge, part of the Taylor & Francis Group, 2004.
- [REN 03] RENTFROW P., GOSLING S., « The Do Re Mi s of Everyday Life : The Structure and Personality Correlates of Music Preferences », *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 84, n°6, p. 1236-1256, APA American Psychological Association, 2003.
- [REP 92] REPP B., « Diversity and commonality in music performance : An analysis of timing microstructure in Schumann Traumerei », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 92, ASA, 1992.
- [RIG 64] RIGG M., « The mood effects of music : A comparison of data from four investigators », *The journal of psychology*, vol. 58, p. 427-438, 1964.
- [ROB 05] ROBINSON J., *Deeper Than Reason : Emotion and Its Role in Literature, Music, and Art*, Oxford University Press, Oxford, 2005.
- [RUS 80] RUSSELL J., « A circumplex model of affect », *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 39, n°6, p. 1161-1178, 1980.
- [SCH 85] SCHERER K., WALLBOTT H., « Analysis of nonverbal behavior », *Handbook of discourse analysis*, vol. 2, p. 199-230, 1985.
- [SCH 99] SCHUBERT E., *Measurement and Time Series Analysis of Emotion in Music*, PhD thesis, University of New South Wales, 1999.
- [SCH 01a] SCHERER K., ZENTNER M., « Emotional effects of music : Production rules », *Music and emotion : Theory and research*, p. 361-392, 2001.
- [SCH 01b] SCHUBERT E., « Continuous measurement of self-report emotional response to music », *Music and emotion : Theory and research. Music and emotion : Theory and research*, p. 393-414, 2001.

- [SCH 07] SCHUBERT E., « The influence of emotion, locus of emotion and familiarity upon preference in music », *Psychology of Music*, vol. 35, n°3, Sempres, 2007.
- [SLO 01] SLOBODA J., O NEILL S., IVALDI A., « Functions of music in everyday life : An exploratory study using the Experience Sampling Method », *Musicae Scientiae*, vol. 5, n°1, p. 9-32, European Society for the Cognitive Sciences of Music, 2001.
- [SUN 82] SUNDBERG J., FRYDÉN L., ASKENFELT A., « What tells you the player is musical ? A study of music performance by means of analysis-by-synthesis », *KTH Speech Transmission Laboratory Quarterly Progress and Status Report*, vol. 23, p. 135-148, 1982.
- [THO 05] THOMPSON W., GRAHAM P., RUSSO F., « Seeing music performance : Visual influences on perception and experience », *Semiotica*, vol. 2005, n°156, p. 203-227, Walter de Gruyter, 2005.
- [TIM 06] TIMMERS R., MAROLT M., CAMURRI A., VOLPE G., « Listeners' emotional engagement with performances of a Scriabin etude : an explorative case study », *Psychology of Music*, vol. 34, n°4, Sempres, 2006.
- [TRA 08] TRAINOR L., « Science & Music, the neural roots of music », *Nature*, vol. 453, n°7195, Nature Publishing Group, 2008.
- [VAS 02] VASTFJALL D., « A review of the musical mood induction procedure », *Musicae Scientiae*, vol. 6, n°1 ; SPI, p. 173-212, European Society for the Cognitive Sciences of Music, 2002.
- [VIN 04] VINES B., WANDERLEY M., KRUMHANSL C., NUZZO R., LEVITIN D., « Performance Gestures of Musicians : What Structural and Emotional Information Do They Convey ? », *Lectures Notes in Computer Science*, p. 468-478, Springer, 2004.
- [VIN 05] VINES B., NUZZO R., LEVITIN D., « Analyzing Temporal Dynamics in Music », *Music Perception*, vol. 23, n°2, p. 137-152, University of California Press, 2005.
- [VIN 06] VINES B., KRUMHANSL C., WANDERLEY M., LEVITIN D., « Cross-modal interactions in the perception of musical performance », *Cognition*, vol. 101, n°1, p. 80-113, Elsevier, 2006.
- [WAL 86] WALLBOTT H., SCHERER K., « Cues and channels in emotion recognition », *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 51, n°4, p. 690-699, 1986.
- [WAL 98] WALLBOTT H., « Bodily expression of emotion », *Eur. J. Soc. Psychol*, vol. 28, p. 879-896, 1998.
- [WAN 05] WANDERLEY M., VINES B., MIDDLETON N., MCKAY C., HATCH W., « The Musical Significance of Clarinetists' Ancillary Gestures : An Exploration of the Field », *Journal of New Music Research*, vol. 34, n°1, p. 97-113, Routledge, 2005.
- [WES 96] WESTERMANN R., STAHL G., HESSE F., « Relative effectiveness and validity of mood induction procedures : analysis », *European Journal of Social Psychology*, vol. 26, p. 557-580, 1996.
- [ZEN 96] ZENTNER M., KAGAN J., « Perception of music by infants », *Nature*, vol. 383, n°6595, p. 29-29, 1996.



- [ZEN 98] ZENTNER M., KAGAN J., « Infants' perception of consonance and dissonance in music », *Infant Behavior and Development*, vol. 21, n°3, p. 483-492, Elsevier, 1998.
- [ZEN 08] ZENTNER M., GRANDJEAN D., SCHERER K., « Emotions evoked by the sound of music : characterization, classification, and measurement », *Emotion*, vol. 8, n°4, p. 494-521, 2008.