

CALLIMUSIC, UN SYSTEME DE SAISIE DE PARTITION PAR INTERACTION ORIENTEE STYLET

Bruno Bossis

Université Rennes 2
Université Paris-Sorbonne Paris IV
bruno.bossis@uhb.fr

Sébastien Macé

IRISA – INSA de Rennes
sebastien.mace@irisa.fr

Eric Anquetil

IRISA – INSA de Rennes
eric.anquetil@irisa.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente une saisie de partition basée sur l'interaction stylet-surface. Le principe général est d'éditer la partition en utilisant les mêmes gestes qu'avec un crayon sur une feuille de papier. Ainsi, le musicien ne modifie pas ses habitudes et peut se consacrer à la musique. Pendant l'édition, chaque tracé sur l'écran tactile ou la tablette graphique est reconnu par le système et remplacé instantanément par le symbole correspondant. De nombreux symboles sont déjà reconnus et les règles de disposition sur une portée respectées.

Le dispositif repose sur une nouvelle façon de reconnaître les symboles musicaux basée sur une connaissance *a priori* des gestes d'écriture. Des cadres sont indiqués sur l'écran de façon à limiter le nombre de symboles à différencier à un instant donné. Les musiciens participant à l'élaboration du dispositif ont permis de développer une interaction naturelle. Des applications pour les compositeurs, les pédagogues et les dépositaires de droits d'auteurs sont envisagées. Le domaine des jeux musicaux est également exploré. De plus, Callimusic est maintenant capable de produire le son correspondant à la note reconnue.

1. INTRODUCTION

De plus en plus d'écrans tactiles sont utilisés dans le monde de la communication. Leurs caractéristiques sont pleinement adaptées à des fonctions et à des gestes simples lorsqu'ils sont utilisés directement avec les doigts. Par contre, la réalisation de tracés précis et complexes exige une surface de contact plus réduite que le doigt. Le stylet demeure donc indispensable pour envisager l'écriture musicale. La surface de contact peut aussi bien être une tablette graphique qu'un écran tactile. Dans le premier cas, si la tablette ne fait pas office d'écran, la représentation de la portée et du résultat de la saisie doit être déportée sur un écran. Le *tablet PC* permet de disposer à la fois de la surface sensible, de l'écran et de l'ordinateur. Des applications sont envisagées pour les smartphones.

Les recherches développées depuis quelques années autour de l'interaction intuitive avec le doigt ou avec un stylet ont été souvent dirigées vers l'écriture de texte, le

dessin ou le contrôle de fonctions logicielles. Callimusic est l'un des premiers projets avancés concernant l'écriture de la musique. L'intérêt est multiple. La saisie de partition ne concerne en effet pas seulement les professionnels de l'édition, mais également les musiciens désirant créer un arrangement orchestral en jazz ou en musique populaire. Les pédagogues en école de musique, conservatoire ou établissement d'enseignement secondaire apprennent à leurs élèves comment écrire la musique et utilisent l'édition sur portées musicales pour de nombreux exercices. Enfin, des produits musicaux ludiques, matériels ou logiciels, abordent la représentation musicale. Tous ces domaines offrent des possibilités d'applications concrètes pour des systèmes dérivés de Callimusic.

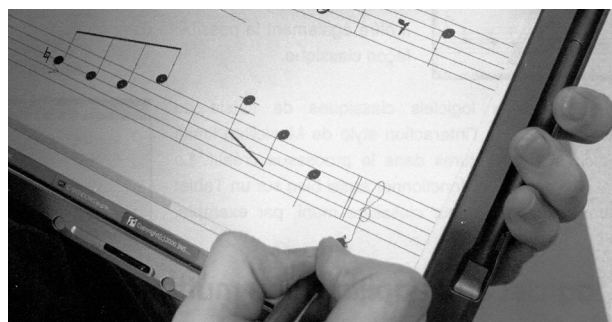


Figure 1. Callimusic

La réelle avancée de Callimusic provient d'un développement des travaux fondamentaux de l'équipe IMADOC¹ de l'IRISA de Rennes. Les chercheurs d'IMADOC sont spécialisés dans la reconnaissance automatique de documents manuscrits et dans l'interaction basée sur les stylets. L'expertise en musique et musicologie du laboratoire MIAC² de l'université Rennes 2 [9] a permis de progresser plus rapidement vers des solutions directement exploitables par les musiciens.

La première présentation de ces recherches à l'ICMC 2005 [6] a précédé l'appellation Callimusic proposée au sein de la société Evodia, start-up fondée par des chercheurs de l'IRISA [4] de Rennes afin de valoriser les travaux de l'équipe IMADOC [3]. Un chapitre du livre *Intelligent Music Information Systems: Tools and*

¹ IMAge et DOcument.

² Musique et Image : Analyse et Création.

Methodologies [5] a été entièrement consacré au projet qui a été amélioré depuis, notamment vers une interaction plus intuitive encore en incluant une réponse sonore du système. Le formalisme de description des règles de tracés est également en cours de révision.

L'approche du dispositif d'un point de vue de l'utilisateur musicien et de celui du concepteur, permet ainsi de comprendre son fonctionnement et l'intérêt qu'il suscite. L'utilisateur dessine des traits sur la surface tactile à l'aide d'un stylet. Le logiciel traduit au fur et à mesure chaque trait par le symbole musical correspondant. Le choix s'est porté sur une réponse immédiate, symbole par symbole, de façon à ce que le musicien puisse écrire de manière naturelle et corriger éventuellement ses erreurs ou les erreurs d'interprétation du système de reconnaissance.

Après avoir décrit le fonctionnement du prototype, nous présenterons le processus de reconnaissance automatique des formes dessinées. La dernière partie de cet article sera consacrée aux applications pratiques vers différentes formes de notation musicale ainsi que dans plusieurs domaines utilisant peu ou prou l'écriture de la musique.

2. FONCTIONNEMENT DE CALLIMUSIC

2.1. Le principe général

La difficulté principale du développement de Callimusic a été la reconnaissance des traits manuscrits en temps réel. Une partition musicale contient en effet un très grand nombre de symboles dont la position précise est signifiante. Ces symboles sont aussi bien spécifiques à une tradition d'écriture de la musique que des lettres ou des chiffres. Certains sont très peu différents, mais leur confusion entraînerait des fautes manifestes dans la musique interprétée à partir de la partition. De façon à réduire les erreurs de reconnaissance, des contraintes ont été imposées à l'utilisateur, dont la principale est d'écrire dans des cadres proposés par le système en fonction du contexte. Ainsi, le nombre de symboles à différencier est réduit.

Les tentatives précédentes utilisaient un répertoire de tracés différents de ceux utilisés habituellement par les musiciens. L'avantage était une reconnaissance plus sûre, mais entraînait un apprentissage fastidieux par l'utilisateur. Souvent, pour simplifier encore le logiciel, chaque symbole était associé à un seul trait, alors que l'écriture d'un symbole musical fait souvent appel à plusieurs traits. Le système de Ng *et al.*, appelé *Presto* [8], utilise ainsi uniquement des éléments reconnus à partir d'un seul trait. Celui de Forsberg *et al.*, *The Music Notepad* [1] utilise, en complément des gestes produits par le stylet, des éléments disposés dans les menus. Seul, le système de Miyao *et al.* [7] propose une saisie plus naturelle basée notamment sur des *items* à plusieurs traits.

Dans Callimusic, un grand nombre de figures musicales sont implémentées, dont les points de

prolongation, les lignes supplémentaires, les altérations accidentelles, les barres de mesure et les indications de dynamique. Il n'est jamais nécessaire de valider, ce qui rend l'écriture beaucoup plus naturelle. Chaque fois qu'un trait est terminé et le stylet relevé, le symbole remplace l'ébauche sur l'écran.³

Il est possible de tracer grossièrement cinq lignes parallèles afin d'obtenir une portée, puis de dessiner la clé et d'écrire l'indication de mesure et les altérations présentes à la clé. Bien entendu, les fonctions d'édition comme l'annulation de la dernière action, le zoom ou le déplacement d'un symbole sont implémentées. Pour cette dernière fonction, la sélection se fait en entourant librement l'objet avec le stylet.

2.2. Quelques exemples du processus d'édition

L'utilisateur est aidé dans sa démarche d'écriture par l'apparition de petits cadres donnés par le contexte, c'est-à-dire la prise en compte des précédents symboles dessinés. Par exemple, une fois une clé dessinée et reconnue, deux cadres apparaissent à sa droite, laissant le choix entre un premier dièse à la hauteur du *Fa* ou un premier bémol à la hauteur du *Si*. Ensuite, le cadre destiné à la seconde altération surgit au bon endroit, dans l'ordre des quintes ascendantes pour les dièses et des quintes descendantes pour les bémols.



Figure 2. Processus progressif d'écriture

Par ailleurs, lorsque le musicien vient d'écrire la tête et la hampe d'une note, les cadres en pointillés correspondant à une altération accidentelle, un point de prolongation, un accent et une nuance apparaissent autour de la note. Il est également possible, dans un mode « expert », de n'afficher aucun cadre d'édition, rendant l'édition plus proche d'une situation naturelle sur une feuille de papier à musique. Bien entendu, les cadres existent, même s'ils n'apparaissent pas.

3. PROCESSUS DE RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE DES FORMES DESSINEES

3.1. Compromis

La pertinence d'un tel système d'interaction naturelle homme-machine par un stylet est fonction de la qualité de la reconnaissance de chaque tracé. Plus les tracés sont similaires, et plus la reconnaissance s'avère difficile. La solution peut consister en une modification des habitudes du scripteur, mais l'intérêt du système est atténué par l'apprentissage nécessaire par l'utilisateur. Une meilleure solution est un compromis incluant une reconnaissance contextuelle décrite précédemment et une légère simplification de certains gestes habituels

³ Il est également possible de modifier le processus d'affichage dans des préférences.

aux musiciens. Par exemple, il était inutile de conserver tous les tracés correspondant à un bémol. Notre système se contente d'un tracé pour reconnaître cette altération. Il faut également remarquer que l'écriture manuscrite de la musique reste soumise à des variations individuelles parmi les musiciens. Il serait donc impossible de définir une seule sorte de tracé manuel pour chaque symbole devant être reconnu.

3.2. Relation entre contexte et reconnaissance

Une partition musicale est un document à très haut niveau de structuration. L'emplacement de chaque symbole est signifiant. L'information est donc contenue aussi bien dans la forme de la figure que dans sa localisation relative par rapport aux autres symboles. Ainsi, un élément très proche de la gauche d'une tête de note sera probablement une altération accidentelle. Le choix est donc limité au dièse, au double dièse, au bémol, au double bémol et au bémol.

L'équipe IMADOC, spécialiste de la recherche sur la reconnaissance automatique appliquée à des documents manuscrits, a défini une méthode générique pour l'interprétation de documents manuscrits respectant un certain niveau de structuration. Cette méthode se base sur le couplage d'informations de nature contextuelle (l'emplacement auquel les traits sont dessinés permet de délimiter un sous-ensemble de symboles potentiels) avec des informations de reconnaissance (on regarde parmi ce sous-ensemble lequel est le symbole valide). Elle a appliqué cette expertise au cas de la partition musicale. La première étape du processus consiste dans la formalisation de la structure connue.

3.3. Formalisation des connaissances

L'architecture du système repose sur trois types de composants : les composants génériques applicables quel que soit le domaine considéré, les composants propres à la notation musicale et un formalisme.

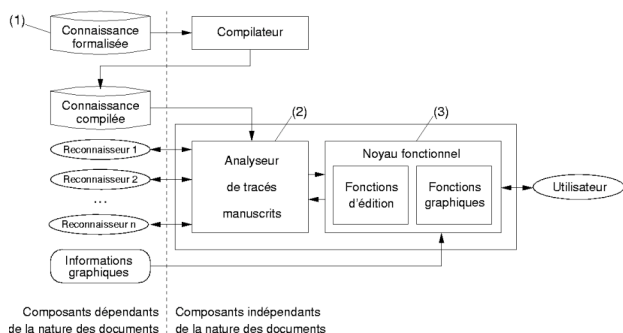


Figure 3. Architecture du système

Ce formalisme permet d'écrire les règles d'interprétation comme la structure graphique du document et de ses éléments, leurs positions relatives et l'ordre chronologique dans lequel ils sont attendus. Ce formalisme n'est pas propre au domaine de la notation musicale. Pour obtenir ce résultat, l'équipe IMADOC a défini quatre concepts de base qui sont : la modélisation de la chronologie de création des éléments dans un

document, la représentation de la structure spatiale, la connaissance de contraintes contextuelles pour chaque élément et une interaction homme-machine basée sur la manipulation d'un stylet.

Les composants génériques comprennent un analyseur de documents manuscrits structurés, un système de fonctions d'édition et son équivalent pour les fonctions graphiques. Il exploite les connaissances modélisées par le formalisme.

Enfin, les composants propres au domaine comprennent les règles d'interprétation, le système de reconnaissance d'objets spécifiques et des informations graphiques.

L'interprétation d'un document structuré à partir d'un tel formalisme est basée sur des règles qui définissent la génération d'un élément. Une règle modélise les constituants d'un symbole ainsi que la forme et l'agencement que ces constituants doivent respecter pour constituer effectivement ce symbole. Un même symbole peut être modélisé à l'aide de plusieurs règles, décrivant ainsi plusieurs façons de le dessiner. Chaque règle possède un certain nombre de paramètres qui constituent le symbole, par exemple un nouveau trait ou un élément déjà interprété. Ainsi, une noire est dessinée avec un seul trait et l'altération qui le précède est dessinée avec deux traits horizontaux et deux traits verticaux :



Figure 4. Tracé d'une noire puis d'un dièse

Les règles correspondantes peuvent alors être :

FilledNoteHead (Stroke s) ...

Sharp (horizontalSeg hs1 , horizontalSeg hs2 , verticalSeg hs1 , verticalSeg hs2) ...

La forme générique d'une règle respecte toujours la structure suivante :

SymbolName (Parameter 1 , ... , Parameter n)

Document Context Verification block (DCV).

Shape Context Verification block (SCV).

Shape Recognition block (SR).

Document Context Creation block (DCC).

Les blocs DCV et DCC offrent une vision globale du document de façon à définir le contexte dans lequel chaque élément doit être localisé.

Le bloc DCV spécifie les contextes dans lesquels le symbole créé par la règle peut être présent (par exemple, un dièse peut être dessiné à gauche d'une tête de note).

Le bloc DCC indique les contextes qui seront générés après la création du nouvel élément (par

exemple, une tête de note venant d'être créée autorise le dessin d'une altération à sa gauche, d'un point de prolongation à sa droite, et d'une hampe montante ou descendante).

Les blocs SCV et SR permettent, dans un contexte donné, une vision locale de l'élément à reconnaître.

Le bloc SCV formalise les contraintes locales (par exemple la nécessité d'avoir quatre traits se croisant pour un dièse).

Le bloc SR correspond à l'identification de forme (la famille de symboles, par exemple celle des altérations).

L'ensemble du formalisme repose sur la définition de contextes structurels qui modèlent, d'une part des lieux spécifiques dans le document, et d'autre part quels éléments sont susceptibles ou doivent obligatoirement exister dans chacun de ces emplacements.

Ainsi, une altération située est reconnue avec deux traits horizontaux et deux traits verticaux localisés à gauche d'une tête de note. Le bloc DCV s'écrit donc [5] :

DCV : *Head*→*head*[left,all]*hs1*,
 head[left,all]*hs2*,
 head[left,all]*vs1*,
 head[left,all]*vs2*.

3.4. Les cadres d'édition

Les cadres structurels en pointillés qui apparaissent sur l'écran dépendent de l'interprétation de toutes les règles énoncées dans le formalisme.

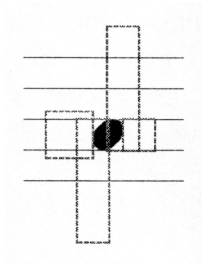


Figure 5. Cadres d'édition autour d'une tête de note

Une fois un tracé élaboré dans un cadre, le programme repère de quel cadre il s'agit puis autorise un certain nombre de symboles possibles. Le repérage du cadre dans lequel un trait est dessiné tolère un débordement de celui-ci. Cette analyse structurelle est progressive. Elle construit la partition en limitant à chaque fois le nombre de possibilités pour la reconnaissance des gestes d'écriture. La superposition de plusieurs cadres est également prévue par l'attribution d'un numéro à chaque couche.

Ainsi, chaque cadre apparaissant sur la partition est associé à un certain nombre de systèmes de reconnaissance, spécifiquement prévu pour reconnaître les symboles attendus dans ce cadre d'édition. Comme le nombre de symboles possible dans un cadre donné est

limité par l'analyse structurelle progressive, la qualité de la reconnaissance est meilleure et le dispositif est moins sensible aux variations individuelles des tracés des utilisateurs. Une fois la reconnaissance couronnée de succès, la trace manuscrite est remplacée par le symbole provenant d'une police de caractères spécialisée dans les symboles musicaux. Un grand nombre de ces polices sont disponibles gratuitement ou non.

4. APPLICATIONS PRATIQUES

4.1. Différentes formes de notation musicale

Le premier système de notation musicale qui a servi de base à notre recherche a été celui de la musique tonale mesurée classique sur portées de cinq lignes. Bien entendu, ce système de notation n'est pas le seul existant parmi les musiciens pour conserver et transmettre la musique à l'aide d'une écriture symbolique. Il est aisé d'en repérer d'autres comme les tablatures pour les instruments à cordes pincées (guitares...), les neumes du plain-chant et la notation utilisée pour les percussions. Le principe du formalisme développé pour Callimusic n'est pas seulement puissant pas sa souplesse et son efficacité dans le cadre du système de notation classique. Il permet également de s'adapter à tout système, simplement en redéfinissant un ensemble de règles appropriées. Environ 80 règles ont été définies pour la notation classique. La durée de l'analyse structurelle entre le moment où l'utilisateur termine un tracé en relevant son stylet et celui où le symbole issu de la police de caractères apparaît sur l'écran est actuellement d'environ 400 ms. Le fonctionnement est donc suffisamment rapide pour être considéré par les musiciens comme efficace. Il est de plus adaptable en modifiant les règles.

Des essais ont été menés pour saisir du plain-chant sur des portées de quatre lignes. Les règles du formalisme doivent alors permettre la reconnaissance des neumes, c'est-à-dire de courtes figures ornementales ou mélodiques exécutées sans respiration. La diversité des notations de plain-chant est remarquable. La notation de l'Ecole de Notre-Dame est basée sur un système rythmique de type modal. Au contraire, d'autres notations plus récentes adoptent une relation directe entre la figure isolée et la durée du son correspondant. Un formalisme tel que celui de Callimusic est aisément modifiable et permet donc une adaptation à chaque type précis de notation musicale. Les recherches ont abouti à la définition des règles correspondant aux figures suivantes : *punctum*, *pes*, *clivis* et *scandicus*. Une vingtaine de règles suffisent à modéliser l'ensemble de la saisie de ce type de notation.

Les tablatures utilisées pour les instruments frottés à cordes pincées comme les guitares représentent, non pas ce qui doit être entendu, mais comment la note doit être jouée. Elle indique donc la position des doigts sur les cordes. Les tablatures pour orgue induisent le même type de raisonnement en ce qui concerne la mise au point d'un système de saisie de partition. Les règles

élaborées dans ce prototype encore basique modélisent un certain nombre de principes :

- à la gauche de chaque ligne est indiquée la hauteur d'accord de la corde à vide ;
- les nombres représentés sur les cordes correspondent à la frette sur laquelle la corde doit être pressée ;
- les durées sont représentées selon le système classique ;
- quelques symboles indiquent le mode de jeu à utiliser (par exemple, « H » représente un son harmonique).

Les tablatures pour percussion sont très proches des précédentes dans leur principe. La métaphore graphique est toujours la représentation de la constitution physique de l'instrument et de la position des doigts de l'instrumentiste. Il est donc aisé de dériver les règles de description d'une notation par tablatures d'un autre système de tablatures.

4.2. Domaines d'application

Une mise en page sophistiquée au niveau des systèmes et des pages n'est pas étudiée par l'équipe de chercheurs associés à ce projet. En effet, les logiciels éditeurs professionnels comme Finale ou Sibelius accomplissent parfaitement ces tâches. L'intérêt de l'écriture naturelle de la musique réside plus dans la saisie des symboles que dans l'élaboration de l'ensemble de la mise en page. Nous envisageons l'intégration de Callimusic comme une nouvelle forme d'entrée de la musique. Par exemple, Finale propose une entrée par les outils *Simple Entry*, *Speedy Entry*, *HyperScribe*, par une entrée sonore ou par un scan d'une partition. Un plug-in Callimusic pourrait autoriser un nouveau mode d'entrée des symboles par saisie manuscrite directe. La puissance de notre système serait ainsi associée à celle de la mise en page de Finale, de Sibelius ou de tout autre logiciel sophistiqué d'édition. Les compositeurs et les arrangeurs éviteraient ainsi une recopie fastidieuse sur un logiciel professionnel d'édition musicale. Ils seraient également à même de noter à la volée leurs idées musicales et de les gérer sous la forme de fichiers ou de les classer à l'intérieur d'une base de données affichant toutes les idées, à la manière des logiciels de sauvegarde, de visualisation et de classement de photographies ou de chansons.

La pédagogie représente un second domaine d'application envisagé pour Callimusic. En effet, un professeur de musique dans l'enseignement secondaire pourrait valoriser le résultat graphique de ses élèves dans leurs tentatives de noter la musique. Le résultat visuel et l'audition directe de la note écrite dynamiseraient un apprentissage souvent difficile de la notation musicale. Un système de saisie manuscrite à reconnaissance automatique susciterait également une réflexion, par les erreurs, les tâtonnements et les succès de chacun, de découvrir de manière vivante et de s'interroger sur le principe de la notation classique. En conservatoire ou en université, les cours de formation de

l'oreille (l'enseignement du « solfège ») pourrait être prolongés par des séances individuelles d'entraînement avec un ordinateur intégrant des exercices auditifs comme des dictées mélodique, rythmique, harmonique ou « à trous ». Les exercices d'harmonisation, d'arrangement et d'orchestration sont également concernés. La saisie manuscrite par l'élève renouvellera la saisie sur clavier d'ordinateur ou de piano et semblera plus naturelle, surtout pour les non pianistes.

Le marché ludo-éducatif est également concerné. Un système comme Callimusic, très simplifié et intégré à des jouets éducatifs conçus par des spécialistes de ce domaine pourrait ouvrir de nouvelles pistes dans le premier contact avec la notation musicale dès le plus jeune âge. Les aspects visuels, sonores et gestuels sont en effet combinés dans notre système, comme dans beaucoup d'activités ludo-éducatives. La démocratisation des interfaces à écran tactile rend ces applications envisageables.

Des applications en ligne utilisant à distance la partie logicielle installée sur un serveur pourrait permettre d'enrichir les sites ludo-pédagogiques. Les smartphones serviraient alors d'interfaces tactiles et la comparaison entre les joueurs deviendrait possible. Ce type d'applications dans d'autres domaines que la notation musicale est souvent pris en charge aussi bien par des sites associatifs ou commerciaux.

5. CONCLUSION

L'objectif de ce projet est de combler un manque évident d'applications établissant un lien entre la saisie manuscrite de la musique et l'édition imprimée. La combinaison des interfaces tactiles et des recherches fondamentales en direction de la reconnaissance automatique de l'écriture dans des documents structurés a permis d'envisager un système renouvelant la manipulation de la notation d'un langage hautement symbolique et structuré : la musique. Nous avons présenté les principes généraux de Callimusic, ses possibilités, l'état d'avancement des recherches menées conjointement entre musiciens et informaticiens, et les domaines d'application envisagés.

La caractéristique principale du système est d'autoriser une saisie avec une interprétation immédiate des actions en tenant compte du contexte dans lequel elles ont été menées. Chaque trait est interprété en fonction des éléments précédemment reconnus et de sa position relative. L'ensemble obéit à des règles et constitue un formalisme adaptable. Ainsi, le système est améliorable et applicable à des procédés de notation musicale aussi différents que la notation classique, les neumes du plain-chant ou les tablatures.

Les prototypes déjà développés sont encore de l'ordre de la démonstration. Les progrès qui seront réalisés dans les années qui viennent les rendront plus facilement utilisables dans le monde économique. Les symboles et les règles seront plus nombreux à être implémentés.

L'ouverture du système à différents formats de sauvegarde comme ceux issus du XML sera également étudiée. Une autre piste très différente concerne l'apprentissage dans un réseau neuronal, comme l'a montré S. George dans son article « Online pen-based recognition of music notation with artificial neural networks » [2] en 2003.

Les développements futurs devront permettre à un public très large d'avoir accès à ce type de solution. Les avancées technologiques et la baisse des coûts inciteront les acteurs de différents domaines à étudier les possibilités innovantes offertes par la reconnaissance automatique de l'écriture manuscrite de la musique. Ecrire de la musique ou améliorer différentes compétences musicales de manière intuitive reste l'un des objectifs de nos recherches.

6. REFERENCES

- [1] Forsberg, M. D., Zelesnik, R. "The Musical Notepad", ACM Symposium on User Interface Software & Technology, 1998, pp. 203-210.
- [2] George, S. "Online pen-based recognition of music notation with artificial neural networks", Computer Music Journal, 27(2), 2003, pp. 70-79.
- [3] IMADOC, site web : <http://www.irisa.fr/imadoc>
- [4] IRISA, site web : <http://www.irisa.fr>
- [5] Macé, S., Anquetil, E., Bossis, B. "Pen-Based Musical Score Editors", *Intelligent Music Information Systems: Tools and Methodologies*, Jialie Shen, John Shepherd, Bin Cui, Ling Liu (ed.), Hershey-New York (USA), Information Science Reference, 2008, pp. 258-281.
- [6] Macé, S., Anquetil, E., Bossis, B., Garrivier, E. "A Pen-based Musical Score Editor using structural Information", *ICMC05 Proceedings, International Computer Music Conference*, Barcelone, 2005, p. 415-418.
- [7] Miyao, H., Maruyama, M., "An Online Handwritten Music Score Recognition System", *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, 2004, vol.1, pp. 461-464.
- [8] Ng, E., Bell, T., Cockburn, A. "Improvements to a Pen-Based Musical Input System", *Proceedings of the 8th Australian Conference on Computer Human Interaction*, 1998, pp. 178-185.
- [9] Université Rennes 2, site web : <http://www.uhb.fr>