

De Nouvelles Interfaces pour Apprendre la Théorie de la Musique

Frédéric Piat, Florent Carlier et Valérie Renault

Université du Maine, Le Mans, France,
prenom.nom@univ-lemans.fr,
<http://maupiti.univ-lemans.fr>

Résumé. La difficulté dans l'apprentissage de la musique réside plus souvent dans celui de la théorie que de la pratique instrumentale, avec la difficulté d'automatiser de nouveaux processus de lecture et l'aridité des exercices qui exigent une part d'apprentissage par cœur. Nous proposons un environnement ludique basé sur une interaction avec une carte visuelle 3D pour encourager l'apprenant à expérimenter avec les concepts de base de la théorie musicale. Cette carte résultant d'un apprentissage de séquences musicales par un réseau de neurones représente spatialement les relations auditives de consonance/dissonance. L'analyse des traces de l'interaction des utilisateurs avec la carte permettra d'étudier l'impact d'une représentation visuelle sur l'apprentissage de la musique ainsi que les processus cognitifs à l'œuvre. Des activités collaboratives et un mur d'écran configurable pour leur servir d'interface sont également proposés.

Mots-clés : Théorie de la Musique, Apprentissage Ludique, Théorie Résonance Adaptive (ART), Carte 3D, Analogie Spatiale, Métaphore Visuelle, Interface

1 Introduction

Pendant les premières années de la formation musicale, c'est principalement la difficulté de l'apprentissage du solfège et de la théorie musicale, plus que les difficultés liées à la pratique instrumentale elle-même, qui est la cause majeure d'abandon de la pratique musicale. Un des problèmes posés par l'apprentissage des notions de base (généralement liées à ce que l'on appelle la tonalité, qui désigne, pour simplifier à l'extrême, la note principale) est que même relativement simples, elles paraissent arbitraires et doivent donc être apprises par cœur, puisque les véritables concepts sous-jacents sont généralement issus de phénomènes complexes du domaine de la physique ondulatoire et de la perception auditive. Généralement, des notes ou des accords sont harmonieux entre eux parce qu'ils ont un élément commun (respectivement des fréquences harmoniques ou des notes) constituant un 'fil conducteur' lors du passage de l'un à l'autre, mais surtout parce qu'ils évoquent des schémas mentaux implicites (d'importance des notes, appelés hiérarchies tonales [1]) très similaires.

L'interdépendance de ces relations tonales est difficile à saisir, et apprendre qu'un accord de Do est souvent suivi de Sol ou La mineur paraît arbitraire.

Cependant, ce n'est sûrement pas la complexité des concepts en soi qui cause une démotivation, mais plutôt le côté fastidieux des exercices nécessaires à la maîtrise de la lecture, qui dépend du déchiffrage d'un nouveau système de symboles.

Des techniques d'Intelligence Artificielle (IA) comme la Théorie de la Résonance Adaptive (ART, [2]) ont permis aux machines de redécouvrir par elles-mêmes ces relations tonales à la base de la structure de la musique occidentale [3], et les règles de la composition musicale bien connues des compositeurs. Une représentation graphique sous forme de carte 3D du réseau de neurones obtenu met en évidence les proximités ou harmonies perceptuelles auditives par une proximité spatiale [4], constituant ainsi une nouvelle façon de visualiser les relations entre structures musicales.

On connaît nombre d'exemples [5] pour lesquels la représentation visuelle facilite toutes sortes de tâches cognitives (mémorisation, raisonnement...) issues de différents domaines mais pas dans la musique. Il reste donc à établir que cette nouvelle forme de représentation visuelle de la musique aide à comprendre comment celle-ci est structurée (comment différentes notes forment un accord, et comment une succession d'accords forme une cadence) et qu'elle peut être utilisée pour l'apprentissage des concepts musicaux de base.

D'innombrables sites web dédiés à l'enseignement de la théorie la musique existent, mais sans lier celle-ci aux stimuli auditifs. Les applications pour smartphones et tablettes utilisent souvent des interfaces originales (SynthPond, Node-Beat...) pour jouer des séquences musicales de façon intuitive, mais sans montrer les structures tonales (accords, gammes...) sous-jacentes ou leurs relations. Dans presque tous les cas, l'interface représente l'instrument (touches de piano pour MusicStudio, manche de guitare, embouchure d'harmonica...) ou de la musique écrite en partitions mais en aucun cas une représentation visuelle des structures plus abstraites (accords et gammes). Ici, l'apport de l'interface visuelle est que les proximités spatiales reflètent des similarités auditives plus abstraites, d'ordre supérieur (accords) et ne sont plus simplement isomorphes aux gammes.

2 Objectifs

La présence d'un parent musicien est souvent déterminante pour aider et superviser le travail à la maison, entretenir la motivation et servir de modèle, sinon il est très difficile pour un jeune d'avoir la persévérance nécessaire. La conception d'un EIAH (Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain) dédié à la formation musicale théorique doit pouvoir faciliter l'apprentissage en répondant à des besoins d'interactivité pour maintenir l'engagement de l'apprenant, d'accompagnement (à défaut de supervision) pour son autonomisation et de motivation en rendant les exercices plus ludiques. Ces travaux répondent donc globalement à 3 objectifs complémentaires:

- Développer un logiciel interactif ludique pour la découverte, l'exploration musicale, la stimulation de la curiosité et l'introduction aux concepts musicaux fondamentaux de la tonalité (accords, clés, cadences...).

- Etudier l'impact de la représentation visuelle 3D sur l'apprentissage de la musique : sa richesse sémantique est-elle exploitée ?
- Etudier des processus cognitifs de l'apprentissage musical autonome

Aborder l'apprentissage de manière moins formelle, sans utiliser de notion musicale prérequis, est particulièrement adapté à deux types de public : d'une part les jeunes de la génération 'zapping' exigeant zéro temps de prise en main, et d'autre part celui qui a une connaissance intuitive de la musique, principalement développée par de la pratique instrumentale informelle, typiquement des adultes musiciens autodidactes. Au-delà des débutants, le logiciel s'adresse également aux apprenants de plus haut niveau en permettant de découvrir les accords plus complexes et moins courants: 7e, 9e, diminués, augmentés, etc...

3 Conception de l'Environnement

Il existe nombre d'exemples où une métaphore visuelle facilite la compréhension et l'apprentissage [5] mais pas dans le domaine de la théorie musicale. On peut distinguer deux types fondamentaux de métaphores spatiales [6], celles "d'ancrage" et "de lien". Les premières sont ancrées dans notre vie de tous les jours et étroitement liées à nos perceptions de l'espace ou du temps ("concrètes" en un sens), ce sont donc les plus répandues et la mise en évidence de leurs intérêts pédagogiques est relativement directe (par exemple utiliser une ligne continue pour représenter l'ensemble des nombres réels). La présente recherche se situe plus dans la lignée de celles utilisant une métaphore spatiale plus abstraite de lien, proche des cartes de concepts obtenues par LSA (Latent Semantic Analysis) ou analyse multi-dimensionnelle, ou proche des réseaux sémantiques [7].

En effet, la carte musicale est hybride et possède des caractéristiques des deux types de métaphores, respectivement suivant chacune de ses dimensions: l'axe des ordonnées constitue clairement un lien puisqu'il parcourt les prototypes appris par le réseau de neurones ARTIST, tandis que l'appartenance est plus ambiguë pour l'axe des abscisses. Celui-ci peut être vu à la fois comme un ancrage puisqu'il parcourt les notes do,do#,ré etc... suivant leurs fréquences et donc leur hauteur perçue, mais comme le retour au début se fait cycliquement (retour à Do après Si), on peut aussi considérer que ce sont des "chromas" indépendamment de leur hauteur. Il est d'ailleurs intéressant de noter que c'est une différence caractéristique entre non-musiciens et musiciens, les premiers jugeant l'esthétique des séquences de notes surtout à partir des enchaînements des fréquences physiques alors que les musiciens la jugent plutôt d'après les fonctions tonales de chaque chroma [1]. L'intérêt pédagogique essentiel étant de représenter les proximités perceptuelles et cognitives plutôt que les proximités physiques/sensorielles, on peut considérer contrairement aux apparences que la carte tient principalement de la métaphore de lien.

Cette caractéristique de transposition spatiale des consonances peut être utilisée pour apprendre quelles tonalités sont proches les unes des autres, le principe étant d'explorer l'espace musical à mesure que l'on explore la carte (Fig.1) : un pic représente une note importante au sein d'un accord, qui est joué quand

l'utilisateur clique dessus. Celui-ci peut donc expérimenter à loisir toutes les transitions entre différents accords afin de construire une séquence tonale. La nature des accords présents sur la carte (majeur, mineur, 7e, diminué, etc...) est configurable de façon à pouvoir l'adapter aux différents niveaux d'enseignement.

Pour que l'utilisateur puisse faire le lien avec l'éventuel apprentissage formel qu'il a reçu, 2 visualisations des accords ont été ajoutées, sur une portée et sur un schéma de piano. Elles servent en particulier lors d'exercices demandant, pour un accord tiré aléatoirement, de le nommer à partir de ses notes ou de trouver les notes à partir de son nom. Ainsi le dernier accord sélectionné peut être visualisé de 3 manières différentes à tout moment: sur la portée, le piano et la carte.

Deux hypothèses principales ont donc guidé le développement d'IMaMusE (Interactive Map for Music Education), une centrée sur l'utilisateur et l'autre sur la représentation visuelle :

- Interactivité : un apprenant qui expérimente, et explore activement un espace pour chercher des réponses immédiates à ses hypothèses ("cet accord devrait convenir à la suite de cette séquence" ou "cette note devrait être une composante de cet accord") mémorisera et devinera mieux les relations tonales
- Métaphore spatiale : multiplier les représentations de l'information multiplie les chances de mémorisation et compréhension. L'ajout du visuel permet de mieux appréhender et mémoriser les relations sous-tendant l'harmonie auditive, et l'apport d'une représentation visuelle est optimal quand les relations spatiales sont isomorphes aux relations auditives

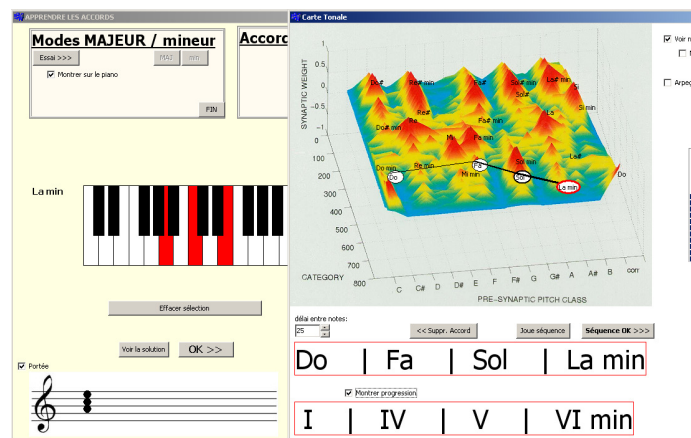


Fig. 1. Carte 3D de l'environnement IMAmusE (Interactive Map for Music Education) pour l'exploration des relations tonales, avec sélection d'une séquence de 4 accords et 3 représentations du dernier accord La mineur.

Au-delà de l'apprentissage de quelles associations accords sont belles à l'oreille ou pas, l'autre objectif du système est surtout de susciter curiosité de l'apprenant. On peut espérer que la satisfaction d'obtenir instantanément un "produit fini" sous la forme d'une suite d'accords, que le logiciel peut jouer telle quelle ou décliner en arpèges, donnera à l'utilisateur l'envie d'en savoir plus sur les relations tonales et ainsi le mener à se familiariser avec les hiérarchies tonales. D'autres suppositions sur l'apprentissage de la musique ont guidé le développement d'exercices ou d'activités pédagogiques et sont donc implicitement présentes à travers certaines fonctionnalités :

- Connaître et comprendre la structure tonale d'un morceau facilite son apprentissage et son interprétation : activité "apprendre un morceau"
- L'ajout de certaines contraintes stimule l'exploration et la créativité, parfois plus que la liberté totale de la page blanche qui n'incite pas à sortir du nombre limité de ses schémas mentaux archétypaux. De plus, essayer de répondre au mieux à des défis proposés par la machine ajoute une dimension ludique : création de l'activité "Composer une séquence" incluant une option "challenge" type 1 et/ou 2 (avec accord de début/fin donné(s))

4 Validation

Une approche expérimentale est nécessaire pour d'une part valider les 2 principes de conception d'**interactivité** et d'**organisation spatiale**, et d'autre part vérifier si l'apport escompté est effectif, si l'EIAH apporte bien une plus-value. Les 2 sections suivantes présentent les conditions expérimentales et les variables à mesurer pour tester ces hypothèses. Actuellement au début des expériences, les données récoltées ne permettent pas d'obtenir de résultats significatifs.

4.1 Conditions expérimentales

Les hypothèses suivantes sont indépendantes et chacune peut être testée à la fois avec la carte pour apprendre les progressions d'accords et avec le piano pour apprendre les notes composant les accords. Cela implique pour chaque hypothèse et chaque apprentissage la création de plusieurs conditions expérimentales dont les effets sur autant de groupes de sujets devront être comparés:

- **L'interaction facilite l'apprentissage**: la condition "Interaction" se résume à l'utilisation normale de la carte 3D (resp. du piano), à savoir une exploration entièrement dirigée par l'apprenant, tandis que la condition "Sans interaction" consiste à visionner une vidéo de session d'un autre utilisateur. Cette dernière fournit le même type d'information que l'exploration libre, sauf que l'accord testé pour poursuivre une séquence (resp. la note testée pour composer un accord) n'est pas choisi par l'apprenant.

- **Différentes visualisations facilitent l'apprentissage**: Pour la formation des accords, il s'agit de voir si l'ajout du schéma de piano constitue un avantage, ce qui mène aux conditions "avec" ou "sans" le dessin du piano en supplément de la portée. Quant à la carte, si son utilisation favorise l'apprentissage,

il se pourrait que cela soit simplement dû à une visualisation en supplément de l'écrit sur une portée, même si l'organisation de la carte est arbitraire et dépourvue de sens. Cela n'impliquerait pas que la transposition des consonances en une proximité spatiale soit essentielle. Cela mène donc à 3 conditions expérimentales pour isoler l'effet du principe d'une carte de l'effet de sa structure: la condition "Sans carte" demande à l'apprenant de composer sa séquence à partir d'une portée classique, la condition "Carte structurée" implique l'utilisation de la carte telle que décrite jusqu'ici, tandis que la condition "Carte aléatoire" utilise une association arbitraire entre pic et accord, de sorte que la relation spatiale soit découplée de la relation auditive entre accords.

- **L'utilisation d'IMaMusE facilite l'apprentissage:** ce n'est pas en une seule session sur IMaMusE que l'apprenant pourra assimiler la plupart des relations tonales. Un suivi longitudinal des apprenants sera donc nécessaire pour espérer observer des différences de performance entre un groupe à l'apprentissage "classique" et un groupe "IMaMusE" utilisant le logiciel en complément.

Les deux premières expériences visent à comparer des principes de choix ou de présentation de l'information. Il est nécessaire de contrôler strictement la durée des phases d'apprentissage (ou le nombre d'items des exercices) pour pouvoir réellement conclure que c'est l'efficacité de la méthode qui fait la différence et non pas la durée de l'apprentissage: un temps d'apprentissage très long devrait finir par enseigner beaucoup de choses même avec une mauvaise méthode. Pour la dernière expérience, il serait intéressant de contrôler également le temps passé sur le logiciel pour espérer calculer une réelle plus-value de l'EIAH par rapport à la méthode traditionnelle à temps d'apprentissage égal. Ce serait cependant très difficile dans le cadre d'une étude longitudinale, et pas souhaitable non plus puisqu'un objectif de l'EIAH est aussi de motiver l'apprenant, en espérant que le côté ludique lui donnera envie de passer plus de temps à pratiquer. Donc si cela l'amène à assimiler plus de connaissances parce qu'il passe plus de temps à s'entraîner, l'objectif sera atteint.

4.2 Variables dépendantes

Pour comparer les effets des conditions expérimentales, il faut préciser ce que l'on entend par performance: quelles sont les tâches pouvant montrer un apprentissage effectif, et par quelles mesures estimer celui-ci? La difficulté réside dans le choix de la modalité de la réponse, qui doit être différente de celle utilisée pendant l'apprentissage pour ne pas biaiser la performance.

Pour la formation des accords, on peut simplement demander oralement les notes constituant un accord donné ou demander l'accord constitué des notes données et calculer le taux d'erreur.

Pour les relations entre accords, il suffit de demander de citer des accords proches d'un accord donné. La pertinence des réponses peut être évaluée par comparaison avec la distance moyenne mesurée sur des auditeurs humains [1]. Il est également possible d'examiner la courbe de progression des apprenants dans la condition "avec carte" en analysant les données enregistrées lors de la

création de séquences: nombre de corrections, temps moyen passé à la conception et distance moyenne des transitions.

Enfin, il sera intéressant de voir si un apprentissage perceptuel implicite a lieu, si l'on détecte une amélioration de la sensibilité tonale par une plus grande pertinence de leurs jugements esthétiques de séquences jouées par le système.

5 Premiers retours d'usage

Pour se rendre compte de la faisabilité de ces expériences, les prioriser et mettre au point les protocoles expérimentaux, quelques sessions d'observations préliminaires s'imposent. Présenter l'EIAH à la nuit des chercheurs fut une opportunité idéale de recueillir des données et des avis d'un panel d'utilisateurs de tous niveaux face à la carte pour composer des séquences et relever des "challenges".

Ces observations ont confirmé la rapidité de la prise en main de l'environnement. L'absence de pré-requis, le côté attrayant et immédiat du visuel, la facilité d'interaction avec la carte et l'instantanéité du résultat font que les utilisateurs se prennent vite au jeu et ressortent très enthousiastes. Le fait que certains, en majorité des musiciens auto-didactes, suggèrent de nouveaux développements a été très stimulant et encourageant même si la plupart étaient déjà envisagées.

Sans surprise, c'est la différence entre non-musiciens et musiciens qui a été la plus frappante. En toute logique, ces derniers essaient de connecter ce qu'ils voient à leurs connaissances préalables, et ils ont souvent du mal à accepter d'emblée l'association entre un pic et un accord ou la structure de la carte, apparemment arbitraires, alors que cela ne pose pas de problème aux novices. Souvent comme les scientifiques, ils veulent comprendre avant de se lancer ce que représentent les 3 axes x,y et z du graphique mais ne sont pas toujours satisfaits de savoir que c'est l'importance des connexions entre les neurones du modèle qui sont représentées. Il va de soi que les données devront être analysées séparément pour les musiciens, d'autant plus qu'ils ont tendance à parcourir la carte différemment, passant au final peu de temps à former des progressions consonantes pour véritablement explorer, se consacrer à la recherche de séquences plus originales : ils sont plus à la recherche de l'intéressant que du beau.

Même au sein d'un groupe de sujets de mêmes niveaux, les différences de stratégies individuelles peuvent brouiller les données: certains valident la sélection dès qu'un accord convenable est trouvé, alors que d'autres explorent beaucoup avant de valider leur choix. Cela vient renforcer l'importance de formuler des instructions suffisamment neutres, la difficulté étant de donner une explication claire de la relation consonance/proximité des pics sans pour autant décourager l'apprenant d'explorer des combinaisons improbables. De même, la réutilisation d'un accord déjà présent dans la séquence est une stratégie courante pour les musiciens mais pas naturelle pour les novices, et la question se pose quant à aiguiller leurs stratégies en mentionnant cette possibilité. La conséquence des différences dues à l'expertise musicale est que l'on s'attend à un changement dans l'usage de la carte à mesure que l'apprenant progresse, ce qui peut mas-

quer des tendances dans les données. Il faudra peut-être trouver un critère pour changer un utilisateur de groupe de niveau pour l'analyse des données.

Enfin, si les novices terminent une session ravis de leurs "compositions", savoir ce qu'il reste de leur séance d'apprentissage reste la vraie question. Pour espérer que le système ne soit pas victime de la domination de la modalité visuelle et qu'il reste dans leur mémoire plus qu'une trajectoire dans un décor de montagne, pour que la mémorisation des associations d'accords soit effective, il faudra s'assurer que l'apprenant prête attention à leurs noms et leurs degrés pour éviter que la tâche ne soit traitée comme étant exclusivement visuo-spatiale.

6 Interface Mur d'Écrans pour Tâche Collaborative

Au-delà de l'effet de mode et de l'aspect plus motivant et engageant pour les apprenants de réaliser des activités ensemble plutôt que seuls, une composition musicale -ou du moins la conception d'une séquence d'accords- collaborative prend tout son sens pédagogiquement. Une difficulté majeure pour la conception d'une bonne séquence tonale est que lorsque l'on a trouvé des transitions satisfaisantes, il est difficile de s'en écarter et on a tendance à reproduire systématiquement les mêmes schémas. Jouer à composer une séquence en ajoutant un accord chacun son tour dans un genre de "cadavre exquis musical" permet de confronter l'apprenant à des situations qu'il n'aurait jamais générées de sa propre initiative, le forçant ainsi à découvrir de nouveaux contextes tonaux et à explorer de nouvelles progressions d'accords.

Pour pousser ce concept encore plus loin et encourager les apprentis musiciens à anticiper toutes les implications du choix d'un accord dans une séquence, on peut imaginer une sorte de jeu d'échecs musical dans lequel chacun doit, par son choix d'un accord à tour de rôle, minimiser la tension tonale générée par son choix tout en cherchant à contraindre l'autre joueur à maximiser la sienne.

La difficulté majeure posée par ces activités collaboratives tient à l'interface: il est préférable que chaque participant puisse distinguer sa propre contribution de l'autre et donc disposer d'une visualisation personnalisée, où il pourrait de plus essayer plusieurs accords avant de choisir. De plus, l'interface actuelle est déjà très chargée entre les différentes fenêtres de gestion d'exercice, de représentation du piano pour la formation des accords et la carte tonale.

Le projet TIFAIFAI [8], centré sur la conception d'un mur d'écrans reconfigurable capable d'interagir avec des systèmes mobiles, fournit un cadre rendant possible de telles activités collaboratives. L'aspect matériel de notre système consiste en un ensemble de systèmes embarqués tandis que l'architecture logicielle est gérée par un système multi-agents. Pour que l'utilisateur dispose d'une vue globale adaptée à un contexte donné, chaque écran doit pouvoir raisonner sur ce qu'il doit ou peut afficher et donc pouvoir communiquer et échanger avec les autres écrans. Pour cela, chaque écran est couplé à un système embarqué de type Raspberry Pi, systèmes embarqués de la taille d'une carte de crédit disposant en complément d'un processeur graphique pour la fluidité d'images. L'ensemble des cartes forme une grappe permettant soit le contrôle de chaque écran de façon

indépendante (une carte Raspberry Pi pour une application sur un seul écran), soit de synchroniser l’affichage entre les écrans, ce qui conduit alors à visualiser une vidéo répartie sur N écrans ou une application multi-fenêtres.

Notre mur d’écrans est actuellement composé de 16 écrans, chacun étant associé à un agent embarqué qui contrôle l’affichage à un moment donné. Ils disposent ainsi de surfaces de visualisation modulables, et cela facilite l’ajout de divers types de supports hétérogènes (écrans, tablettes, table de surface, etc.).

7 Conclusion et Perspectives

Pour explorer les concepts liés à la tonalité musicale, nous proposons ici une interface originale sous forme d’une carte 3D dont la proximité des pics reflète la proximité des accords. Elle permet de se familiariser avec les transitions d’accords harmonieuses (les plus utilisées) en cliquant intuitivement sur la carte et sans connaissances préalables. Des expériences sont en cours pour établir l’apport du système. Les premiers retours d’utilisateurs sont encourageants, ils ont apprécié les aspects interactif et visuel, en particulier voir organisé visuellement et résumé en une image ce que certains savent déjà. De nombreux développements sont envisagés ou en cours comme l’ajout d’un graphique permettant l’exploration des hiérarchies tonales, ou l’implémentation d’un tuteur intelligent à partir des propriétés du réseau de neurones) pour guider l’utilisateur dans son exploration. Il serait intéressant de tester la complémentarité avec la méthode traditionnelle pour donner une idée de la possibilité ou non d’étayage (scaffolding).

Une question essentielle concerne la durée des sessions: après un moment, l’attention de l’auditeur pourrait saturer et tous les accords finir par se ressembler. L’expérience dira aussi si à plus long terme, l’utilisateur ne commence pas à se lasser comme avec la méthode traditionnelle, ce qui amènerait à concevoir de nouveaux exercices pour maintenir l’engagement des apprenants.

Bibliographie

- [1] Krumhansl, C.L.: Cognitive Foundations of Musical Pitch. Oxford: Oxford University Press. 307pp. ISBN 0-19-505475-X (1990)
- [2] Grossberg, S.: Studies of mind and brain: Neural principles of learning, perception, development, cognition and motor control. Boston:D.Reidel/Kluwer (1982)
- [3] Piat, F.: "ARTIST: ADAPTIVE RESONANCE THEORY for the INTERNALIZATION of the STRUCTURE of TONALITY" , unpublished doctoral dissertation, School of Human Development at the University of Texas at Dallas (1999)
- [4] Piat, F.: ARTIST: A connectionist model of musical acculturation. In: 6th International Conference on Music Perception and Cognition (ICMPC), Keele, UK (2000)
- [5] Reed, S. K.: Thinking visually. New York: Taylor & Francis (2010)
- [6] Lakoff, G., Nuñez, R.E.: Where mathematics comes from : How the embodied mind brings mathematics into being. New York : Basic Books (2000)
- [7] Collins, A.M., & Loftus, E.F.: A spreading activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, 82, 407-428 (1975)
- [8] Renault, V., Carlier, F., Bourdon, P.: Tifaifai : Conception de nouveaux espaces d’interactions pour apprendre. *Revue «Distances et Médiations du Savoir»* (2014)