

# De la Gestion des Connaissances à la Gestion des Signes : Application à la Transmission des Savoir-faire Musicaux

## THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 25 octobre 2013

pour l'obtention du

**Doctorat de l'Université de La Réunion**

(spécialité informatique)

par

**Véronique Sébastien**

### Membres du Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	François Pachet	Directeur de Recherche HDR Sony Computer Sciences Laboratory Paris
	Amedeo Napoli	Directeur de Recherche HDR CNRS - LORIA, Université de Lorraine
<i>Examineurs :</i>	Bruno Bachimont	Directeur de Recherche HDR Université de Technologie de Compiègne
	Alain Senteni	Professeur des Universités School of e-Education, HBMeU, Dubaï
	Rémy Courdier	Professeur des Universités Université de La Réunion
<i>Directeur de Thèse :</i>	Henri Ralambondrainy	Professeur des Universités Université de La Réunion
<i>Co-Directeur de Thèse :</i>	Noël Conruyt	Maître de Conférences Université de La Réunion



## Résumé

Les systèmes informatiques actuels sont adaptés à la gestion de données et de connaissances structurées. Cependant la collecte et la transmission de savoir-faire immatériels requiert de nouveaux modèles afin de construire des outils innovants correspondant aux besoins des experts et amateurs des domaines considérés. La caractéristique commune de nombreux domaines artistiques est de mettre en avant la création et la comparaison d'interprétations personnelles d'objets (les œuvres) par des sujets (les interprètes).

Dans cette thèse, nous proposons donc une nouvelle approche sémiotique pour la gestion d'interprétations de haut niveau dans des environnements multimédia utilisant les Technologies de l'Information et de la Communication. Pour ce faire, nous posons une nouvelle définition du Signe tel qu'étudié dans les Sciences de l'Information et de la Communication, que nous nommons Signe Interprétatif. Cette nouvelle définition se fonde sur une formalisation de la notion d'interprétation et de ses propriétés. Le passage de la gestion des Connaissances à la gestion des Signes Interprétatifs s'opère par la saisie et le partage d'annotations sémiotiques entre les utilisateurs d'une plateforme de travail collaboratif. Une modélisation sémantique et une méthodologie d'acquisition de ces annotations sont proposées. Cette dernière se fonde sur la co-construction de modèles descriptifs des objets à interpréter, respectant les logiques descriptives en cours dans le domaine étudié. On établit ainsi un équilibre entre les méthodes traditionnelles mises au point par les experts du domaine et la sensibilité propre de chacun des interprètes. Nous décrivons également une structure de Base de Signes et proposons des processus d'automatisation destinés à accompagner l'utilisateur dans la description de son interprétation d'une œuvre en fonction de ses objectifs et du contexte d'étude. Chacune de nos contributions est appliquée au domaine musical, en particulier à l'apprentissage du piano classique pour lequel nous avons réalisé des prototypes expérimentaux de gestion des Signes Musicaux.

**Mots-clés :** gestion des connaissances, savoir-faire, gestion des signes, sémiotique, interprétation, annotation, musique, piano, apprentissage, e-Learning.

## Abstract

Current information systems can manage structured data and knowledge. However, collecting and transmitting intangible know-how requires new models in order to design innovating tools matching people needs. In particular, artistic fields often require to build and compare personal interpretations of objects (works) by subjects (interpreters).

In this thesis, we build a semiotic approach to manage high level interpretations in multimedia environments using Information and Communication Technologies. To do so, we define an Interpretative Sign derived from the original Sign defined in the field of Information and Communication Sciences. This new object is based on a formalization of the concept of interpretation and its properties. The shift from Knowledge management to Signs Management is operated through semiotic annotations, created and shared between different users on a collaborative platform. A semantic model and an acquisition methodology of these annotations are proposed. The latter is based on the co-construction of descriptive models for the interpreted objects, respecting the descriptive logics generally in use in the considered field. Thus, we establish a balance between traditional methods developed by experts over time and personal approaches from

interpreters. We also describe a Signs Base structure and propose some automation methods to assist users in the description of their interpretations according to their aims, profiles and situations. Each contribution is applied to the musical field, in particular to classical piano learning which we designed experimental Signs management prototypes for.

**Keywords:** knowledge management, know-how, signs management, semiotics, interpretation, annotation, music, piano, learning, e-Learning.

# Table des Matières

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>7</b>
1.1	Contexte .....	7
1.2	Problématique .....	7
1.3	Objectifs et démarche .....	9
1.4	Périmètre de la thèse .....	10
1.5	Organisation de la thèse.....	10
<b>2</b>	<b>Gérer des connaissances pour l'apprentissage musical .....</b>	<b>12</b>
2.1	Définitions .....	12
2.1.1	Savoir et savoir-faire.....	12
2.1.2	Représenter des connaissances .....	13
2.1.3	Bases de connaissances.....	14
2.2	Transmettre des savoir-faire musicaux .....	16
2.2.1	La musique occidentale .....	16
2.2.2	L'interprétation musicale .....	18
2.2.3	Les acteurs de la pratique musicale .....	20
2.2.4	L'apprentissage instrumental : de la curiosité à la virtuosité.....	22
2.3	Gérer des données et connaissances musicales en informatique .....	26
2.3.1	Acquisition et traitements de données musicales .....	26
2.3.2	Représentation de concepts musicaux.....	28
2.3.3	Extraction automatique de Connaissances Musicales (ECM).....	33
2.4	Synthèse .....	37
<b>3</b>	<b>Les approches des TIC pour l'apprentissage musical.....</b>	<b>38</b>
3.1	Applications pour l'apprentissage musical.....	38
3.1.1	La place des TIC dans l'apprentissage musical .....	38
3.1.2	Les éditeurs de partitions .....	39
3.1.3	Les communautés de partage de partitions.....	41
3.1.4	Le partage de contenus multimédia.....	43
3.1.5	Le e-Learning instrumental.....	43
3.1.6	Outils pour la musicologie et la composition assistée par ordinateur .....	51
3.1.7	Synthèse et discussion sur le e-Learning instrumental .....	53
3.2	L'annotation en musique.....	54

3.2.1	L'annotation de partitions musicales .....	54
3.2.2	L'annotation en informatique .....	56
3.2.3	Ontologies pour l'annotation .....	57
3.2.4	Annoter des partitions électroniques.....	58
3.2.5	L'annotation sémantique automatique en musique.....	61
3.3	Synthèse .....	62
<b>4</b>	<b>Gérer des Signes : définition, modélisation et acquisition .....</b>	<b>65</b>
4.1	Théorie des Signes et Interprétation.....	65
4.1.1	Définition du Signe .....	65
4.1.2	Définition de l'Interprétation .....	66
4.1.3	De l'Interprétation au Signe : le Signe Interprétatif .....	68
4.1.4	Le processus de Signification.....	71
4.1.5	Théories connexes.....	72
4.1.6	De la Connaissance au Signe .....	77
4.2	Modélisation du Signe Interprétatif en informatique.....	81
4.2.1	L'annotation comme modèle de SI numérique.....	81
4.2.2	Formalisation de l'annotation sémiotique .....	85
4.2.3	Schémas de classe de l'annotation sémiotique.....	87
4.2.4	Processus de Signification : logiques descriptives et annotations sémiotiques ...	90
4.3	Application : étude des Signes Musicaux .....	93
4.3.1	Typologie des Signes Musicaux .....	93
4.3.2	Capture et analyse de Signes dans un cours de piano .....	96
4.3.3	Du Signe Musical à l'annotation sémiotique pour l'apprentissage.....	99
4.3.4	Logiques descriptives, modèles descriptifs et ontologies pour l'étude d'œuvres musicales101	
4.3.5	Discussion : qualité de la description .....	117
4.4	Synthèse .....	118
<b>5</b>	<b>Gérer des Signes : structure, peuplement et validation d'une Base de Signes .....</b>	<b>120</b>
5.1	Définition et structure d'une Base de Signes .....	120
5.1.1	Principes méthodologiques : co-construction et itération.....	120
5.1.2	Définition d'une Base de Signes .....	121
5.1.3	Modélisation des Graphes.....	123
5.2	Peuplement d'une Base de Signes .....	123
5.2.1	Constitution des graphes d'objets.....	124

5.2.2	Constitution des graphes d' AS.....	125
5.2.3	Emergence et constitution des graphes de notions.....	126
5.3	Automatisations : aide à l'annotation sémiotique.....	127
5.3.1	Besoins et objectifs.....	127
5.3.2	Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique (AAAS).....	128
5.4	Validation des annotations sémiotiques.....	134
5.5	Application : création d'une Base de Signes Musicaux.....	136
5.5.1	Définition et objectifs du MSB.....	136
5.5.2	Architecture du MSB.....	137
5.5.3	Modélisation et peuplement d'un MSB.....	138
5.5.4	Annotation sémiotique automatique de partitions.....	138
5.5.5	Validation des Annotations Sémiotiques Musicales.....	150
5.6	Synthèse.....	150
<b>6</b>	<b>Validation expérimentale de l'approche sémiotique.....</b>	<b>152</b>
6.1	Présentation du contexte de validation.....	152
6.2	Plateforme d'annotation sémiotique de partitions @-MUSE.....	153
6.2.1	Objectifs.....	153
6.2.2	Conception et implémentation.....	153
6.2.3	Tests et Résultats.....	158
6.3	Analyseur automatique de partitions : Score Analyzer.....	159
6.3.1	Objectif.....	159
6.3.2	Conception et implémentation.....	159
6.3.3	Tests et résultats.....	161
6.4	Synthèse.....	162
<b>7</b>	<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>164</b>
7.1	Synthèse des propositions.....	164
7.2	Perspectives.....	166
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>168</b>
	<b>Table des Figures.....</b>	<b>173</b>
	<b>Liste des Publications.....</b>	<b>176</b>
	<b>Annexe A : Typologie des Signes Musicaux.....</b>	<b>177</b>
	<b>Annexe B : Transcription d'un cours de piano.....</b>	<b>180</b>

## 1 Introduction

### **1.1 Contexte**

Qu'il s'agisse des métiers ou des arts, les méthodes de transmission de savoir-faire sont des rouages essentiels de la pérennisation des connaissances et de l'évolution des civilisations. Pour ce faire, de nombreux codes ont été mis au point pour tenter de coucher sur le papier les gestes caractéristiques du savoir-faire étudié. Cependant, même en tentant d'être exhaustif, et en inventant des symboles des plus expressifs, ces écritures ne suffisent pas à transmettre l'ensemble des informations nécessaires à la pratique correcte de l'activité considérée, notamment du fait de sa complexité sur les plans gestuels et cognitifs. De plus, chaque individu a une manière différente d'aborder le savoir-faire considéré, avec son passé, son expérience, sa morphologie et son ressenti. Ainsi, un musicien doit-il « interpréter » la partition, un cuisinier « mettre en œuvre » la recette, un professeur « animer » son cours.

Dans ce cadre, la relation entre le spécialiste du domaine et son apprenti est capitale. La maîtrise du savoir-faire ne s'acquiert que lorsque l'apprenti pratique l'activité sous la surveillance de l'expert, à même de corriger toute erreur en temps réel et de prodiguer les conseils nécessaires pour surmonter les difficultés rencontrées. L'expérience naît également de la confrontation de la production de l'apprenant avec celle d'autres membres de sa communauté, les échanges permettant bien souvent un bénéfice mutuel des pairs.

Si cette méthode reste la plus éprouvée à ce jour, d'autres formes de transmission des savoir-faire sont apparues avec l'essor des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC). Ces dernières sont certes moins contraignantes, mais restent également moins reconnues, de par la difficulté à évaluer leur qualité. Les méthodes impliquant les TIC (DVD, sites web, logiciels) sont nombreuses et éparses, de qualité hétérogène. Les ressources multimédias (vidéos, audio) potentiellement éducatives sont encore plus nombreuses sur le Web, mais manquent souvent de structuration pour être utilisables au-delà du cadre de la simple initiation informelle.

Dans ce contexte le développement d'une base de « pratiques » semble être une piste intéressante pour le partage, la transmission et la pérennisation des savoir-faire culturels à grande échelle. Cependant ce qui se prête bien aux sciences exactes et expérimentales (mathématiques, physique, biologie), via la manipulation de données textuelles ou numériques, semble limité pour les savoir-faire culturels (danse, cuisine, musique, peinture), qui s'appuient sur la pratique et l'observation de cas concrets, et où la notion de vérité absolue n'est pas de mise. De plus, si la liberté d'interprétation est plus importante dans la pratique d'un savoir-faire, on ne peut toutefois occulter les méthodes et processus déjà mis en place par les experts du domaine et transmis de génération en génération, qu'il s'agisse des principes de base pour réussir à monter des blancs d'œufs en neige, ou des doigtés à appliquer pour jouer une gamme au piano. De ce fait, si la science et la culture ne s'opposent pas systématiquement, il convient de proposer une approche différente pour la gestion de savoir-faire culturels à grande échelle.

### **1.2 Problématique**

Les bases de connaissances sont aujourd'hui largement répandues, notamment dans les domaines scientifiques. Certaines sont issues de méthodes d'acquisition et de traitement des connaissances qui permettent de collecter et relier de nombreuses données afin d'aider les chercheurs à en extraire

des informations pertinentes par des processus d'inférence (classification, segmentation, etc.). D'autres n'utilisent pas ces technologies d'analyse de données et d'apprentissage automatique, mais proposent un accès par des métadonnées à des ressources pédagogiques diversifiées et évoluées. Mais ces méthodes restent limitées pour collecter et partager des savoir-faire de haut niveau. En effet, la modélisation d'un savoir-faire est plus délicate pour deux principales raisons. Tout d'abord, si la connaissance peut s'exprimer par du texte (assertion, description, formule), le savoir-faire doit être illustré et pratiqué (gestes, sonorités, arômes) pour être maîtrisé. Cette démonstration doit de plus être accompagnée d'explications, voire d'un dialogue, pour pouvoir être correctement reproduite. Ensuite, le savoir-faire, surtout dans les domaines artistiques, laisse lieu à l'interprétation : non seulement l'objet à obtenir à l'aboutissement de l'apprentissage peut varier, mais aussi le cheminement lui-même, sans forcément impliquer un jugement de valeur. Il faut donc être en mesure de collecter ces interprétations, de les comparer et de les relier afin d'en extraire l'essence du savoir-faire en question.

Afin d'explicitier ces différents problèmes, nous proposons un cas d'école. La Figure 1 décrit ce cas. Deux pianistes étudient la *Sonate KV545* de Mozart. Ils échangent entre eux via un forum de discussion sur le Web. Une recherche dans une base de connaissances dédiée à la musique leur renvoie les résultats suivant : titre, compositeur, date de publication, recueil, liens vers des partitions au format PDF, des interprétations du morceau sur YouTube, des liens vers des pièces similaires ou y faisant hommage. Les deux musiciens identifient des parties difficiles à jouer : chacun donne sa méthode de travail en l'illustrant avec ses moyens. Le pianiste A pointe une des vidéos de YouTube où l'interprète utilise son doigté. Le pianiste B enregistre une vidéo où il explique son doigté, plus adapté à sa morphologie, et la poste sur le forum. Le pianiste B propose une autre gestuelle pour la mesure 35, telle qu'il l'a apprise dans son école. Un troisième pianiste C, qui connaît A, lui demande des conseils pour jouer cette sonate. A pense à l'orienter sur le forum, mais s'aperçoit que ses échanges avec B sont peu accessibles pour une tierce personne, la discussion ayant souvent dévié du thème principal, à savoir l'étude de la pièce. Il lui remet alors une copie de sa partition comportant ses annotations, et lui recommande d'aller voir le forum pour avoir des détails.

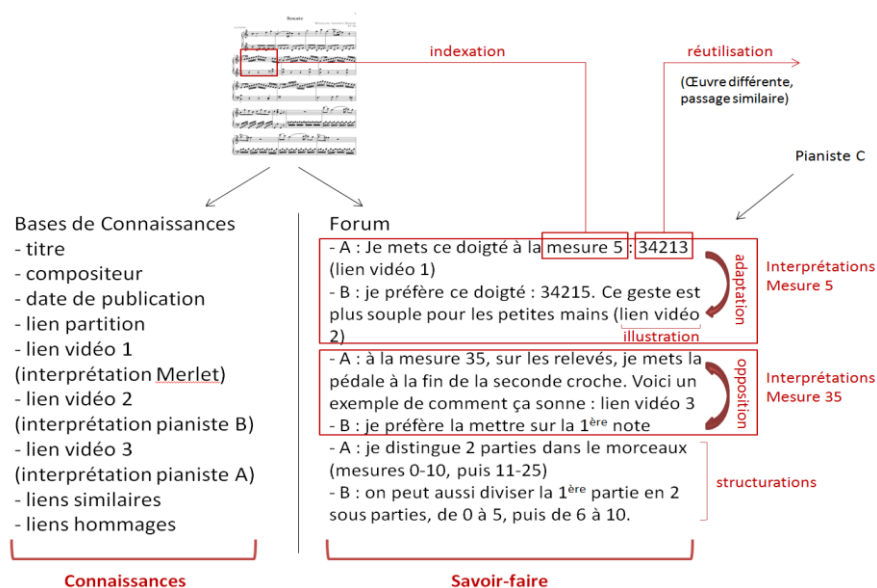


Figure 1 : Cas d'école de partage de savoir-faire en musique. A et B sont deux pianistes discutant d'une œuvre sur un forum en ligne



Cet exemple fait apparaître de nombreuses questions dans la collecte et le partage de savoir-faire vivants :

- Comment désigner puis décrire une partie précise d'une œuvre ?
- Comment exprimer des gestes et des sonorités perçus ou à obtenir ?
- Comment exprimer une interprétation personnelle (une vision, une approche, une méthode) d'une œuvre, étape par étape ?
- Comment structurer et présenter ces échanges pour qu'ils soient réutilisables par des tiers (humain ou programme) ? sur d'autres œuvres ?
- Comment valider les interprétations décrites ? Sur quels critères ?
- Peut-on établir des liens entre ces interprétations (adaptation, opposition, alternative) ?
- Un programme informatique peut-il assister les apprenants dans leur pratique de l'instrument (suggestion de pièces, détection des difficultés, suggestion d'exercices) ? Doit-il se limiter aux aspects techniques, ou peut-il également traiter de l'expression et de l'émotion ?

On distingue alors plusieurs catégories de sous-problèmes dans la capture et le partage de savoir-faire par les TIC : la représentation des entités à manipuler (une œuvre, une interprétation, un geste), leurs liens (indexation, dépendance, similarité), la saisie, la recherche, la présentation et la validation des savoir-faire. La complexité de tels problèmes nous incite à nous inspirer autant que possible de la pratique traditionnelle des savoir-faire considérés, et à nous appuyer sur des cas concrets (comme l'exemple précédent) pour construire et valider une solution acceptable.

### ***1.3 Objectifs et démarche***

Nous proposons dans cette thèse un modèle de description de savoir-faire fondé sur les Signes, démonstrations concrètes et personnelles d'éléments de savoir-faire. On émet en effet l'hypothèse que la modélisation d'interprétations individuelles plutôt que de connaissances génériques permettra de bâtir un modèle descriptif adapté à la préservation et au partage de savoir-faire à grande échelle dans un domaine donné.

Pour ce faire, nous rappelons tout d'abord la façon dont les connaissances sont modélisées dans un système informatique, de la définition de structures de données à la construction de bases de connaissances. Nous étudions également leur utilisation et leurs limites dans l'apprentissage de la musique instrumentale, au travers de différents formats ou types d'applications musicales.

Les outils présentés ne répondant que partiellement aux questionnements soulevés précédemment, nous proposons un nouveau concept pour la modélisation de savoir-faire : le Signe. Nous le définissons dans le cadre des Sciences de l'Information et de la Communication (SIC) et l'adaptions à notre contexte technologique en informatique (STIC). Nous concevons ensuite un cadre et une méthodologie pour la construction et le peuplement de la base de Signes. Pour illustrer les différents concepts et processus présentés, nous considérons le cas particulier de l'apprentissage du piano. Cette construction repose sur l'annotation de partitions. Les contributions proposées sont éprouvées via des prototypes fonctionnels qui permettent également d'étudier les Interactions Homme-Machine (IHM) en jeu dans la collecte de Signes Musicaux. Nous étudions également l'automatisation de certains processus pour faciliter la démarche de construction de la Base.

---

Les expérimentations sont appliquées au domaine de l'apprentissage instrumental, et plus particulièrement du piano, instrument que nous avons pratiqué pendant près de treize ans au Conservatoire à Rayonnement Régional de La Réunion auprès de professeurs certifiés. La pratique musicale présente en effet de nombreux avantages comme champ d'expérimentation : il s'agit d'un domaine complexe et riche de plusieurs siècles de pratique, de transmission et de création. À ce titre, il dispose de plusieurs méthodes d'apprentissage (selon des écoles). De plus, il requiert à la fois des connaissances théoriques impliquant une activité intellectuelle (lecture d'une partition, compréhension de l'harmonie, mémorisation d'un morceau) et de la pratique, impliquant une activité gestuelle et sensorielle (répétition d'un mouvement, synchronisation des membres, recherche de sonorité). Ces deux aspects doivent être pratiqués conjointement pour maîtriser l'instrument, ce qui rend la conception d'outils dédiés à l'apprentissage musical plus complexe que pour d'autres domaines.

### ***1.4 Périmètre de la thèse***

On s'intéresse à l'apprentissage pratique des savoir-faire par la confrontation d'interprétations modélisées dans un environnement numérique, et non directement à la composition d'œuvres (bien qu'une interprétation reste en soi une création), ou à l'apprentissage de concepts purement théorique. De même, les aspects pédagogiques seront valorisés par les outils s'appuyant sur cette approche, car les méthodes et exercices existent déjà dans les domaines concernés. L'objectif de la thèse est de voir comment les transcrire et les enrichir au mieux dans le domaine numérique par la constitution d'une Base de Signes. Ainsi, en musique, nous nous intéressons à la pédagogie employée pour l'apprentissage d'un instrument, plus qu'à la musicologie et à la composition, même si ces derniers sont intimement liés à la compréhension de l'œuvre. Pour autant, les contributions proposées peuvent tout à fait être étendues à d'autres domaines, avec plus ou moins d'adaptations selon le cas. Certains exemples donnés dans ce mémoire s'appuient d'ailleurs sur l'analyse d'œuvres picturales. Naturellement, les propositions formulées se prêtent essentiellement aux domaines faisant l'objet d'interprétations multiples.

De par son cadre d'application et bien qu'étant une thèse en informatique, ces travaux sont nécessairement interdisciplinaires. Ainsi, nous traiterons également dans ce mémoire de musicologie, de sémiotique et de pédagogie, à l'interface avec la gestion des connaissances, le e-Learning, la fouille de données, le Web Sémantique, et l'IHM. Pierre Tchounikine, spécialisé dans les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH), indique que « Considérer un environnement pédagogique fondé sur l'informatique requiert de penser, problématiser, représenter, modéliser, implémenter ou analyser des objectifs, problèmes, modèles et/ou logiciels complexes. Cela ne peut se faire en séparant les questions pédagogiques d'une part, et les problèmes informatiques d'une autre : un travail multidisciplinaire est nécessaire » [66]. Il s'agit donc autant que possible de se mettre à la place de l'apprenant ou de l'enseignant et de concevoir des modèles et dispositifs répondant effectivement à leurs besoins.

### ***1.5 Organisation de la thèse***

Suite à l'exposition de notre problématique, les chapitres 2 et 3 dressent respectivement un État de l'Art sur la gestion de connaissances musicales et sur l'apprentissage d'un instrument par les TIC. Ces chapitres nous permettent également de rappeler les fondements des principaux domaines dont il est question dans cette thèse, comme l'ingénierie des connaissances ou la pédagogie musicale. En

particulier, la compréhension des enjeux du domaine de savoir-faire étudié est essentielle à la construction d'une solution adaptée. En conclusion du chapitre 3, une analyse des approches existantes en TIC permet de cerner les limites de l'existant en matière de préservation et de partage de savoir-faire musicaux de haut niveau.

Nous proposons donc une nouvelle approche pour le partage de savoir-faire reposant sur la modélisation d'interprétations à l'aide de Signes. Cette approche sémiotique est décrite dans les chapitres 4 et 5 au moyen de deux contributions majeures de nos travaux. La première consiste en la définition d'un Signe Interprétatif adapté à la capture de Signes dans un environnement informatique sous forme d'Annotations Sémiotiques. Un modèle d'annotation et une méthodologie d'acquisition de tels Signes sont également proposés. La seconde contribution consiste en une proposition de structure de Base de Signes. Cette proposition est accompagnée d'une analyse de la démarche de peuplement d'une telle Base permettant d'automatiser certains processus propres à la description d'interprétations pour la transmission de savoir-faire. Une méthode de validation de ces interprétations est également proposée. Pour chacune de nos deux contributions, une application au domaine musical est proposée. En effet, la musique est à la fois source d'inspiration et terrain d'expérimentation pour les propositions décrites. La fin du chapitre 4 expose donc les spécificités du Signe Musical, notamment dans le domaine pédagogique, et propose des modèles descriptifs et ontologies adaptés à la saisie d'annotations sémiotiques en musique. La fin du chapitre 5 présente une architecture de Base de Signes Musicaux, ainsi que différentes méthodes de peuplement semi-automatique d'une telle base. Les lecteurs musiciens pourront donc directement se reporter aux parties 4.3 et 5.5 de ce mémoire pour prendre connaissance des applications possibles de notre approche sémiotique en musique (voir Figure 2).

Enfin, le chapitre 6 décrit les expérimentations menées durant nos travaux. Elles consistent principalement en la conception, l'implémentation et les tests de deux prototypes d'application. La première est une plateforme collaborative d'annotation sémiotique de partitions musicales. La seconde est un analyseur automatique de partitions ayant pour objectif de déterminer leurs niveaux de difficulté respectifs. Ces deux prototypes permettent de confirmer la pertinence de notre approche en situation de partage de savoir-faire musicaux, et d'identifier les limites de celle-ci.

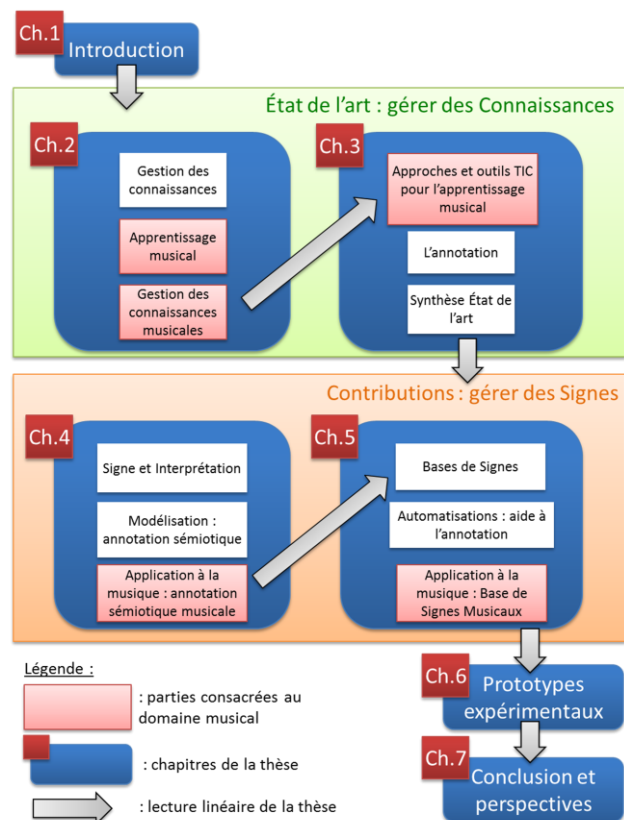


Figure 2 : Organisation des chapitres de la thèse.

---

## 2 Gérer des connaissances pour l'apprentissage musical

L'objectif de ce chapitre est de fournir le cadre de base de la thèse en définissant les concepts clés manipulés dans les domaines de la gestion de connaissances et de l'apprentissage de la musique occidentale.

Dans un premier temps, quelques définitions fondamentales sont posées, afin de distinguer des notions qui semblent proches : donnée, information, connaissance, savoir et savoir-faire. Les différents modes de représentation des connaissances en informatique sont également rappelés. Les bases de connaissances et leurs caractéristiques sont étudiées afin d'évaluer leurs limites pour notre propos. Dans un second temps, les principes, acteurs et processus liés à l'apprentissage musical sont étudiés afin d'explicitier au mieux les savoir-faire à gérer, à leur plus haut niveau de maîtrise. Enfin, dans un troisième temps, nous étudions la gestion de données et connaissances musicales en informatique. Nous questionnons notamment la place de la machine dans le processus d'apprentissage musical au travers des problèmes et méthodes de l'Extraction de Connaissances Musicales.

### 2.1 Définitions

#### 2.1.1 Savoir et savoir-faire

Le savoir est une notion complexe qui peut avoir différentes implications suivant le contexte considéré. Ainsi Le Dictionnaire Larousse le définit comme un « ensemble cohérent de connaissances acquises au contact de la réalité ou par l'étude ». Le savoir s'oppose à l'ignorance, mais se distingue cependant de l'intelligence. Bien que l'anglais ne distingue pas savoir et connaissance (« knowledge »), le français accorde à la connaissance la particularité de se référer à un domaine particulier, extérieur au sujet (e.g., les mathématiques, la littérature, la cuisine), alors que le savoir est moins disciplinaire et reste interne à ce dernier. Ainsi, le savoir d'une personne serait l'ensemble des connaissances que celle-ci aurait assimilées dans divers domaines, soit en étudiant, soit en pratiquant une activité. Se pose alors la question de la gestion et de la transmission du savoir au sein de groupes de personnes. En effet, si le savoir est interne, une étape de transcription et de communication est nécessaire pour pouvoir le partager. C'est sur ce point qu'interviennent les enseignants et les médias dédiés à l'apprentissage (livres, manuels, bases de connaissances, plateformes d'apprentissage en ligne, vidéos didactiques).

Dans ce contexte, le savoir-faire (« know-how » en anglais) constitue un cas particulier de savoir et désigne une « compétence acquise par l'expérience dans les problèmes pratiques, dans l'exercice d'un métier » (source : dictionnaire Larousse). La principale distinction entre savoir et savoir-faire est la dimension pratique imputée à ce dernier. En effet, quand bien même le savoir-faire inclut une dimension intellectuelle (e.g., compréhension de la théorie musicale), il est impossible de le maîtriser sans un entraînement régulier afin d'assimiler ses gestes caractéristiques (e.g., pratique instrumentale), ce qui rend difficile son assimilation à partir de seules codifications. Cependant, dans le cadre de la transmission de savoir-faire artistiques, la distinction ne se limite pas à cette dimension gestuelle. Si le savoir est intimement lié à la vérité (il s'oppose à l'erreur ou l'illusion selon l'Encyclopédie Universalis), cette notion reste plus nuancée dans le cas du savoir-faire artistique. En effet, pour acquérir ce dernier, non seulement la méthode peut varier (les différentes écoles), mais aussi l'aboutissement (différentes interprétations d'une même pièce). Même si un cadre général est

défini (exemple : règles des styles classique), le musicien est amené à faire ressortir sa personnalité dans une interprétation romantique (émotions visibles), ou à rester plus effacé dans une interprétation baroque (émotions invisibles), au risque d'être accusé de jouer « comme un ordinateur ». Dans ce contexte de relative liberté, certains interprètes se jouent des règles et produisent ainsi des interprétations considérées tour à tour comme totalement inappropriées, ou absolument géniales, suivant les goûts et l'expertise du public [29]. C'est pourquoi, l'assimilation d'un savoir-faire se construit souvent en confrontant ses travaux à ceux des autres, qu'ils soient du même niveau (condisciple, compétition) ou d'un niveau supérieur (modèle, maître).

Ainsi, la notion de savoir-faire est abordée dans le Chapitre 4 à l'aide de composants permettant la confrontation de points de vue distincts sur un objet donné : les Signes.

La Figure 3 résume les relations entre donnée, information, connaissance et savoir-faire dans notre contexte. Une information est créée en interprétant (c'est-à-dire en donnant du sens) une ou plusieurs données brutes (exemple : donnée = température actuelle de 35°C à Paris, information = « il fait chaud à Paris »). Une connaissance est ensuite issue du recoupement de plusieurs informations. La réalisation de ce lien entre les informations est souvent non triviale et peut requérir un apprentissage (exemple : information 1 = « il fait chaud », information 2 = « c'est le mois de janvier », connaissance = « c'est l'été austral »). Enfin, le savoir-faire est une forme de connaissance requérant une mise en pratique. Cependant, la distinction entre ces différents éléments reste délicate. En effet, le contexte d'application et le rôle de l'observateur a une grande influence sur la nature de l'objet observé. Dans le cadre de la musique par exemple, étant donnée une œuvre célèbre, pour le non-connaissieur, le nom du compositeur est une connaissance non triviale, tandis que pour l'amateur éclairé ou l'expert, il s'agit d'une métadonnée de l'œuvre, la connaissance sur cette œuvre incluant plutôt une analyse poussée de sa structure, ou des techniques à mettre en œuvre pour la jouer. Dans les deux cas, la connaissance est le résultat d'un processus d'acquisition non trivial : l'apprentissage (définition d'Yves Raymond [45]).

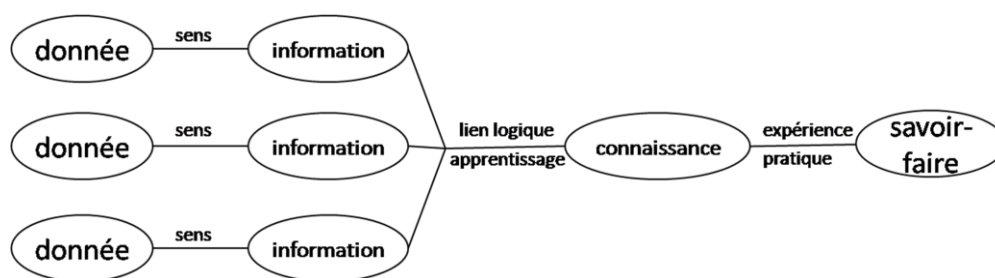


Figure 3: Relations entre donnée, information, connaissance et savoir-faire.

### 2.1.2 Représenter des connaissances

Différents supports ont été créés pour représenter et partager des connaissances : monographies, encyclopédies, dessins, schémas, plans, tables, taxonomies, thésaurus, graphes conceptuels, réseaux sémantiques, ontologies. Le développement de l'Intelligence Artificielle a poussé ces modes de représentation vers toujours plus de formalisation, afin de faciliter leur manipulation par des machines (classification, recherche, déduction, etc.). Parallèlement, le Web a une très forte influence sur la création des formats de donnée récents : la génération quotidienne de millions de nouvelles données de tous types (articles, photographies, vidéos, textes) incite à l'utilisation de formats à la

---

fois simples et expressifs. L'adoption d'un format ou d'une norme n'est plus uniquement une question de nécessité ou de performance de cette dernière. Elle dépend également des usages des internautes et des principaux acteurs du marché (moteurs de recherche, navigateurs, réseaux sociaux, services de blog et partages de contenus). Les concepteurs du Web eux-mêmes peuvent difficilement prévoir ce que sera le Web de demain [7].

Dans le milieu scientifique, il existe toutefois des formats de représentation des connaissances stables et utilisés depuis de nombreuses années par les communautés de chercheurs, notamment pour les sciences du vivant où la description d'individus est essentielle. Nous en étudions quelques-uns dans ce qui suit.

La taxonomie (ou taxinomie) est la science de description et de classification des organismes vivants. Chaque entité de la classification est appelée un taxon. En informatique, le mot taxonomie a été repris pour désigner un ensemble de termes organisés de façon hiérarchique pour un domaine donné (exemple : taxonomie des instruments de musique).

Un thésaurus est un répertoire structuré de termes normalisés (mots-clés) pour l'analyse de contenus et le classement de documents. Un thésaurus privilégie la relation entre les termes par rapport à leur signification. Les relations entre termes ne sont pas nécessairement hiérarchiques comme pour la taxonomie (exemples de relations : synonyme, antonyme, terme à privilégier, précision, etc. Source : article [dia-logos.net](http://www.dia-logos.net)<sup>1</sup>). On peut donc élargir le champ de connaissance en accédant aux sujets connexes d'un terme.

En informatique, l'ontologie est une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation [20]. La construction d'une ontologie fait donc l'objet d'un consensus entre les experts d'un domaine, afin que les concepts et relations utilisés ne prêtent pas à confusion. En définissant également les relations logiques entre les concepts et entre les relations (classe, sous-classe, domaine, transitivité, implication), l'ontologie se positionne comme un format de représentation de connaissances plus abouti et complexe que le thésaurus ou la taxonomie. Ainsi saisies, les connaissances peuvent être manipulées par les machines pour accomplir divers objectifs : requêtes complexes, recoupements, comparaisons, déductions. L'ontologie est de fait le format de représentation le plus souvent adopté pour la constitution de bases de connaissance structurées.

Les formats de représentation de connaissances précédemment décrits sont des logiques de descriptions, c'est-à-dire des langages permettant de construire des descriptions structurées d'individus à l'aide de concepts (i.e., des classes d'individus) et de rôles (i.e., des liens entre ces individus) [39]. Ces langages se fondent sur la relation de subsomption permettant d'instaurer une hiérarchie des concepts du domaine. Ils requièrent cependant de convenir d'une interprétation unique de chacun des termes choisis pour désigner les concepts et rôles manipulés (correspondance entre la syntaxe et la sémantique).

### 2.1.3 Bases de connaissances

Krishna [30] définit une base de connaissances comme un système supportant des structures pour la représentation des connaissances, dès le niveau conceptuel, et intégrant tous les avantages

---

<sup>1</sup> <http://www.dia-logos.net/ressources/2009-11/schemas-de-classification-thesaurus-taxonomie-ontologie>, consulté le 22/02/2013.

traditionnels d'une base de données (réutilisation des connaissances, quantité de tuples très élevée, requêtes complexes, etc.). Il distingue deux structures principales pour les bases de connaissances : celles reposant sur la logique et le raisonnement, comportant des données et des règles (bases déductives), et celles basées sur les objets (bases orientées objet). Cependant, on entend surtout aujourd'hui par base de connaissance un ensemble d'assertions exprimées à l'aide de logiques de descriptions d'un domaine particulier [39]. La construction de la base de connaissances repose alors sur une étape préalable : représenter les connaissances de façon formelle, grâce à des concepts et des relations définis par les experts du domaine. Des règles sont ensuite élaborées pour générer automatiquement de nouvelles connaissances à partir des cas déjà renseignés dans la base. Ces mécanismes d'inférence se fondent principalement sur le raisonnement logique.

Un système à base de connaissances s'articule en général autour de la résolution d'un problème reposant sur une démarche reproductible et formalisable. Ces problèmes peuvent être de l'ordre de l'aide à la décision, de la classification ou de l'identification de cas. Les étapes de gestion des connaissances associées sont généralement la modélisation des connaissances à l'aide des experts du domaine, leur acquisition sous forme de cas renseignés, leur traitement pour la résolution du problème, puis la validation des résultats. Ce processus peut être itéré afin d'améliorer le modèle de départ en fonction des résultats obtenus.

Les Systèmes Experts utilisés dans les années 80 sont caractéristiques de cette méthodologie. Ces derniers permettent d'extraire le savoir-faire d'un expert sous la forme de règles déductives afin de répondre à une question. Ainsi, le système expert le plus connu reste le projet MYCIN [61] conçu pour diagnostiquer des infections bactériennes et proposer des traitements adaptés. Cependant, MYCIN ne fut jamais exploité, du fait de sa complexité (beaucoup de règles), et du manque d'explications quant au résultat obtenu. MYCIN a également souligné la principale difficulté dans la construction d'un tel service d'aide au diagnostic : le recueil des données et des règles auprès des experts.

C'est pourquoi actuellement, les bases de connaissances s'appuient sur des plateformes collaboratives où les utilisateurs peuvent améliorer le modèle de représentation des connaissances à chaque nouvelle contribution. Ainsi, le système IKBS (Iterative Knowledge Base System) propose une construction itérative du modèle de connaissance appelé modèle descriptif, via la confrontation de différentes observations d'experts d'un domaine. Ce système a été appliqué à la gestion des Coraux des Mascareignes [12]. Cette démarche est intéressante dans notre contexte puisqu'elle permet de gérer différentes observations pour un même objet en attendant d'aboutir à un consensus pour éliminer ou relier ces observations. Cependant les processus et modèles constructibles sont adaptés aux objets biologiques et non aux objets culturels. Notre solution de base de Signes s'inspire donc de cette méthodologie mais l'adapte et l'étend à la gestion d'objets culturels, propices à l'interprétation et l'illustration de cas.

En effet, dans le domaine musical, les bases existantes consistent essentiellement en des collections de titres destinés à l'écoute (plateformes de téléchargement, Web radios). Il ne s'agit alors pas à proprement parler de connaissances, mais plutôt de métadonnées (titre, artiste, album, piste). Dans ce cadre, les structures de données développées ont été adaptées à la commercialisation de titres musicaux. Toutefois, certaines structures telles que la Music Ontology, peuvent servir de base à la définition de concepts musicaux de haut niveau. Dans ce qui suit, nous étudions d'abord les

fondements de la transmission de savoir-faire musicaux avant de nous intéresser aux principaux formats de représentation et bases de connaissances qui leur sont dédiés en informatique.

## 2.2 Transmettre des savoir-faire musicaux

Nous nous intéressons à la gestion des savoir-faire musicaux pour plusieurs raisons. Outre la motivation à traiter d'un tel sujet lorsque l'on est soi-même musicien, la musique constitue un des domaines les plus riches et complexes à traiter, par son histoire et les schémas physiques, cognitifs et émotionnels qu'elle induit. L'objectif ultime étant la virtuosité de l'apprenant, il est impératif de bien comprendre les processus et acteurs en jeu. Nous nous concentrons donc sur l'apprentissage d'un instrument populaire, au répertoire et aux techniques extrêmement riches et documentés : le piano. Comme précisé précédemment, du fait de sa nature particulièrement subjective, il n'y a pas de règle absolue dans l'apprentissage d'un instrument, mais plutôt un ensemble de méthodes et de pratiques qui ont fait leurs preuves au cours des siècles, et qui se transmettent toujours au sein des écoles de musique. Dans le cadre de cette thèse, nous nous plaçons dans le contexte de la musique classique occidentale. En effet, nous l'avons étudiée et pratiquée de nombreuses années et disposons de l'appui d'experts de ce domaine. Toutefois, les contributions proposées dans les parties 4 à 6 pourraient être transposées à d'autres courants musicaux et instruments, moyennant des adaptations sur les formats et algorithmes utilisés.

### 2.2.1 La musique occidentale

Contrairement à beaucoup d'idées reçues, la musique n'est pas réellement un langage universel. Suivant les époques et les lieux, les schémas musicaux varient, et donc également la sensibilité des personnes à la musique. Cette dernière se développe dès la gestation, puisque le nourrisson perçoit les sons extérieurs : il baigne dans un environnement sonore aux timbres familiers, mais aussi aux harmonies et structures musicales propres à son milieu. Ainsi, une personne n'ayant jamais entendu que de la musique occidentale, aura beaucoup de mal à saisir la musique traditionnelle orientale, qui utilise des gammes différentes, et vice-versa. Cependant, ce phénomène s'est fortement estompé avec la dissémination rapide de la culture occidentale au siècle dernier, résultant en une certaine "uniformisation" des goûts musicaux en faveur de la musique occidentale. Aussi, ce n'est que récemment que certaines régions réagissent à ce phénomène en instaurant des politiques de sauvegarde de leur patrimoine musical (exemples : le maloya à La Réunion, les musiques traditionnelles balinaises, indiennes, etc.). Des projets tels que CompMusic [28] [49] tentent également de rééquilibrer la recherche en informatique musicale et musicologie vers la musique non-occidentale. L'analogie de la musique et du langage semble donc actuellement pertinente, puisque la musique occidentale constitue alors la musique "internationalement" reconnue, de la même façon que l'anglais est de facto la langue "internationale", chaque peuple y instillant tout de même un peu de sa culture (« world music »), sans pour autant s'éloigner des codes principaux.

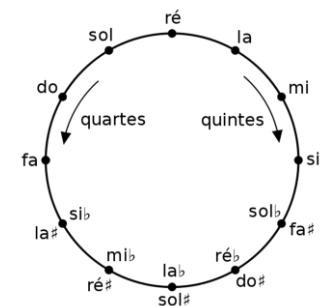


Figure 4 : Cycle des quintes (source: Wikimedia Commons).

Cette thèse traitant essentiellement de la gestion de savoir-faire dans la musique occidentale classique, nous rappelons succinctement quelques-uns de ses principes fondamentaux.

La musique occidentale repose communément sur le système tonal pour sa dimension harmonique (hauteur des sons), et sur la pulsation pour sa dimension rythmique (déroutement temporel). Le



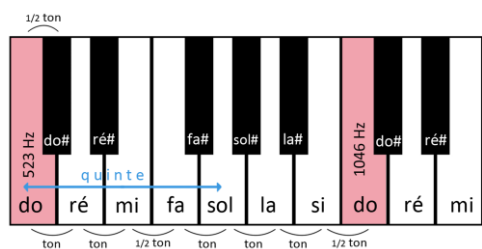
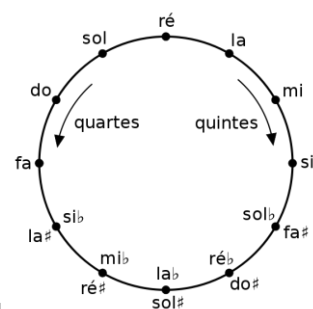


Figure 5 : Représentation des douze degrés sur un clavier de piano.

Le système tonal a été défini dès le 17<sup>ème</sup> siècle via le cycle



des quintes (Figure 4 ). Ce

dernier définit les douze degrés de base (les notes de la gamme), toujours utilisés aujourd'hui, en se déplaçant de quintes en quintes (intervalle de 5 degrés, soit 7 demi-tons), à partir de la note ré. Cette structure est intimement liée à la physique et aux mathématiques. En effet, les musiciens ont constaté une harmonie naturelle entre certains intervalles de sons, en fonction de leurs fréquences caractéristiques. Cette fréquence, dite fondamentale, est issue de la vibration de l'air provoquée par l'instrument (par exemple la vibration d'une corde) et caractérise la hauteur du son produit. Ainsi, une octave (intervalle de 12 demi-tons) est composée d'une note a de fréquence x, et d'une note b de fréquence 2x, semblant sonner à l'unisson bien qu'à des hauteurs différentes. L'espace entre les deux extrémités de l'octave a été découpé en 12 degrés, espacé soit d'un ton, soit d'un demi-ton (voir Figure 5). A partir de ce constat a été développée l'harmonie moderne, reposant sur une succession de "tensions" et de "détentes" autour de la note principale du morceau considéré : la tonique. Celle-ci donne son nom à la tonalité considérée : do majeur, la mineur, etc. Composer une pièce dans le système tonal consiste alors à travailler dans un système arithmétique modulo 12, en évitant d'apparier des fréquences « dissonantes ». Ce n'est qu'à partir de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle que les compositeurs classiques occidentaux ont commencé à s'affranchir du système tonal, incluant volontairement des dissonances, au prix de critiques exacerbées. Il reste toutefois aujourd'hui le plus utilisé dans la musique populaire et est enseigné dans quasiment tous les cursus instrumentaux.

Malgré ses limites inhérentes, le système tonal présente l'avantage d'être simple et naturel tout en permettant la construction de pièces complexes, comme en atteste la richesse des productions fondées sur ce dernier. Il permet également d'écrire les pièces composées sur du papier grâce à une convention de notation de la musique tonale : la partition. Le solfège s'attache notamment à l'enseignement de l'écriture et de la lecture de partitions. Bien que ne comportant généralement que la hauteur et la durée des notes, les partitions ont permis la sauvegarde et la transmission de nombreux chefs d'œuvre de la musique.

Une partition est une représentation logique et structurée d'une pièce de musique. S'il existe diverses représentations symboliques de la musique (tablatures, grilles d'accord, neumes), la partition est la plus utilisée dans l'apprentissage, de par la richesse d'expression qu'elle offre. Une partition est généralement constituée de systèmes, chacun comportant une ou plusieurs portées en fonction du nombre d'instruments ou de voix de l'œuvre considérée. La lecture s'effectue de gauche

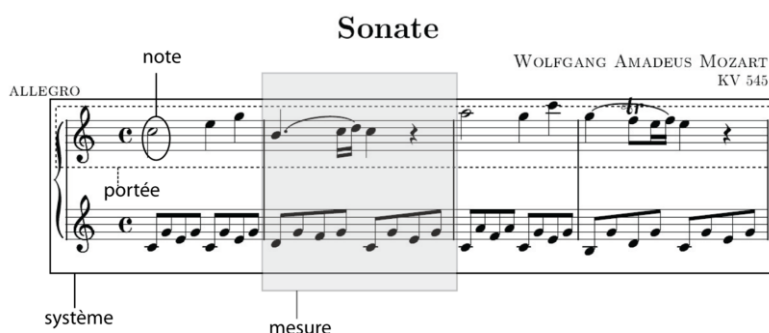


Figure 6. Structure d'une partition musicale pour piano

à droite (lecture temporelle), comme les écritures latines, et de bas en haut (lecture polyphonique). L'unité temporelle de base marquant le « temps fort » (ou pulsation) est la mesure. Elle permet de diviser le morceau en unités de même durée. La mesure peut bien sûr être modifiée plusieurs fois au sein d'une même pièce. Dans chaque mesure, on trouve la plus petite unité musicale : la note. Une note porte principalement deux informations : la hauteur du son et sa durée. Elle peut être agrémentée d'autres informations sur son accentuation, attaque, timbre, etc. La première mesure comporte généralement une armature signalant les informations valables sur toute la durée du morceau (clé, tonalité, type de mesure). Sur une partition, on trouve également des symboles de silence, de ponctuation, d'altération, de tempo, des indications de volume et de timbre. La Figure 6 résume ces structures.

Dans ce qui suit, nous abordons l'art de l'interprétation musicale, en détaillant les différentes variables qu'un musicien doit gérer pour jouer une pièce correctement. En effet, les interprétations musicales constituent l'essentiel des Signes Musicaux que nous souhaitons collecter et expliciter dans nos travaux.

### 2.2.2 L'interprétation musicale

Pierre Haury, musicologue spécialiste du clavier, définit l'interprétation musicale (quel que soit l'instrument considéré) comme la gestion conjointe de quatre variables [24] :

- Les variations dynamiques (jouer plus ou moins fort)
- L'accentuation (donner plus d'importance à une voix plutôt qu'à une autre)
- L'articulation (la « ponctuation » des notes, tantôt liées, piquées, etc.)
- Les modifications agogiques (changement des dates de début et de fin des notes, par exemple, le rubato)

Cette définition exclue les erreurs de notes, pourtant si redoutées des interprètes amateurs. En effet le fait de jouer les bonnes notes au bon moment constitue l'**exécution** (au sens machinal du terme) de la partition, et non son **interprétation**. La plupart des outils de e-Learning et jeux musicaux existants se concentrent sur cette composante d'exécution de la pièce, car elle constitue le cœur de la difficulté pour le débutant, qui souhaite avant tout reconnaître dans ce qu'il joue la mélodie qu'il connaît et apprécie. Or, cette étape ne constitue qu'une partie de l'interprétation de la pièce. Le déchiffrage a pour but d'assimiler rapidement les notes pour pouvoir se concentrer ensuite sur des considérations expressive et esthétiques de plus haut niveau. Le niveau technique instrumental conditionne alors directement la rapidité avec laquelle le musicien va assimiler les notes de la pièce. Il existe d'ailleurs des initiatives pour s'extraire de cette contrainte de justesse des notes de la partition et se concentrer sur les variables définies précédemment, comme par exemple le métapiano [25]. Mais la stricte séparation de la composante d'exécution et d'interprétation de la pièce est délicate, car c'est leur rencontre qui crée l'œuvre musicale. Aussi, la plupart des professeurs de musique recommandent de travailler ces deux composantes conjointement le plus tôt possible, afin d'éviter que l'ajout d'expression ne soit trop artificiel et surjoué. Il existe d'ailleurs nombre de formes musicales où la composante d'interprétation domine clairement celle d'exécution, qui ne marque que quelques contraintes harmoniques ou rythmiques. On note par exemple l'**improvisation** en jazz, offrant une très grande liberté d'expression sur quelques contraintes harmoniques, voire stylistiques, ou tout simplement l'adaptation d'oreille d'un air connu sans partition, pratique très courante dans la musique folklorique ou de variété. Pour autant, la réalisation

d'une bonne improvisation demande énormément de travail au musicien, tant technique qu'expressif. Les techniques de base instrumentales doivent être déjà acquises (position de la main, attribution de doigtés, réalisation d'une gamme, reconnaissance harmonique, etc.). Cependant, aussi bien un amateur qu'un expert pourront improviser sur la même grille, en intégrant chacun les techniques qui leurs sont propres, à leur niveau.

L'activité d'improvisation souligne également la place de la mémoire dans l'interprétation musicale. Suivant le support dont il dispose pour l'interprétation, le musicien fait appel à différents types de mémoire. On distingue la mémoire acoustique et harmonique de la pièce (comment elle « sonne »), de la mémoire digitale (comment se déplacent les doigts, suivant quelles positions), et de l'expérience (les morceaux joués précédemment). Pour une personne d'un très bon niveau de déchiffrage, l'interprétation d'une partition ne requiert presque pas de faire appel à sa mémoire, puisqu'il suffit de suivre ce qui est écrit. Cependant, l'identification de certaines structures musicales peut déclencher des « réflexes » expressifs imputés à l'expérience de l'interprète sur de précédents morceaux (par exemple ralentir en fin de phrase sur une pièce romantique).

En improvisation ou en jouant d'oreille, il est en revanche indispensable de connaître le morceau au préalable pour établir certains repères (ligne mélodique, changements d'accords, modulations). Dans tous les cas, il est conseillé d'utiliser tous les types de mémoire pour assimiler et comprendre un morceau harmoniquement et gestuellement.

Suivant l'instrument considéré, les musiciens peuvent introduire d'autres variables de jeu, qui sont directement ou indirectement liées à celles vues précédemment. Par exemple :

- La gestion du souffle pour les instruments à vent et la voix. Cette variable peut être liée à l'articulation des notes. Suivant la façon dont le flûtiste souffle dans son instrument (souffle sec et fort, ou continu et long), il peut produire différents types de sons et articuler les notes différemment. Il est à noter qu'on parle de respirations même pour des instruments autres que les vents. Il s'agit alors de respirations virtuelles (mais se traduisant gestuellement) permettant de marquer une courte pause entre deux phrases, de la même façon que le ferait un chanteur. Nombre de musiciens tendent à oublier que la respiration et le silence font partie de la musique.
- Les changements de sonorité et de timbres. Également liée à l'articulation, on note par exemple la réalisation d'harmoniques à la guitare, le jeu avec la pédale *Una Corda* sur un piano, l'ajout d'une sourdine « wa-wa » sur une trompette, etc. La musique contemporaine est particulièrement novatrice en matière de recherche de nouvelles sonorités sur des instruments existants.
- Les effets et ornements : appoggiatures, trilles, glissandi. Ils sont absolument essentiels dans certains registres musicaux, comme la musique irlandaise, où ils conditionnent l'accentuation et l'articulation de lignes mélodiques simples. Bien que scrupuleusement notés sur la partition en musique classique, les ornements sont souvent laissés à la volonté du musicien dans d'autres styles. Chaque instrument a sa gamme d'ornements et d'effets spécifiques. La guitare a ses bends, tappings et slaps, la flûte a ses cuts, rolls et slides, exploitant notamment sa continuité harmonique (absence de frets ou « séparation » des notes).

Le geste musical est ainsi directement lié aux variables d'interprétation [68]. Dans un système de gestion de savoir-faire artistiques, il est essentiel de pouvoir traiter du geste, de la technique et de l'expression conjointement, en respectant les points de vue des différents acteurs (interprètes, compositeurs, musicologues). Cette richesse de paramètres, d'expériences et de ressentis différents rend chaque interprétation musicale unique.

Mais cette diversité pose une question complexe : qu'est-ce qu'une bonne interprétation ? Est-ce la plus respectueuse de la volonté du compositeur ? La plus créative ? La plus juste techniquement ? La mieux instrumentée ? Si chaque musicien a toute liberté sur ses interprétations personnelles, il n'en existe pas moins des codes, propres à chaque genre ou école, qui sont transmis de génération en génération d'interprètes. Ces codes d'interprétation, parfois apparentés à de véritables automatismes chez le joueur expérimenté, permettent de rendre l'esthétique particulière d'un genre musical donné. A titre d'exemple, le musicien baroque ne se permettra pas de rubato dans l'exécution de ses pièces, et le joueur de tin whistle n'appliquera ses rolls qu'aux triolets de notes répétées. Ces règles esthétiques sont souvent implicites : elles ne sont pas nécessairement signalées sur les partitions et sont appréhendées par les musiciens via l'écoute et l'imitation d'interprètes de référence pour le genre musical considéré. Ceci se vérifie particulièrement dans la musique folklorique où la transmission orale est privilégiée. Il est alors intéressant de comparer diverses interprétations d'un même morceau, d'en extraire les caractéristiques fondamentales, et de les utiliser pour construire sa propre interprétation en testant différentes approches.

Dans la partie suivante, nous énumérons les principaux acteurs de la pratique musicale et détaillons leurs rôles.

### 2.2.3 Les acteurs de la pratique musicale

La pratique musicale fait intervenir de nombreux acteurs, ayant différents rapports aux œuvres.

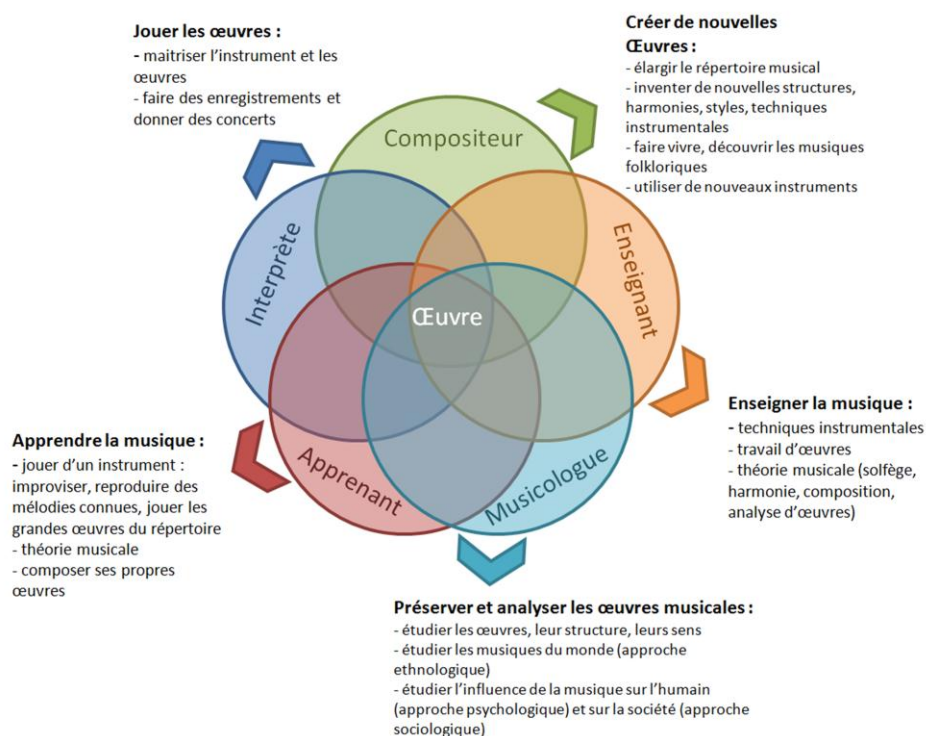


Figure 7 : les acteurs de la pratique musicale et leurs rôles

Toutefois, une même personne peut endosser plusieurs rôles dans sa carrière. Ainsi, la plupart des grands compositeurs classiques jouaient ou dirigeaient leurs propres œuvres en concerts, et enseignaient leur instrument de prédilection. La Figure 7 résume l'essentiel de ces rôles dans le cadre de l'apprentissage musical. En se focalisant sur la pratique musicale, on exclut ici le contexte de production et consommation de l'industrie musicale, qui nécessiterait alors de faire apparaître le producteur, l'ingénieur du son, l'auditeur, etc.

Le **compositeur** crée de nouvelles œuvres. Il peut s'appuyer sur les œuvres des grands maîtres avant lui ou trouver son inspiration dans son milieu (histoire, culture, événements marquants). Auparavant, beaucoup de compositeurs vivaient de leurs compositions grâce à des mécènes et des commanditaires. Avant l'invention des systèmes de notation usuels de la musique (neumes, partitions, tablatures), les compositeurs transmettaient leurs pièces en les jouant et en les enseignant à leurs apprentis. L'invention de la partition musicale a permis de fixer ces œuvres sur le papier et faciliter leur transmission. Aujourd'hui encore, des autographes de compositeurs célèbres sont retrouvés, édités et rejoués. Les progrès technologiques ont grandement facilité et inspiré le travail des compositeurs. De nos jours, la plupart d'entre eux saisissent leurs créations dans des logiciels spécialisés (séquenceurs, éditeurs de partitions, assistants à la composition). Les plus connus de ces outils sont étudiés dans la partie 3.1.6. Ces derniers ont également permis de « démocratiser » l'activité de création musicale chez les jeunes : 15% des 20-24 ans déclarent avoir déjà créé de la musique sur ordinateur<sup>2</sup>.

**L'interprète** est en relation étroite avec le compositeur. Le premier donne vie à la musique du dernier. Le travail de l'interprète est à la fois complexe et passionnant : il doit comprendre et intégrer l'intention du compositeur dans son interprétation, tout en y faisant passer ses propres émotions pour les transmettre à l'auditeur. Pour y parvenir, il est impératif qu'il maîtrise parfaitement son instrument. En effet, une quelconque gêne technique briderait son expressivité et dégraderait la fluidité de son interprétation. Les interprètes célèbres (exemples en piano : Merlet, Horowitz, Arrau) inspirent les jeunes apprenants non seulement par leur virtuosité technique, mais aussi leur capacité à transmettre des émotions par le jeu. Si jusqu'à présent la plupart diffusaient leurs interprétations via des enregistrements sur album, de plus en plus intègrent les nouvelles technologies et en particulier les réseaux sociaux dans leur démarche. De plus, les progrès dans le domaine du multimédia permettent de capturer les interprétations avec une qualité de rendu et d'écoute toujours plus grande.

Bien qu'étant toujours en apprentissage, **l'apprenant** est un des principaux maillons de la préservation et de la transmission du savoir-faire musical. Constituant la grande majorité de l'ensemble des musiciens, il contribue donc naturellement à la dissémination et la transmission de la culture musicale, quel que soit son niveau. Son parcours et ses objectifs sont discutés dans la partie suivante. L'apprenti musicien est en collaboration étroite avec son enseignant. Sa motivation et le succès de sa formation va grandement dépendre de ce dernier. De plus en plus de méthodes alternatives et/ou complémentaires au cours traditionnel lui sont consacrés sous la forme de DVD, logiciels ou sites web spécialisés (voir partie 3).

---

<sup>2</sup> Source : Enquête Pratiques Culturelles des Français, 2008 – DEPS, Ministère de la Culture et de la Communication

Avant de transmettre son savoir-faire, **l'enseignant** doit lui-même avoir acquis un excellent niveau d'instrument. Ainsi, nombre de professeurs de piano sont eux-mêmes interprètes ou compositeurs. Ils peuvent également endosser le rôle d'apprenants dans le cadre de Master classes. Les enseignants peuvent se spécialiser dans différentes matières : déchiffrage, composition, harmonie, solfège. Dans ce qui suit, nous nous concentrerons sur les professeurs d'instrument et leurs méthodes d'enseignement. En France, la plupart d'entre eux suivent un cursus classique dans un conservatoire régional avant d'intégrer un des deux Conservatoires Nationaux Supérieur de Musique (CNSM) de Paris ou de Lyon. Avec l'apprenant, le professeur de musique constitue l'une des cibles principales de notre travail.

Enfin, le **musicologue** est en quelque sorte un « chercheur en musique ». Comme l'énoncent Anja Volk et Frans Wiering dans leur tutoriel sur la musicologie (conférence ISMIR 2011), « la musique en tant qu'art présuppose une réflexion, et donc une science ». Les activités du musicologue vont ainsi du catalogage et de l'analyse d'œuvres, à l'étude de l'histoire de la musique ou de son influence sur la société. Les musicologues utilisent aujourd'hui des logiciels spécialisés dans l'analyse d'œuvres, tel que iAnalyse ou OpenMusic (voir partie 3.1.6).

Bien que la musique soit aujourd'hui plus facilement fixée et distribuée (partitions, albums, mp3), il serait impossible de la faire vivre sans la contribution des personnes précédemment citées : une musique qui n'est plus jouée est oubliée. A titre d'exemple, si à ce jour la musique Grégorienne nous est connue, c'est parce que depuis sa création au 8<sup>ème</sup> siècle, des groupes se succèdent pour en interpréter le répertoire.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons plus particulièrement aux activités de l'apprenant : étudier les techniques propres à son instrument pour pouvoir reproduire des morceaux entendus, éduquer son oreille, sa musicalité, assimiler la base de la théorie musicale (déchiffrer une partition) et développer sa culture musicale. Pour ce faire, l'apprenant a différentes méthodes à sa disposition. Avant de voir celles incluant les TIC, nous voyons dans ce qui suit le parcours « traditionnel » d'apprentissage d'un instrument : le cours de musique en présentiel.

### 2.2.4 L'apprentissage instrumental : de la curiosité à la virtuosité

#### 2.2.4.1 *Le cursus musical*

La motivation à débiter l'apprentissage d'un instrument varie d'un individu à l'autre. L'âge est un critère significatif. Beaucoup commencent dès la petite enfance, soit en manifestant une certaine curiosité vis-à-vis de la musique, qui peut être alimentée et encouragée par les parents et l'entourage proche, soit par obligation. Dans ces cas, il s'ensuit souvent une formation académique. D'autres découvrent la musique beaucoup plus tardivement, à l'âge adulte, dans une démarche plus personnelle et libre. Ces adultes ont souvent déjà une certaine expérience de la musique et s'orientent alors vers une formation plus personnalisée (professeur individuel), ou une autoformation. Dans les deux profils, le plaisir de jouer de la musique est essentiel et indissociable de l'efficacité des méthodes. Notre base de savoir-faire doit donc être en mesure de répondre aux besoins de ces deux types d'apprenants. Nous distinguons deux formes principales d'apprentissage d'un instrument :

- Un apprentissage « libre » : souvent utilisé pour débiter l'instrument. L'apprenant écoute une musique qui lui plaît et essaie de la reproduire étape par étape en se fondant sur ce qu'il

entend (une main puis l'autre, ou juste l'accompagnement ou la mélodie). Cette méthode est souvent utilisée en auto-formation. L'apprenant, guidé par sa motivation, choisit lui-même les pièces qu'il étudie. C'est une méthode très adaptée pour jouer et accompagner les morceaux de variété, elle rencontre donc un franc succès, même si, sauf exception, elle ne permet pas de jouer des morceaux d'un niveau avancé. Elle peut cependant aboutir à l'adoption de mauvaises habitudes (positions peu ergonomiques, sonorités « creuses ») si elle n'est jamais contrôlée.

- Un apprentissage « académique » : il passe par l'apprentissage du solfège en parallèle de la technique instrumentale. Il permet entre autres de jouer les morceaux du répertoire classique et peut amener (suivant la motivation de l'élève) à un niveau élevé, voir professionnel. Cependant il exige plus de contraintes : le professeur choisit en général les morceaux adaptés à la progression de l'élève, celui-ci devant régulièrement se produire devant un public (auditions, examens).

Il serait bien sûr malvenu d'affirmer qu'une méthode surpasse l'autre puisque leur efficacité dépend des besoins de l'apprenant. De plus, l'une et l'autre peuvent très bien fonctionner ensemble. En effet, de nombreux amateurs s'engagent sur la voie académique après une initiation personnelle, ou donnée par exemple par un ami, qui a accru leur motivation pour l'apprentissage de l'instrument. Un accompagnement personnalisé de qualité leur permettra alors de dépasser les limites techniques rencontrées dans l'apprentissage libre, et qui nécessitent l'analyse et les retours d'un enseignant qualifié. Pour illustrer ce propos, la Figure 8 donne un exemple de parcours musical commun.

Dans ce parcours, la formation académique présente une opportunité de franchir différents caps techniques afin de jouer des morceaux de niveau avancé et d'élargir son horizon musical (découverte de compositeurs, performances en groupes, composition, etc.). Cette formation est jalonnée d'examens permettant de valider les progrès des élèves. Les Conservatoires Régionaux délivrent un diplôme (Diplôme d'Etudes Musicales, DEM) à l'issue du 3<sup>ème</sup> cycle spécialisé, attestant du solide niveau instrumental de ces amateurs de qualité. Certains poursuivent alors leur formation dans un CNSM afin de devenir professionnel (interprète ou enseignant).

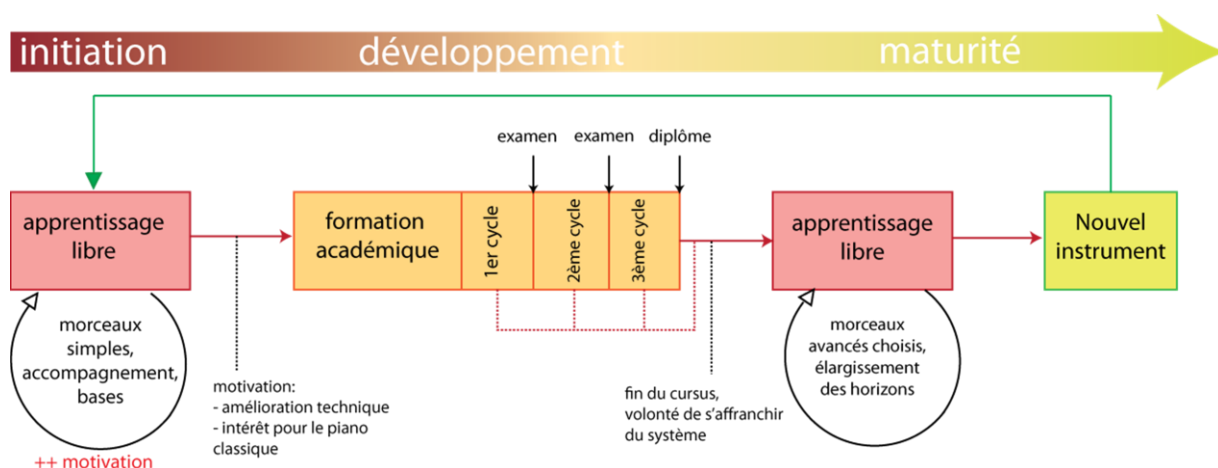


Figure 8 : processus d'apprentissage d'un instrument de musique

Bien que le conservatoire ne soit pas l'unique moyen d'apprendre un instrument et reste souvent accusé d'élitisme, il est le seul cursus diplômant reconnu par l'État et dispose d'une reconnaissance internationale. Il est également synonyme d'excellence par les exigences de son programme et le

professionnalisme de ses enseignants. Notre travail a donc été réalisé sur la base de cette formation, et en collaboration avec des enseignants du conservatoire, dans l'optique de proposer une base de Signes capables de gérer des techniques instrumentales avancées, utilisables aussi bien dans un parcours académique que dans une démarche d'apprentissage plus libre.

#### 2.2.4.2 Le cours de musique

Dans une formation de type « conservatoire », l'élève dispose en général d'un cours par semaine (celui-ci pouvant aller de trente minutes à deux heures par semaine suivant le niveau). Il progresse en apprenant des pièces adaptées à son niveau. Plusieurs pièces peuvent être travaillées en parallèle (en général de une à trois, chacune d'un style différent), notamment dans le cadre d'un programme pour un examen par exemple. Afin de bien comprendre les savoir-faire à gérer dans l'apprentissage musical, nous décrivons le processus commun d'apprentissage d'une pièce (Figure 9).

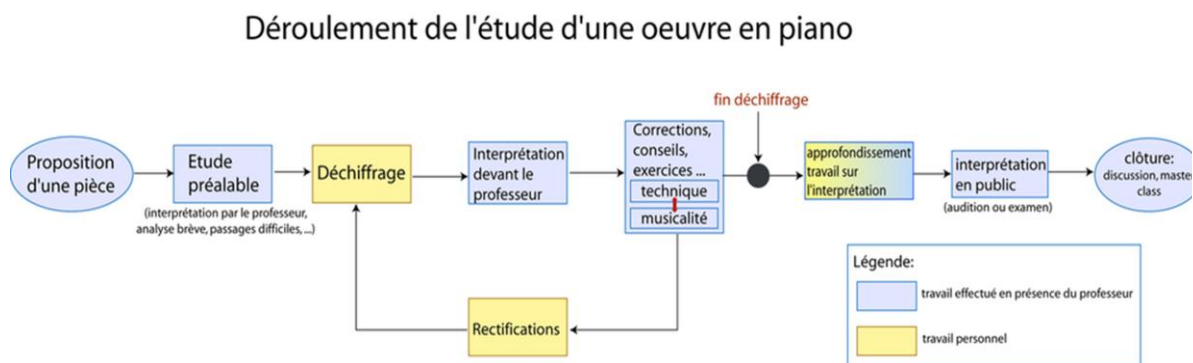


Figure 9: Déroulement de l'étude d'une pièce en piano

Tout d'abord, le professeur propose à l'élève une pièce qui s'inscrit dans la logique de son parcours et pourra le faire progresser sur un ou plusieurs plans (exemple : technique des doigts, vélocité, accords, timbre). Puis il lui joue la pièce en lui exposant les passages difficiles afin de bien retenir l'attention de l'apprenant sur ce qui risque de lui poser problème et comment le surmonter. Si ce dernier n'a jamais abordé une pièce de ce type ou de ce compositeur, le professeur peut aussi lui parler du contexte culturel de celle-ci (qui était le compositeur ? dans quel esprit a-t-il composé cette pièce ?). Suivant la structure de la pièce, le professeur peut aussi proposer une stratégie de travail, voire un calendrier (exemple : « 3 jours sur la première page, 2 sur la phrase suivante, ... »). Afin de bien fixer ces idées, le professeur peut annoter la partition avec des symboles identifiant les doigtés à utiliser ou les passages difficiles de la pièce. S'en suit alors une période de déchiffrage où l'élève va progressivement assimiler les notes de la pièce en se basant sur ce que lui aura dit son professeur durant le dernier cours. A un niveau plus élevé, il sera demandé à l'apprenant d'assimiler les notes conjointement à l'esprit musical de la pièce, la technique restant secondaire par rapport à la musicalité. Chaque semaine, le professeur vérifie le travail de l'élève et lui indique comment surmonter ses difficultés ou les points à améliorer sur les plans technique et musical. Cette phase itérative se termine lorsque l'élève a intégré la totalité du déroulement de la pièce. Il lui reste alors à améliorer son interprétation, voire à apprendre la pièce par cœur, afin de se détacher de la partition et de jouer la pièce en public. L'apprentissage de la pièce se clôt alors par une discussion avec le professeur et les membres du jury afin de recueillir un avis global sur cette interprétation et les points sur lesquels l'élève devra progresser.



Par rapport à cette méthodologie d'apprentissage d'un instrument, nous constatons plusieurs points pertinents pour la gestion des savoir-faire musicaux par les TIC. Tout d'abord, le cours ayant lieu à intervalles réguliers, l'élève est laissé à lui-même durant ce laps de temps, qui se révèle capital puisque c'est à ce moment que le plus de travail est effectué (une séance quotidienne de travail personnel peut aller de 30 minutes à 1h30 suivant le niveau de la pièce). Le travail personnel représente donc au total environ 7 heures par semaine contre 1 heure de cours, beaucoup de professeurs se plaignant d'ailleurs de ne pas avoir le temps de tout aborder durant le cours, surtout en période d'examen. Pendant ces 7 heures, l'élève n'a évidemment pas son professeur à disposition et doit appuyer son travail sur ses souvenirs du dernier cours. Il dispose toutefois d'un autre support d'aide : les annotations apposées par lui ou son professeur durant les séances précédentes. De plus, du point de vue du professeur, les introductions faites sur chaque pièce gagneraient à être capitalisées, puisqu'elles sont en général les mêmes pour chaque élève. Les annotations du premier cours sont ainsi souvent reportées manuellement sur les partitions des étudiants jouant la même pièce (exemple : pour le morceau imposé d'un examen).

L'annotation de partitions est une pratique courante dans l'apprentissage de la musique classique. Il s'agit tout simplement d'indiquer sur la partition, généralement en une phrase succincte, ou à l'aide de symboles (chiffres, symboles musicaux), une information à caractère technique ou musicale à réaliser à un passage précis de la pièce. Cette pratique, étudiée en détail dans la partie 3.2.1, nous sert de point de départ dans la construction et le partage de Signes Musicaux. En effet, elle permet de capturer des connaissances particulièrement importantes pour l'interprétation des pièces, sous une forme facilement partageable.

Cette étude du parcours instrumental nous permet de dégager plusieurs types de cibles pour une base de Signes musicaux :

- les débutants, désireux d'obtenir des conseils personnalisés sur une pièce, et d'avoir des retours sur leurs interprétations,
- les élèves des écoles de musique, pour échanger avec leur professeur et leur classe sur une plate-forme commune, pendant ou en dehors des cours,
- les amateurs avertis, ayant acquis un bon niveau d'instrument, et souhaitant toujours bénéficier de conseils avancés sur leurs interprétations, ou tout simplement partager leur vision d'une pièce,
- les professeurs, pour partager leurs savoir-faire à une plus grande échelle (la classe, l'ensemble des musiciens, les autres professeurs, les interprètes et compositeurs). On note également l'intérêt de préserver le savoir-faire des grands maîtres sous une forme exploitable par tous (Master classes).

Une base de Signes gérant des savoir-faire doit être en mesure de répondre aux besoins de ces usagers en leur permettant d'interagir, de créer des contenus et les parcourir, pour faire vivre ce savoir-faire, dans l'optique qu'ils en retirent chacun un bénéfice mutuel. Le niveau d'exigence doit impérativement être placé suffisamment haut, pour permettre aux spécialistes de s'exprimer pleinement, sans pour autant fermer l'accès aux débutants, même si ces derniers disposent déjà de

nombreux outils d'initiation. Enfin, les contenus saisis par ces utilisateurs doivent être facilement manipulables et réutilisables dans différents contextes (exemples : pièces ou passages similaires).

Avant d'étudier les applications informatiques dédiées à l'apprentissage musical dans le chapitre suivant, nous nous intéressons aux fondements de la gestion de données et connaissances musicales en informatique. En effet, de nombreux formats, structures et algorithmes ont été mis en place dans le domaine musical et leur usage dans des applications de e-Learning instrumental a des répercussions immédiates sur l'expérience d'apprentissage de l'utilisateur.

### 2.3 Gérer des données et connaissances musicales en informatique

Dans cette partie, nous rappelons d'abord succinctement les fondements de l'acquisition et du stockage du son en informatique. Puis nous nous intéressons à la représentation de concepts musicaux de plus haut niveau tels que l'œuvre, son interprétation et sa partition. Enfin, les possibilités de l'Extraction automatique de Connaissances Musicales sont décrites. Chacun de ces thèmes est abordé plus spécifiquement sous l'angle de l'apprentissage musical.

#### 2.3.1 Acquisition et traitements de données musicales

Il existe deux principaux moyens d'acquérir et stocker du son en informatique. Dans le premier cas, il est capté au moyen d'un microphone, puis numérisé par la carte son de l'ordinateur. Il en résulte alors un fichier audio. Dans le deuxième cas, il est généré de façon synthétique, via un instrument MIDI ou par une application de synthèse sonore. On obtient alors un fichier MIDI, qui peut être converti au format audio si nécessaire. Toutefois, les sons ainsi générés diffèrent des timbres de véritables instruments de musique. Cela ne constitue pas nécessairement un inconvénient, car de tels timbres peuvent être recherchés par les compositeurs. Ainsi, la plupart des titres musicaux actuels mélangent instruments de musique, voix, et sons synthétiques.

Le domaine de l'extraction de connaissances musicales s'est principalement bâti autour de l'exploitation des informations présentes dans les fichiers audio (formats non compressés .WAV ou compressés .MP3). En effet la plupart des titres musicaux sont disponibles dans ces formats uniquement, du fait de la présence de voix ou d'instruments enregistrés en studio. Pour comprendre quels types de connaissances peuvent être extraits d'un fichier audio, nous résumons d'abord succinctement comment est stocké un extrait sonore numérisé. Le son est une onde produite par la vibration mécanique du milieu dans lequel il évolue (dans notre cas, l'air). Comme toute onde, il

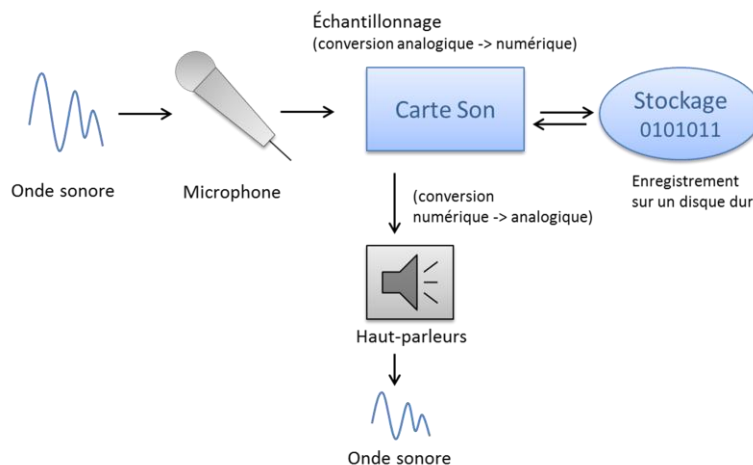


Figure 10 : Acquisition d'un son en informatique

possède une fréquence, caractéristique de sa hauteur (plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu) et mesurée en hertz (Hz), et une amplitude, caractéristique de son volume et mesurée en décibels (dB). Sa numérisation nécessite plusieurs étapes (Figure 10). L'onde sonore produite par l'instrument ou la voix fait vibrer la membrane du microphone. Ce dernier convertit la vibration en courant électrique. Mais le signal ainsi reçu est continu, il doit donc être discrétisé pour pouvoir être traité par l'ordinateur et enregistré en binaire. La carte son effectue cette opération de conversion analogique/numérique grâce à un échantillonnage : des mesures discrètes de l'intensité du signal sont réalisées au cours du temps (voir Figure 11). Le laps de temps séparant chaque mesure caractérise la fréquence d'échantillonnage  $F_s$ . L'échelle discrète des intensités caractérise la quantification (ou résolution)  $q$  du signal numérique.

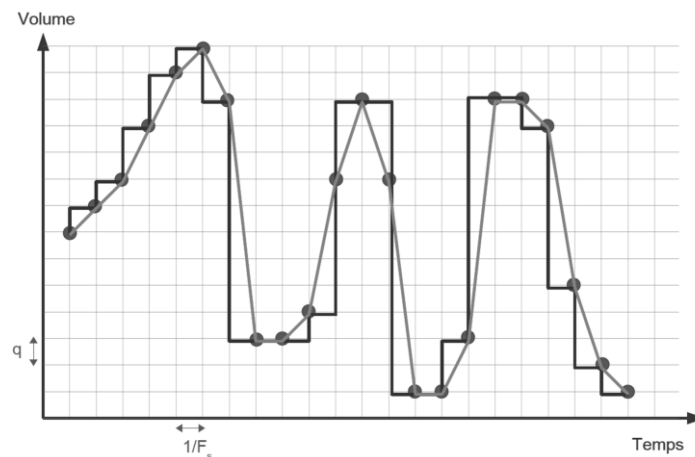


Figure 11 : Échantillonnage d'une onde sonore (extrait du cours de multimédia du Master STIC de O. Sébastien)

Le théorème de Nyquist-Shannon permet d'optimiser la valeur de  $F_s$  pour éviter les pertes d'information lors de l'échantillonnage du signal. Pour ce faire,  $F_s$  doit être supérieur ou égal au double de la fréquence maximale du signal à échantillonner :  $F_s \geq 2 * B$ , avec  $B$  la fréquence maximale du signal. L'oreille humaine pouvant entendre jusqu'à 22 kHz, la norme utilisée sur les CD audio est donc  $F_s = 44,1$  kHz.

Une fois cette acquisition réalisée, le signal numérisé peut être sauvegardé au format WAV, AIFF (non compressé, contenant du PCM), ou MP3, WMA, OGG (compressé). Bien que réduisant la qualité du son au cours de la compression (altération souvent imperceptible pour les auditeurs), le format MP3 développé à l'Institut Fraunhofer depuis les années 90 reste le plus répandu à ce jour, d'une part grâce à sa compatibilité étendue (la plupart des périphériques audio usuels peuvent le lire), sa taille limitée pour une qualité relativement bonne (généralement en dessous de 10 Mo), mais aussi grâce aux tags ID3<sup>3</sup> permettant de conserver certaines métadonnées essentielles pour l'identification du morceau (titre, compositeur, style, année, piste, album) directement dans le fichier. Si les tags ID3 permettent de renseigner des métadonnées de base, des structures plus élaborées sont nécessaires pour représenter des concepts musicaux avancés tels que des œuvres, leurs interprétations et leurs partitions. Différentes structures de représentation de concepts musicaux sont donc présentées dans ce qui suit.

<sup>3</sup> ID3 : « IDentify an MP3 ».

### 2.3.2 Représentation de concepts musicaux

Dans cette partie, nous étudions et discutons les formats de représentation de concepts musicaux les plus utilisés en informatique. On aborde tout d'abord les représentations ontologiques et taxonomiques employées dans les bases de titres musicaux, avant de s'intéresser aux représentations logiques de partitions musicales. Enfin, on discute de la pertinence de la représentation de concepts subjectifs tels que le genre musical ou la perception d'émotions.

#### 2.3.3.1 Représentation de connaissances musicales

La Music Ontology (MO) [46] a été définie par Yves Raimond et al. en 2006 pour représenter des concepts tels que des œuvres musicales, des artistes et des interprétations au sein du Web Sémantique. Elle se fonde sur les ontologies de haut niveau existantes pour enrichir des concepts fondamentaux (Agent, Event, Instant), assurant ainsi une intégration totale de son schéma conceptuel au sein du Web Sémantique. Elle distingue l'œuvre, de ses expressions (interprétations, partitions), de ses manifestations (album) et de ses items (mon exemplaire de l'album). Cependant, la MO semble avoir été particulièrement conçue pour l'industrie musicale, et donc la gestion et la consommation de titres à grande échelle. Ainsi, elle détaille surtout des structures pour la gestion de produits musicaux (supports d'enregistrements, concerts, biographies des interprètes), que pour leur création, interprétation ou leur analyse (structure, instrumentation, clé, harmonie, niveau de difficulté, tempo, partition).

Toutefois, son modèle de représentation générique et expressif lui permet de s'imposer comme référence en matière d'ontologie musicale et donne lieu au développement de nombreuses extensions renforçant son pouvoir d'expression dans des cas particuliers. Les concepteurs de la MO lui ont ainsi adjoint une Chord Ontology<sup>4</sup> pour la description d'accords. La Symbolic Notation Ontology<sup>5</sup> permet de manipuler plus précisément des occurrences de notes ou autres symboles musicaux. La TimeLine Ontology permet alors de synchroniser des événements symboliques (partition) et acoustiques (audio). Le projet COMUS (Ontological and Rule-Based Reasoning for Music Recommendation System) [47] s'intéresse plutôt à l'aspect émotionnel de l'écoute musicale : il propose une ontologie permettant d'exprimer différentes conditions d'écoute (état mental de l'auditeur, lieu, circonstance) afin de bâtir un système de recommandation musical perfectionné. On compte également des taxonomies sur les genres musicaux [41], les instruments de musique (norme General MIDI, tags ID3) et les émotions et états liés à la musique.

Malgré cette richesse sémantique, la MO ne semble que rarement utilisée par les grandes applications du domaine. Par exemple, afin d'analyser au mieux les goûts des auditeurs, les applications de type Music Recommendation System (recommandation de titres) exigent un format de définition des titres à la fois expressif et simple pour des questions de performance. Ainsi, les principales bases de titres et Web radios du marché (MusicBrainz, GraceNote, Spotify, Last.fm, Pandora) définissent leurs propres formats XML, plus légers et adaptés à leurs besoins. Seules l'application Libre.fm utilise la MO à la source. Toutefois, des conversions d'un format à l'autre

---

<sup>4</sup> <http://www.omras2.org/ChordOntology>, visité le 25/03/2013.

<sup>5</sup> [http://wiki.musicontology.com/index.php/Symbolic\\_Notation\\_Ontology](http://wiki.musicontology.com/index.php/Symbolic_Notation_Ontology), visité le 25/03/2013.

semblent possibles grâce à des projets indépendants (tel que le service de conversion d'Echonest<sup>6</sup>, ou le RDFizer de Last.fm<sup>7</sup>).

En marge de la MO et de ses applications commerciales, on compte quelques initiatives de formalisation du domaine musical pour la musicologie et la création de bibliothèques d'œuvres numérisées. Le projet Neuma [1], débuté en 2009 par l'Institut de Recherche sur le Patrimoine Musical Français (IRPMF), le Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), la Bibliothèque Nationale de France (BNF) et divers laboratoires de recherche, a pour objectif de constituer une librairie numérique pour la musique ancienne (psaumes, chants grégoriens, liturgique, antérieurs au 18ème siècle). Les œuvres sont regroupées en collections (*Sequentia*, *Psautiers*, etc) sur lesquelles les musicologues peuvent faire des requêtes avancées (par exemple rechercher un extrait musical dans toutes les collections), des analyses, créer des annotations, ou télécharger les fichiers associés (fichiers midi ou partitions). Des ontologies spécifiques ont été mises en place pour représenter des concepts précis concernant la musique ancienne, tels que le style Neumatic, Syllabic, les différentes Voix et Cadences. L'outil d'annotation permet alors de relier ses commentaires à des éléments de la partition et de les référencer avec des mots-clés concernant la Finale, la Cadence, le Rythme, la Mélodie, les Altérations, les Ornaments, le Figuralisme, la Clé, le Registre et le Mode [48]. L'outil d'annotation de Neuma est étudié plus en détail dans la partie 3.2.4, notamment sous l'angle des interactions homme-machine.

Les ontologies existantes présentent toutefois deux limites pour notre contexte : l'absence de modélisation unifiée des formes et structures musicales, et l'impossibilité de décrire de façon détaillée des interprétations. Une idée serait alors d'établir une taxonomie extensive des formes musicales (Sonate, Fugue, Concerto, etc.) et des structures les plus courantes (Thème, Exposition, Développement, Thème inversé, Variation, Coda, etc.). La description d'interprétations musicales requerrait de pouvoir évoquer tant les aspects techniques (Doigtés, Gamme, Position de main, Attaque) qu'expressifs (Musicalité, Dynamique, Emotion), ces deux aspects étant intimement liés. Nous définissons une telle ontologie dans la partie 4.3.4.3.

### 2.3.3.2 Représentation logique de partitions musicales

La partition musicale est le support privilégié de l'apprentissage d'une pièce, particulièrement en musique classique, où le solfège occupe une place prépondérante. A l'image de l'écriture et de la lecture pour le langage, elle permet aux musiciens de disposer d'un support de sauvegarde et d'échange d'œuvres musicales. Le développement du Web a ainsi permis le partage à grande échelle de fichiers représentant des partitions musicales. D'abord de simples images numérisées, les partitions se téléchargent maintenant principalement sous forme de fichiers PDF permettant une meilleure qualité d'impression. Cependant, ces formats ne permettent aucune édition ou interactivité. Ces dernières années ont donc vu la multiplication des formats de représentation de partitions (et autres types de notation musicale) permettant leur manipulation dans des logiciels spécialisés et l'interprétation automatique du morceau par la machine, notamment grâce à la norme MIDI (Music Instrument Digital Interface [23]). La plupart des formats sont fondés sur le langage SGML, comme le SMDL [16], ou bien sur du XML, comme MML [26], MusicXML [10] et leurs dérivés.

---

<sup>6</sup> Service de conversion XML vers MO d'Echonest : <http://blog.dbtune.org/post/2008/07/01/Echonest-Analyze-XML-to-Music-Ontology-RDF>, visité le 25/02/2013.

<sup>7</sup> Service de conversion XML vers MO de Last.fm : <http://lastfm.rdfize.com/>, visité le 25/02/2013.

Cependant, seul MusicXML semble s'être imposé à l'heure actuelle. En effet, la plupart des éditeurs de logiciels, outre leurs propres formats (.mus pour Finale, .mscz pour MuseScore), proposent d'importer et d'exporter des fichiers MusicXML.

Développé depuis 2004 par la société Recordare LLC., puis racheté par MakeMusic en novembre 2011, MusicXML a pour objectif le partage en ligne de partitions musicales interactives. Il s'inspire d'anciens formats académiques, tels que MuseData et Humdrum. Etant utilisé par de nombreux logiciels et plugins actuels, le format est régulièrement mis à jour. Ainsi, MusicXML 3.0<sup>8</sup>, sorti en août 2011, intègre notamment une nouvelle taxonomie de 866 instruments améliorant son interprétation MIDI, ainsi que des éléments de notation propres aux musiques orientales.

Du point de vue descriptif, le graphe de MusicXML correspond à une lecture linéaire naturelle d'une partition. Après la déclaration de la DTD<sup>9</sup>, les métadonnées de la partition sont détaillées (titre compositeur, droits, logiciel utilisé), puis sa mise en page (contraintes de marges et d'espacement des éléments, polices de caractères : ces informations sont facultatives, la mise en page pouvant être entièrement gérée par l'application) et les informations textuelles à afficher sur l'en-tête de la première page (titre, compositeur, opus, etc.). Le fichier peut ensuite comporter une liste de portées (parts) associées à leurs instruments respectifs,

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
<!DOCTYPE score-partwise PUBLIC
"-//Recordare//DTD MusicXML 2.0 Partwise//EN"
"http://www.musicxml.org/dtds/partwise.dtd">
<score-partwise version="2.0">
  <part-list>
    <score-part id="P1">
      <part-name>Music</part-name>
    </score-part>
  </part-list>
  <part id="P1">
    <measure number="1">
      <attributes>
        <divisions>1</divisions>
        <key>
          <fifths>0</fifths>
        </key>
        <time>
          <beats>4</beats>
          <beat-type>4</beat-type>
        </time>
        <clef>
          <sign>G</sign>
          <line>2</line>
        </clef>
      </attributes>
      <note>
        <pitch>
          <step>C</step>
          <octave>4</octave>
        </pitch>
        <duration>4</duration>
        <type>whole</type>
      </note>
    </measure>
  </part>
</score-partwise>

```




Figure 12 : Extrait d'un fichier MusicXML et représentation SVG associée (source : LLC MusicXML 2.0 tutorial)

afin d'assurer une interprétation homogène du morceau dans divers environnements logiciels. Enfin, chaque portée est décrite, mesure par mesure et note par note. La Figure 12 présente un exemple de fichier MusicXML très simple et sa représentation graphique associée. Cette dernière peut être générée grâce à un processeur XSLT<sup>10</sup>. Le laboratoire Grame (Centre national de création musicale de

<sup>8</sup> <http://www.makemusic.com/musicxml/specification>

<sup>9</sup> Document Type Definition : document définissant la grammaire du langage XML considéré

<sup>10</sup> eXtensible Stylesheet Language Transformations : langage permettant de transformer un fichier XML en un autre. Dans notre cas, le format cible peut-être le SVG (Scalable Vector Graphics), décrivant des tracés vectoriels.

Lyon) met également à disposition des développeurs une librairie<sup>11</sup> en C++ pour l'affichage et la conversion de fichiers MusicXML vers d'autres formats.

Des projets autres que des éditeurs de partitions intègrent le standard MusicXML. On cite par exemple le projet WedelMusic [6], qui vise à diffuser de la musique interactive sur le Web, grâce à divers documents multimédia (vidéo, audio, images, partitions, documents, animations) synchronisés. Cependant, le projet, achevé en 2003, ne semble pas avoir rencontré le succès escompté, au vu du peu de ressources et d'éditeurs disponibles sur le Web. Cet exemple illustre le risque de privilégier la formalisation et la modélisation à la mise en place d'outils centrés utilisateurs simples, voire ludiques, pour la création de tels contenus par des humains. En effet, malgré la puissance d'expression et les fonctionnalités très avancées que permettent les modèles proposés, l'absence de contenus (souvent liée à une absence de moyens) freine leur mise sur le marché. Ce constat est pris en compte dans nos travaux, en tentant de coordonner la définition de nouveaux modèles de représentation et de gestion des connaissances à des services innovants et des processus automatiques permettant de les implémenter facilement.

Il existe également des formats de partition plus simples, ne reposant pas sur les graphes. La notation ABC<sup>12</sup> par exemple est très populaire pour la transcription de lignes mélodiques (exemple : communauté thesession.org, voir partie 3.1.3). En effet, cette dernière peut s'écrire dans un fichier texte, en utilisant un code reliant les caractères A (la), B (si), C (do), D (ré), E (mi), F (fa) et G (sol) aux notes correspondantes (notation anglo-saxonne). Créé en 1995 par Chris Walshaw, ABC notation est majoritairement utilisé dans la transcription d'airs monophoniques du folklore celtique (jig, reel, scottish).

De plus, la génération d'images de la partition ou de fichiers MIDI associés s'effectue très simplement grâce à des services Web de conversion, tels que celui du portail Concertina<sup>13</sup>. La Figure 13 ci-dessus donne un exemple de fichier décrivant une partition au format ABC notation, ainsi que l'image résultante. La première ligne définit un identifiant (dans le cas où le fichier comporte plusieurs partitions distinctes), la deuxième le titre du morceau, puis la mesure, la valeur de base d'une note (ici, une croche ternaire : 1/8), le type de morceau (une gigue), puis la tonalité (sol majeur). Enfin, les quatre dernières lignes énumèrent les notes. Celles-ci sont tantôt en

```
X:1
T:The Legacy Jig
M:6/8
L:1/8
R:jig
K:G
GFG BAB | gfg gab | GFG BAB | d2A AFD |
GFG BAB | gfg gab | age edB |1 dBA AFD :|2 dBA ABd | :
efe edB | dBA ABd | efe edB | gdB ABd |
efe edB | d2d def | gfe edB |1 dBA ABd :|2 dBA AFD |]
```

The Legacy Jig

Figure 13 : Exemple de partition au format ABC notation

<sup>11</sup> The MusicXML library : <http://libmusicxml.sourceforge.net/>, visité le 26/02/2013.

<sup>12</sup> <http://abcnotation.com>

<sup>13</sup> [http://www.concertina.net/tunes\\_convert.html](http://www.concertina.net/tunes_convert.html)

majuscules ou minuscules pour fixer leur octave. ABC notation présente également l'avantage d'être facilement converti au format MusicXML<sup>14</sup>, et vice-versa<sup>15</sup>.

### 2.3.2.3 Discussion sur la représentation de concepts musicaux

Du point de vue purement artistique, il paraît impossible de définir une ontologie pour décrire scrupuleusement des interprétations musicales. En effet, par définition, une ontologie n'admet pas deux descriptions contradictoires d'une même entité, alors que ces distinctions font tout l'intérêt de l'interprétation musicale. Ainsi, deux musiciens peuvent décrire une pièce de façon différente, suivant ce qu'elle leur évoque, sans qu'aucune de ces descriptions ne soit erronée : chacune représente une vision différente du même objet.

Le modèle sémiotique que nous proposons dans la partie 4.2.3 peut donc gérer plusieurs descriptions sémantiques pour un même objet et opérer des rapprochements entre ces descriptions afin d'initier des débats au sein de la communauté.

Toutefois, la musique occidentale, étudiée depuis longtemps, a été formalisée sur certains aspects techniques (doigtés, gestes musicaux, usage de la pédale) et structurels (grandes parties, phrases musicales, motifs). Il convient d'intégrer ces conventions, dans la mesure où elles font sens pour une majorité de musiciens, même s'ils ne l'appliqueront pas tous dans le même contexte (exemple : doigtés différents pour un même passage, découpages distincts pour la même pièce). Une de nos contributions consiste donc en un modèle descriptif générique et une ontologie pour la description d'interprétations musicales (Musical Performance Ontology, MPO, voir partie 4.3.4.3).

De même, si la palette d'expressions et de nuances exprimables en musique semble infinie et hautement subjective, il existe de nombreux modèles et systèmes de classification des émotions dont l'usage pourrait être pertinent dans notre cadre ([5], [37], [47]). En effet, la technique reste au service de l'expression. Une plateforme de gestion de savoir-faire de haut niveau doit donc être en mesure de fournir à ses utilisateurs des outils pouvant traiter aussi bien de la technique que de l'expression. A ce niveau, la machine peut proposer un cadre conceptuel permettant aux musiciens d'échanger simplement sur ces considérations et de trouver des ressources qui s'y rapportent. On imagine par exemple une requête renvoyant tous les extraits musicaux exprimant la colère, peu importe l'œuvre considérée : cette fonctionnalité d'exploration thématique d'œuvres serait particulièrement intéressante pour les musicologues, même si elle requiert un lourd travail d'identification en amont. Cependant, cette tâche peut être réalisée implicitement par les apprenants et professeurs annotant des partitions pour leurs besoins pédagogiques.

L'avantage principal de telles formalisations est de permettre l'automatisation de certains processus usuellement dévolus à l'humain : classer des titres, en recommander à ses amis, identifier le chanteur sur un extrait audio, ou encore en distinguer les différentes parties. L'ECM se pose alors une question complexe mais essentielle : un programme peut-il comprendre la musique de la même manière qu'un humain ? Nombre de méthodes développées dans ce domaine pourraient être exploitées dans le cadre d'une base de savoir-faire musicaux, notamment afin d'automatiser certains processus de saisie de ressources pédagogiques. Dans ce qui suit, nous identifions et étudions les méthodes que nous pourrions exploiter dans notre contexte.

---

<sup>14</sup> <http://abc2xml.appspot.com/>

<sup>15</sup> <http://www.nilsliberg.se/ksp/easyabc/>



### 2.3.3 Extraction automatique de Connaissances Musicales (ECM)

Le domaine de l'Extraction de Connaissances Musicales (ECM ou MIR pour Music Information Retrieval en anglais) est relativement nouveau. D'abord éclipsé par la reconnaissance vocale (dont il exploite d'ailleurs certains algorithmes), il s'est développé dans les années 2000 suite à l'augmentation rapide de la quantité de ressources musicales sur le Web, révélant la nécessité d'organiser, classer et effectuer des requêtes sur ces ressources, quelles que soient leurs formes. La communauté est aujourd'hui très active, se structurant en société (ISMIR : International Society for Music Information Retrieval) se réunissant régulièrement dans des colloques internationaux spécialisés (ISMIR, SMC) et publiant leurs travaux dans des journaux internationaux. L'ECM s'attache ainsi à répondre aux types de questions suivantes, étant donné un fichier audio A :

- |                                |   |   |
|--------------------------------|---|---|
| Identification                 | } | ▪ Quel est le titre de A ?  |
| Analyse du timbre              |   | ▪ Qui a composé A ? Peut-on en extraire les caractéristiques de composition ?   |
| Analyse rythmique              | } | ▪ Qui est le chanteur de A ?  |
| Analyse harmonique             |   | ▪ Quel instrument joue le solo dans A ?   |
| Classification, recommandation | } | ▪ Peut-on isoler ce solo ?  |
| Analyse symbolique             |   | ▪ Quel est le tempo de A ?  |
|                                | } | ▪ Quelle pulsation peut-on lui attribuer ?  |
|                                |   | ▪ Quelle est la tonalité de A ?   |
|                                | } | ▪ Quelle est la suite d'accord sur le thème de A ? Peut-on en générer d'autres qui aillent bien avec ce thème ?             |
|                                |   | ▪ A quel style musical est-ce que A se rattache ? Si c'est du jazz, est-ce plutôt du ragtime, du manouche, du swing, etc. ? |
|                                | } | ▪ Quels mots décrivent le mieux A ?   |
|                                |   | ▪ Dans ma liste de morceaux, lequel se rapproche le plus de A ?   |
|                                | } | ▪ Comment obtenir une partition de A ?  |
|                                |   | ▪ Comment trouver les différents thèmes de A sur sa partition ? Y a-t-il un motif particulier qui serait répété ?           |
|                                | } | ▪ Comment trouver les doigtés pour jouer A ?  |

Naturellement, les différents sous domaines identifiés (par exemple l'analyse du timbre et l'analyse rythmique) peuvent être utilisés conjointement pour répondre à un problème donné (identifier un titre). Li, Ogiwara et Tzanetakis, concentrent différents types de problèmes liés au MIR et les méthodes pour les résoudre à travers des exemples de projets de recherche sur ce thème [36]. Bien que le domaine de l'extraction de connaissance musicale soit en plein essor, il est essentiellement utilisé pour la gestion de titres musicaux sur le Web et rarement pour la pratique instrumentale. Il existe cependant des initiatives en ce sens telles que l'application Songs2See ou le module d'apprentissage de Garage Band (voir partie 3). Cependant, ces outils s'adressent surtout à des débutants, en ne considérant que la composante d'exécution des pièces (jouer les bonnes notes au bon moment).

Dans notre contexte, nous nous intéressons essentiellement à l'analyse symbolique pour deux raisons. En premier lieu, l'analyse directe de fichiers audio requiert une étape supplémentaire de traitement du signal afin d'aboutir à une représentation symbolique adaptée au problème que l'on souhaite résoudre. Si l'échantillon audio est de mauvaise qualité (bruit), ou trop complexe (polyphonie, timbres), les résultats seront difficilement exploitables. En second lieu, notre contexte

de gestion de savoir-faire musicaux s'appuie principalement sur l'étude de partitions musicales (voir partie 2.2.4). Ces dernières constituent en effet un support essentiel pour la comparaison d'interprétations musicales. Enfin, l'approche sémiotique que nous proposons dans la partie 4 s'appuie notamment sur l'annotation de supports de référence des savoir-faire à transmettre.

Si l'analyse audio intervient directement sur l'interprétation du musicien, l'analyse symbolique (de la partition, ou toute autre description logique de la pièce) intervient généralement en amont de l'interprétation afin d'explicitier les symboles employés.

Les outils existants permettent essentiellement de repérer des structures remarquables au sein de partitions hétérogènes. En effet, la compréhension de la structure d'une œuvre facilite son assimilation, surtout pour les pièces longues et difficiles. Différents niveaux de granularité peuvent être recherchés, allant de plusieurs pages (grands thèmes), à quelques notes (motif de base). Certaines structures sont propres à des formes musicales, telles que la Fugue et son thème repris aux différentes voix, la Sonate basée sur un thème, ses développements et ses réexpositions, ou encore les danses folkloriques reposant sur des rythmes caractéristiques (tarentelle, sicilienne).

Figure 14 : Exemple de structures relevées sur une partition de Schumann

Quand certaines structures ne sont que des motifs rythmiques ou des effets techniques particuliers, d'autres ont un sens artistique, à l'image de la phrase musicale. Comme en linguistique, la phrase musicale expose une idée significative du point de vue de la déclamation, de l'articulation et de la respiration. La Figure 14 résume les structures musicales les plus répandues. La détection automatique de telles structures est plus ou moins complexe suivant leur nature. Si l'on dispose de contraintes en amont, la recherche consiste alors à parcourir la partition à l'aide d'une fenêtre générant toutes les séquences de notes possibles (la partition étant un graphe dont la racine est l'ensemble de la pièce et les feuilles sont les notes) et éliminer celles ne répondant pas aux contraintes. L'information sur la taille de la séquence recherchée est alors essentielle pour faciliter la recherche. Cependant, cette information n'est pas toujours définie. La difficulté réside alors dans la notion de similarité en musique. Alors qu'un humain repère assez facilement un motif récurrent dans

Figure 15 : Motifs répétés sur une partition (extrait de la 5ème Symphonie de Beethoven)

une pièce (par exemple, celui de la célèbre Symphonie no 5 de Beethoven, voir Figure 15), une machine aura beaucoup plus de difficulté à établir en quoi deux extraits sont similaires, quoique non identiques. Sur l'exemple de la Figure 15, il s'agit du rythme (3 croches + 1 blanche) et des intervalles (3 notes répétées puis une tierce mineure descendante). Toutefois, le compositeur

peut réexposer le motif avec plusieurs variantes (inversion, changement du rythme, des intervalles, polyphonie, etc.). De plus, le déroulement temporel de la musique nécessite une bonne mémoire pour l'assimiler, en particulier sur les quelques notes précédant la position actuelle dans la lecture de la partition. Ainsi, O. Lartillot propose dans [31] une méthode de découverte progressive de similarités. Pour ce faire, une fenêtre temporelle parcourt la partition dans le sens de lecture usuel, et construit des motifs abstraits dont chaque occurrence est recherchée dans le texte. Les motifs abstraits comportent des préfixes qui sont eux-mêmes des motifs abstraits. Un arbre de motifs est alors construit permettant de disposer de toutes les structures remarquables de la partition, de la plus simple à la plus complexe, en passant par les recouvrements. Des méta-motifs permettent de retenir les caractéristiques communes d'un groupe de motifs. Cet algorithme, en cours d'implémentation dans le logiciel Open Music, permet de détecter des motifs répétés dans une pièce de façon non-déterministe. Cependant, l'auteur reconnaît des difficultés à le rendre performant.

A partir d'une partition numérisée, on peut extraire d'autres structures plus simples à repérer et directement exploitables dans l'apprentissage instrumental. Dans le cadre de notre base de Signes, nous avons notamment développé un système d'analyse automatique de partitions déterminant la structure générale d'une pièce en estimant à chaque nouvelle mesure la probabilité de fin ou de début d'une nouvelle partie. Des motifs réguliers tels que des gammes ou des arpèges peuvent également être extraits afin de suggérer des exercices permettant de les travailler (voir partie 5.5.4).

Concernant le jeu instrumental lui-même, les travaux existants portent principalement sur la détermination automatique de doigtés, en particulier pour les instruments polyphoniques tels que le piano ou la guitare. La détermination du doigté consiste à indiquer quel doigt utiliser sur chaque note, de manière à optimiser la position de la main (aise, position souple et détendue) et anticiper la prochaine position à adopter. Le problème de la détermination d'un bon doigté est donc d'autant plus complexe que l'écriture musicale l'est aussi (polyphonie, tempo). Il est également nécessaire de prendre en compte les spécificités de chaque interprète. Ainsi, il est courant qu'un professeur de musique adapte un doigté pour un élève plus jeune ayant de petites mains. De même, il arrive qu'un doigté pourtant intuitif se révèle peu adapté suivant le tempo ou la structure de la pièce abordée (voir exemple de la Figure 16). Le professeur corrige alors ce doigté pour éviter à l'élève d'adopter une position de main qui le freinera dans l'apprentissage de la pièce, voire le crispera et lui causera des douleurs. Au fil de ses expériences, l'élève appliquera de lui-même le doigté convenable en fonction du motif rencontré et de ses préférences. Ainsi, même s'il existe de nombreuses astuces et conventions, la définition du « doigté optimal » ne va pas de soi. Malgré ces difficultés, des algorithmes ont été mis au point afin de déterminer automatiquement un doigté acceptable pour un extrait musical donné, particulièrement en piano. La plupart reposent sur la programmation dynamique et les systèmes experts [2] [35] [42] [62]. La méthode générale consiste à optimiser localement chaque doigté (par

Doigté intuitif :

Doigté correct :

Figure 16 : Exemple de doigté non intuitif pour une note répétée au piano (extrait de la Suite Espagnole - Séville, d'Albéniz) : le changement de doigt à chaque itération permet de gagner en précision rythmique et en vélocité

Assumptions of the Model: Minimum and Maximum Practical, Comfortable, and Relaxed Spans (in Semitones) for All Pairs of Right-Hand Fingers

Finger Pairs	MinPrac	MinComf	MinRel	MaxRel	MaxComf	MaxPrac
1-2	-5	-3	1	5	8	10
1-3	-4	-2	3	7	10	12
1-4	-3	-1	5	9	12	14
1-5	-1	1	7	10	13	15
2-3	1	1	1	2	3	5
2-4	1	1	3	4	5	7
2-5	2	2	5	6	8	10
3-4	1	1	1	2	2	4
3-5	1	1	3	4	5	7
4-5	1	1	1	2	3	5

Figure 17 : Exemple de table de coûts pour la détermination automatique de doigtés (extrait de Parncutt et al. [42]).

Pour chaque paire de doigts, les distances (en demi-tons) minimales et maximales jouables sont données. Une gradation du confort d'articulation des notes est introduite (relaxé, confortable, faisable).

(Figure 17) sont ensuite utilisées pour éliminer les doigtés impossibles ou crispants (ergonomiquement) jusqu'à ce qu'il n'en reste plus qu'un. Pour ce faire, on additionne le coût de chaque paire de notes successives. La combinaison de doigts minimisant ce total est celle retenue. Toutefois, cette méthode comporte une limite importante pour le piano : elle ne permet pas de traiter des extraits polyphoniques. Al Kasimi et al. proposent pour ce faire d'introduire un coût vertical caractéristique de la difficulté à plaquer un accord en terme d'écartement de la main [2]. La partition est alors modélisée par un graphe en treillis où chaque nœud représente une position de main possible. Une nouvelle couche est superposée au graphe à chaque début de note et supprimée lorsque la note se termine (prise en compte des notes tenues et des liaisons). La comparaison des résultats de ces algorithmes avec des doigtés déterminés par des joueurs professionnels montre que si les doigtés automatiquement déterminés ne sont pas exactement ceux utilisés par ces derniers, ils restent tout de même applicables dans le cadre d'une interprétation par un humain [35]. Leur usage dans un environnement de e-Learning instrumental reste donc pertinent, surtout pour les débutants, et même si des cas particuliers tels que les substitutions ou l'intervention de la main gauche restent encore à traiter. De plus, de nombreuses améliorations sont à l'étude sur ce sujet, notamment la personnalisation de la proposition en fonction du pianiste (anatomie, préférences, expérience) [2] et de sa sensibilité musicale (programme interactif pour le violon : the String Fingering program [21]), et la représentation tridimensionnelle du doigté à adopter [35].

Outre l'extraction de motifs et la détermination de doigtés, la partition numérique pourrait être encore plus exploitée dans le cadre de l'extraction de connaissances musicales pour l'apprentissage instrumental. Afin d'assister le musicien dans la construction de la base de Signes musicaux, nous avons donc défini un analyseur automatique de partition (Score Analyzer, voir partie 6.3). L'affichage des résultats et le processus de co-construction de la base repose sur l'annotation multimédia de partitions. Mais avant de présenter notre solution, on dresse un état de l'art des applications existantes pour l'apprentissage musical, avec leurs limites et dispositions pour la création d'une base de gestion de savoir-faire pratiques.

petits groupes de notes) afin que le doigté de toute la partition le soit aussi. Par exemple, le doigté est d'abord déterminé sur la note actuelle plus les six suivantes (anticipation moyenne d'un pianiste pendant le déchiffrement, un professionnel pouvant anticiper jusqu'à deux secondes de musique sur ce qu'il joue [42]). Pour ce faire, toutes les combinaisons possibles de doigts (numérotés de 1, le pouce, à 5, l'auriculaire) sont générées. Des tables de coûts

### **2.4 Synthèse**

Ce chapitre a tout d'abord permis de distinguer les éléments fondamentaux de la gestion des connaissances et leurs rôles : données, métadonnées, information, savoir, connaissances et savoir-faire. Les modes de représentation des connaissances les plus utilisés en informatique ont également été étudiés avant d'évoquer les bases de connaissances, leurs caractéristiques, leurs applications actuelles et leurs limites pour la gestion de savoir-faire pratiques.

L'apprentissage musical a ensuite été étudié en tant que champ d'application de nos travaux. Son intérêt en tant que tel repose essentiellement sur la complexité des processus en jeu pour sa maîtrise : compétences intellectuelles et cognitives (raisonnement), pratiques et techniques (expérience), sensibles et esthétiques (finalité) doivent être acquises de concert.

Nous nous sommes ensuite concentrés sur la gestion de données et connaissances musicales en informatique et leur exploitation dans divers services : modélisation, représentation dans des bases de connaissances, classification, Web radio ou systèmes de recommandation. Ces applications reposent notamment sur les méthodes et algorithmes mis en œuvre dans le domaine de l'Extraction de Connaissances Musicales. Les avancées récentes de ce domaine permettent de positionner la machine non plus comme une simple station de traitement de média, mais aussi comme un agent intelligent intervenant dans le processus d'écoute ou d'apprentissage afin d'assister l'utilisateur dans ses activités. Cependant, si les applications citées concernent essentiellement l'écoute de titres musicaux, le champ d'application de cette thèse reste la formation nécessaire pour produire de tels titres.

On s'intéresse donc dans le chapitre suivant aux approches exploitant les TIC pour l'apprentissage instrumental, de l'utilisation d'éditeurs de partitions numériques aux applications de e-Learning spécialisées en passant par les sites communautaires et les jeux-vidéos musicaux.

### 3 Les approches des TIC pour l'apprentissage musical

Dans ce chapitre, des approches pédagogiques exploitant les TIC pour la musique sont étudiées, des bases de contenus pédagogiques, aux applications de e-Learning instrumental. Pour ce faire, on distingue les outils périphériques à l'activité, tels que les éditeurs de partitions (pour préparer les cours et exercices), des applications véritablement dédiées à l'apprentissage. Ces applications étant très nombreuses, seules les plus représentatives et reconnues pédagogiquement dans leurs catégories sont étudiées. Nous nous intéressons également à l'annotation de documents pour l'illustration d'œuvres et de cas. En effet, l'annotation est une pratique particulièrement pertinente dans le cadre de la gestion de savoir-faire, et joue un rôle important dans notre proposition de base de Signes.

#### 3.1 Applications pour l'apprentissage musical

##### 3.1.1 La place des TIC dans l'apprentissage musical

Qu'il s'agisse du solfège, de l'éveil musical, ou de la pratique de l'instrument, beaucoup d'écoles de musique s'appuient aujourd'hui sur les TIC pour étayer leurs formations. L'enquête de l'ARIAM réalisée en 2010 sur les TICE dans les conservatoires français montre que 76% d'entre eux (sur 130 établissements) utilisent les TIC [34]. Ces technologies interviennent dans diverses activités : la création de ressources pour l'enseignement (partitions, activités, parcours guidés, exercices), l'autoformation et l'entraînement (recherche d'interprétations et de partitions, composition, rendu d'exercices), et la communication (entre élèves, avec d'autres professeurs, des interprètes, dans le cadre de master classes). Dans son rapport de 2009 sur les TIC et la musique<sup>16</sup>, le compositeur canadien Claude Frenette souligne l'apport des nouvelles technologies dans le développement des compétences musicales des élèves. Il les regroupe en trois catégories : créer, interpréter et apprécier des œuvres musicales. De nombreux exemples de projets pédagogiques musicaux impliquant les TIC sont donnés.

La composition est sans doute le domaine dans lequel les outils informatiques sont les plus nombreux et les plus attractifs. Bien que n'étant pas notre propos central, ces derniers sont évoqués dans la partie 3.1.6. En effet, la plupart d'entre eux peuvent être utilisés dans le cadre de l'analyse, et donc de la compréhension d'une pièce.

Les outils pour l'aide directe à l'interprétation restent plus rares, le professeur de musique étant naturellement le meilleur juge possible d'une interprétation à améliorer. Ces outils de e-Learning sont donc plutôt utilisés en dehors du cadre du cours de musique hebdomadaire. Toutefois, on peut souligner l'intérêt pour les élèves d'enregistrer et de réécouter leurs interprétations, afin de prendre conscience des aspects techniques et interprétatifs à améliorer.

Dans le cadre de l'analyse musicale, les séquenceurs peuvent être utilisés pour isoler une piste d'une œuvre orchestrale, visualiser et modifier la partition, à défaut d'avoir un véritable orchestre à sa disposition pour un cours (source : Compte rendu colloque TICE et arts 2000). Les TIC peuvent également être employées pour faire découvrir aux élèves un nouveau style de musique. Diverses académies proposent ainsi des ressources en libre téléchargement, telles que des parcours interactifs

<sup>16</sup> [http://carrefour-education.qc.ca/dossiers/la\\_musique\\_et\\_les\\_tic?page=0%2C0](http://carrefour-education.qc.ca/dossiers/la_musique_et_les_tic?page=0%2C0), visité le 25/02/2013.

d'une pièce (Exemple de l'académie de Dijon sur la musique chinoise<sup>17</sup>). La plateforme Web de la Cité de La Musique propose également une importante collection de ressources destinées à l'apprentissage musical, accessible aux écoles de musique via un abonnement.

Comme le montre l'étude de l'ARIAM, les outils les plus utilisés par les professeurs de musique restent les éditeurs de partition (présentés ci-dessous), permettant de créer leurs exercices de lecture de note et de polyrythmie, voire leurs propres compositions ou adaptations de morceaux existants. Certains professeurs peuvent également recommander des interprétations ou des partitions en libre accès sur le Web. Certaines écoles de musique nouent des partenariats avec des éditeurs de solutions spécialisées dans l'apprentissage musical, ou participent à des projets de recherche pédagogique incluant les TIC. On cite par exemple l'éditeur de partitions en ligne NoteFlight et le projet européen VEMUS (voir partie 3.1.5.3). Ces projets exploitent pleinement les progrès en terme d'équipement des élèves et professeurs (et non des établissements) en ordinateurs et en terminaux mobiles. Si ces derniers sont potentiellement de véritables stations de capture et de traitement du son, seuls des modèles et des services innovants peuvent en faire des outils de partage de savoir-faire musicaux simples et efficaces. Cependant, les solutions dédiées à la pédagogie restent pour le moment bien peu utilisées par rapport aux éditeurs de partitions ou séquenceurs traditionnels.

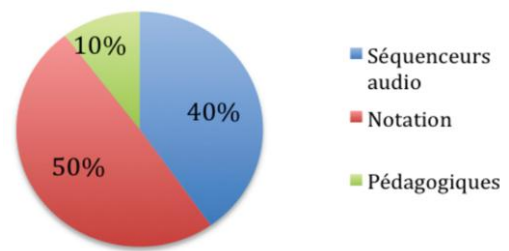


Figure 18 : typologie des logiciels utilisés dans les conservatoires français (source: ARIAM 2010)

Enfin, le rôle des réseaux sociaux (Facebook, Google+, MySpace) n'est pas à sous-estimer : ces derniers permettent aux établissements de communiquer sur leurs actions (concerts, auditions, master classes) et aux élèves de partager leurs créations et interprétations, en retirant ainsi une grande source de motivation.

Mais plus que les établissements, ce sont les individus qui sont demandeurs de services innovants pour l'apprentissage musical. Il convient de mettre en place des plateformes adaptées aux différents acteurs de la pratique musicale.

#### 3.1.2 Les éditeurs de partitions

Les éditeurs de partitions sont des outils essentiels pour la composition et la transcription d'œuvres musicales. Les éditeurs les plus connus sont Finale<sup>18</sup> et Sibelius<sup>19</sup>, même si le logiciel libre MuseScore<sup>20</sup> gagne en popularité, notamment du fait de sa gratuité et du dynamisme de sa communauté. Toutefois, l'objectif de cette partie n'est pas de les comparer mais plutôt de comprendre comment les musiciens les utilisent pour créer leur principal support de travail : la partition.

<sup>17</sup> Ressources pédagogiques de l'Académie de Dijon sur la musique chinoise : <http://tice.ac-dijon.fr/spip.php?article60>, visité le 25/02/2013.

<sup>18</sup> [www.finalemusic.com](http://www.finalemusic.com), visité le 25/02/2013.

<sup>19</sup> [www.sibelius.com](http://www.sibelius.com), visité le 25/02/2013.

<sup>20</sup> <http://musescore.org/fr>, visité le 25/02/2013.

Bien que chaque musicien s'attache à son outil de prédilection, des passerelles existent entre les différents logiciels, notamment grâce au format MusicXML ou aux outils de conversion de fichiers. Le principe général de création d'une partition reste également le même d'un logiciel à l'autre :

- Initialisation du document : proposition de modèles (partition pour piano avec deux voies, pour orchestre, ou soliste), choix du nombre d'instruments (et donc de portées), de la tonalité (armature), de la mesure (2/4, 3/4, 4/4, 6/8, etc.), du tempo (pour le « playback »), de certains paramètres de mise en page (marges, titres, espacement des symboles).
- Saisie des notes : peut être réalisée directement avec un clavier MIDI (mais cette forme est surtout employée avec les séquenceurs comme Cubase ou ProTools), ou avec le clavier de l'ordinateur. Dans ce dernier cas, l'utilisateur passe d'un mode « visualisation » à un mode « saisie » ou le clavier réagit différemment. Les touches A, B, C, D, E, F, G vont alors permettre d'insérer les notes correspondantes (en notation anglo-saxonne), pour une valeur présélectionnée (croche, noire, etc.). Des raccourcis claviers sont mis en place pour faciliter le changement de valeur ou d'octave. La partition créée doit toujours rester syntaxiquement correcte (respect de la mesure). Il est donc indispensable d'avoir une solide formation musicale pour utiliser ce type de logiciels. A tout moment la partition saisie peut être rejouée par la machine en MIDI (playback).
- Finalisation/exportation : la partition est imprimée et distribuée. Elle peut être diffusée sur des plateformes d'échange de partitions comme Muscore.com ou free-scores.com (voir partie suivante).

En marge de ce type d'éditeurs, on rencontre également des solutions originales, telles que :

- NoteFlight<sup>21</sup> : il s'agit d'un éditeur de partitions en ligne, fonctionnant grâce à la technologie Flash. Une fois connecté à son compte sur la plateforme, l'utilisateur peut créer ses partitions de la même façon qu'avec un éditeur de bureau. L'intérêt de ce type de solution est de pouvoir modifier et lire ses partitions à partir de n'importe quel terminal relié à internet, et de pouvoir partager ses compositions avec les autres musiciens inscrits. Noteflight supporte l'import et l'export de fichiers MusicXML.
- Symphony Pro<sup>22</sup> : cet éditeur est dédié aux tablettes tactiles. Au moment de la rédaction de ce mémoire, il ne fonctionne que sur l'iPad d'Apple. L'usage de la tablette et des gestes associés (toucher une note pour la modifier, « pinch » pour zoomer, « swap » pour changer de page) rend cette application particulièrement intéressante pour noter ses idées directement devant son instrument (en posant par exemple la tablette sur le pupitre du piano) plutôt que sur un ordinateur. La saisie des notes s'effectue directement en touchant les lignes de portée correspondantes, ou bien en utilisant un petit clavier intégré à l'application. Conscients des avantages que présentent ces nouveaux terminaux, Sibelius et Finale ont également lancé leurs propres offres mobiles, respectivement intitulées Avid Scorch et Songbook. Cependant, ces derniers sont bien plus limités que Symphony Pro puisqu'ils ne permettent pas l'édition de la partition. Scorch propose toutefois une

---

<sup>21</sup> <http://www.noteflight.com>, visité le 25/02/2013.

<sup>22</sup> <http://www.symphonypro.net/>, visité le 25/02/2013.



fonctionnalité intéressante pour les débutants au piano : un clavier animé s'affiche en même temps que la lecture d'une partition, permettant au musicien de repérer les notes du clavier à presser pour jouer le morceau.

- SmartScore<sup>23</sup> : il s'agit d'une application de reconnaissance optique d'images (OCR) dédiée aux partitions. Malgré de très gros progrès dans le domaine, les images analysées sont très rarement transcrites entièrement correctement. Ces applications permettent cependant de gagner beaucoup de temps dans la numérisation de recueils de partitions à éditer ou analyser.

Les applications ci-dessus permettent de saisir ou générer des partitions pour la publication. Une fois le document finalisé, le musicien dispose de différentes plates-formes Web pour diffuser sa création. Nous en étudions quelques-unes dans ce qui suit.

#### 3.1.3 Les communautés de partage de partitions

Le téléchargement de partitions est extrêmement répandu, surtout pour les pièces classiques ou folkloriques dont la plupart font partie du domaine public et sont donc disponibles sur le Web. Des communautés se sont donc naturellement structurées autour du partage de partitions. On en distingue plusieurs types, selon qu'elles regroupent des apprenants, recherchant des ressources et de l'aide pour jouer une pièce, ou des compositeurs, qui désirent stocker et partager leurs créations.

Les compositeurs peuvent disposer de leur propre page sur le site [free-scores.com](http://free-scores.com)<sup>24</sup>, qui constitue l'une des plus importantes bases de partitions gratuites (plus de 38000 partitions), principalement au format PDF, agrémenté d'interprétations MP3 ou MIDI. Du point de vue de l'apprenant, free-scores est particulièrement intéressant pour trouver des ressources gratuites, avec notamment un indicateur du niveau de difficulté de chaque pièce. Cette indication (de « débutant » à « avancé ») est une moyenne des notes données par les utilisateurs de la plate-forme. La pertinence de cette information dépend donc de la popularité de la pièce (beaucoup de téléchargements, et donc d'estimations). Dans la partie 6.3, nous proposons une méthode d'estimation plus précise et objective, utilisable dans le cadre d'une base de Signes Musicaux.

L'éditeur open source MuseScore propose également sa plateforme de partage de partitions depuis 2011, [musescore.com](http://musescore.com)<sup>25</sup>. Son objectif est de permettre aux utilisateurs de l'éditeur de partager leurs créations. Par rapport à free-scores, ce service se fonde sur le format de fichier de MuseScore (.mscz), et permet donc un playback de la partition choisie, synchronisé à une animation allumant chaque mesure jouée. Les utilisateurs peuvent également synchroniser leurs partitions à des vidéos de YouTube, permettant d'illustrer chaque pièce avec une interprétation. Tout comme free-scores, un système de commentaires permet aux compositeurs d'avoir des retours sur leurs contributions. L'intérêt de cette plate-forme codée en HTML 5 est qu'elle ne requiert pas l'installation d'un plugin pour l'animation de la partition et propose divers formats de téléchargement (MSCZ, PDF, MusicXML, MIDI, MP3). Elle constitue donc un excellent outil de promotion de l'application d'édition offline correspondante. Toutefois, un apprenant recherchant une partition donnée aura plus de chance de la trouver sur free-scores, qui possède une bibliothèque d'œuvres bien plus importante, puisque se

---

<sup>23</sup> <http://www.musitek.com/smartscore.html>, visité le 25/02/2013.

<sup>24</sup> [www.free-scores.com](http://www.free-scores.com), visité le 25/02/2013.

<sup>25</sup> <http://musescore.com/sheetmusic>, visité le 25/02/2013.

fondant sur le format PDF uniquement. Musescore.com s'adresse avant tout aux compositeurs et transcripteurs.

Comme précisé précédemment, Noteflight est à la fois un éditeur et une plateforme de partage de partitions en ligne. Il requiert cependant l'installation du plugin Flash. Il peut être intéressant du point de vue du musicien de pouvoir effectuer ces deux activités en ligne, notamment dans un contexte de mobilité.

Le site [thesession.org](http://thesession.org)<sup>26</sup> se pose en référence pour le partage de partitions de musique celtique et irlandaise. Contrairement aux solutions présentées précédemment, [thesession.org](http://thesession.org) est parti d'un projet amateur, qui a fédéré une très importante communauté mondiale. Ce type d'initiative remporte d'autant plus de succès que la plupart des morceaux folkloriques ne se transmettent usuellement que de façon orale, leur interprétation pouvant grandement varier d'un musicien à l'autre. Les réseaux actuels permettent alors de centraliser les documents de base sur lesquels chaque membre de la communauté va apporter une contribution/interprétation ou requérir une aide. Cette plateforme est donc plus centrée sur la pratique de la musique folklorique que sur le seul partage de ressources, comme en atteste son forum de discussion très animé. Les partitions sont ici postées au format ABC notation, particulièrement adapté pour les airs celtiques, « simples » sur le papier, mais très complexes à interpréter par la grande liberté de jeu qu'ils offrent (tempo, ornements, improvisation). Une section du site est dédiée à l'organisation de sessions, sortes de bœufs musicaux se déroulant usuellement dans un bar, aussi bien à destination des musiciens professionnels que des amateurs désirant jouer en groupe et découvrir de nouveaux airs. Le site tire son nom de cette pratique qui remonte à plusieurs siècles de musique traditionnelle.

Il existe bien d'autres plates-formes de partage de partitions : le projet Neuma, comme vu à la partie 2.3, les Werner Icking Music Archives<sup>27</sup> (WIMA), maintenant fusionnées avec la Bibliothèque Musicale Petrucci<sup>28</sup> qui compte plus de 210000 partitions en téléchargement gratuit pour quelques 64000 œuvres. Certaines ressources sont mises en commun, ainsi, free-scores pointe souvent sur des partitions de la bibliothèque Musicale Petrucci.

Cependant, dans le cadre de l'apprentissage musical, la partition n'est pas suffisante pour produire une interprétation de qualité. En particulier, les débutants préféreront observer directement les gestes à produire pour jouer la pièce concrètement. Des plates-formes telles que Musescore.com proposent bien des interprétations vidéos synchronisées aux partitions, mais celles-ci étant dédiées à l'écoute, elles ne peuvent pas véritablement servir de support d'apprentissage.

Dans la partie suivante, nous étudions donc des outils de partage de contenus multimédia pouvant être utilisés pour décrire des savoir-faire basiques. Nous nous concentrons ensuite sur les outils du e-Learning dédiés à l'apprentissage d'un instrument et les méthodes qu'ils mettent en œuvre pour transmettre des savoir-faire gestuels.

---

<sup>26</sup> <http://www.thesession.org/>, visité le 25/02/2013.

<sup>27</sup> <http://icking-music-archive.org>, visité le 25/02/2013.

<sup>28</sup> <http://www.imslp.org>, visité le 25/02/2013.

#### 3.1.4 Le partage de contenus multimédia

Les sites Web axés sur le partage de contenus multimédia connaissent un succès sans précédent (YouTube reçoit 72 heures de vidéo par minute selon Google). Bien qu'une grande partie des média publiés n'ait pas pour objectif la transmission de savoir-faire, de plus en plus de professionnels l'utilisent pour créer des leçons en ligne, souvent dans l'objectif de promouvoir leur activité en diffusant un aperçu de leur méthode et de leur expertise. Ainsi, on peut à présent s'initier gratuitement au piano, à la flûte irlandaise ou à la harpe sur YouTube. Cependant, il peut être difficile de trouver une ressource de qualité, et lorsqu'elles existent, celles-ci dépassent rarement le stade de l'initiation (ou de la publicité). Ces limitations peuvent être liées aux contraintes et caractéristiques spécifiques de ce type de sites fondés essentiellement sur la popularité (durée et qualité du flux, classement par popularité, tags incohérents).

Des sites plus spécialisés se posent en référence dans le partage de pratiques et astuces. Le projet e-How propose ainsi plus de 2 millions de vidéos et articles (source eHow) traitant d'un domaine précis, de la cuisine au jardinage, en passant par la comptabilité. Là encore, concernant la musique, seul le savoir-faire basique est abordé (initiation, accordage, changement de corde). En effet, eHow s'adapte particulièrement bien aux leçons « step-by-step » : chaque astuce peut être décomposée en un ensemble de petites étapes simples à réaliser. Ainsi, les documents proposés traitent essentiellement de vie pratique. Ceux consacrés à la musique proposent des conseils généraux et des initiations<sup>29</sup>. Certains articles contiennent également des pointeurs vers d'autres types de ressources pour poursuivre l'initiation. Bien qu'extrêmement fourni et bien organisé, le site ne permet pas de vérifier le niveau d'expertise de ses contributeurs.

Pour aller plus loin dans l'apprentissage, des outils de e-Learning spécialisés ont vu le jour, souvent sponsorisés et présentés par des professionnels du domaine musical. La partie suivante donne quelques exemples de ces outils, en soulignant ceux particulièrement novateurs dans leur approche.

#### 3.1.5 Le e-Learning instrumental

Le e-Learning désigne l'apprentissage et l'enseignement au moyen d'outils électroniques : supports audio/vidéo divers (CD-ROM, DVD interactifs ou non), applications ou sites Web. Il se structure en différentes branches suivant le public ciblé (enfants/adulte, scolaire/formation continue/organisations et entreprises), ou le type d'activité pédagogique proposé (didacticiel, tutoriel, support de cours, évaluation, exercice, entraînement, session collaborative).

Dans ce qui suit, nous étudions plusieurs projets de e-Learning instrumental et leurs méthodes de gestion de savoir-faire. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux approches « offline », instaurant une approche descendante (top-bottom, de l'expert vers l'apprenant), puis aux approches communautaires « on-line », avec une approche ascendante (bottom-up, de l'apprenant vers l'expert, ou entre apprenants), et enfin nous nous intéressons au cas particulier des projets expérimentés au sein d'académies de musique.

##### 3.1.5.1 Approche descendante

L'augmentation du taux d'équipement en ordinateurs personnels avec lecteur CD-ROM, puis lecteur DVD a rendu les méthodes d'apprentissage sur ces supports très populaires jusque dans les années

---

<sup>29</sup> [http://www.ehow.com/how\\_5230053\\_learn-piano-beginners.html](http://www.ehow.com/how_5230053_learn-piano-beginners.html), visité le 25/02/2013.

2000. Les lecteurs DVD de salon ont également permis de se passer de l'ordinateur au profit du téléviseur, plus simple d'utilisation pour le grand public. Devant la multitude de produits existant sous cette forme, nous choisissons d'en présenter un qui nous semble particulièrement abouti, car issu d'un projet de recherche sur le thème du e-Learning instrumental : e-guitare. De plus, nos travaux s'inscrivent dans la continuité des problématiques soulevées par ce projet sur la gestion des savoir-faire.

Le projet e-guitare [51] a débuté à l'Université de La Réunion en 2003, sous la direction de Noël Conruyt et Olivier Sébastien, avec pour objectif la transmission des savoir-faire gestuels en guitare. Il a notamment donné naissance à un nouveau type de produit/service de qualité se présentant sous la forme d'un DVD interactif pour l'apprentissage de pièces traditionnelles réunionnaises à la guitare. L'apport pédagogique est assuré par deux professeurs de guitare du Conservatoire à Rayonnement Régional de La Réunion, David Hoarau et Patrick Sida. Une fois le DVD lancé, l'élève accède à un menu lui permettant de visionner les différentes pièces disponibles ou de régler certains paramètres. La pièce choisie est interprétée par le professeur. Plusieurs angles de vue sont proposés, mettant chacun un aspect de l'interprétation en avant (vue globale, vue de dessus, main droite, gauche). L'interprétation est synchronisée avec une barre de défilement suivant la partition de la pièce (Figure 19). Le tempo peut-être ralenti sans modifier la hauteur des notes grâce à un algorithme de time-stretching [67] de haute qualité. Des conseils pédagogiques sont liés à certains passages de la pièce présentant une difficulté technique particulière. Toutes ces fonctionnalités sont accessibles directement avec la télécommande du lecteur DVD ou par un clic de la souris sur ordinateur. Plusieurs entretiens ont permis d'améliorer le service en le rendant plus ergonomique et simple d'utilisation, afin que les apprenants puissent se concentrer sur l'activité principale (savoir jouer d'un instrument) en consacrant un minimum de temps à l'appropriation de l'outil (développement centré utilisateur).



Figure 19 : interface d'étude d'une pièce du DVD e-guitare

Le projet e-guitare a également permis d'implanter et d'expérimenter le concept de Plateau de Créativité (PC) [52]. Il s'agit d'un lieu, virtuel ou réel, où se rencontrent les acteurs du co-développement du produit/service. Le PC peut prendre une forme différente suivant les étapes du développement : salle de réunion, scène de théâtre, plateau multimédia. Il regroupe à la fois les concepteurs du service (informaticiens, chercheurs, infographistes, experts du domaine), et ses utilisateurs (primo-utilisateurs, adeptes des technologies et motivés par le thème traité). Le responsable du projet doit alors présenter un profil pluridisciplinaire pour faciliter la communication entre les concepteurs et les usagers, en leur permettant d'échanger ponctuellement leurs rôles respectifs pour améliorer le produit/service. Cette approche permet un développement itératif du service, où chaque prototype est testé et amélioré avec les usagers. La Figure 20 résume les



Figure 20 : développement itératif d'un service de e-Learning instrumental à l'Université de La Réunion

différents prototypes développés dans le cadre du projet e-guitare, et aboutissant au prototype de plateforme de gestion des Signes musicaux développé dans nos travaux de thèse (voir partie 6.2).

La stratégie retenue et développée par e-guitare consiste à recréer les conditions d'observation du professeur dans le contexte de la leçon de guitare traditionnelle : l'élève peut « tourner » autour du professeur pour se concentrer sur les points remarquables de l'interprétation, et lui demander de répéter tout passage qu'il n'aurait pas saisi. La partition joue alors un rôle secondaire dans l'apprentissage, qui repose essentiellement sur l'imitation des gestes du professeur. Cette méthode est particulièrement adaptée aux débutants, puisque ces derniers n'ont pas à lire la partition, du moins pour les morceaux simples. Cette approche a donc été adoptée par de nombreux autres produits commerciaux (« M. Les leçons de musique » avec Mathieu Chedid, « Intro to Classical Guitar » par Scott Tennant, « On the Music Path » regroupant des célébrités du monde de la guitare).

Naturellement, la démocratisation des smartphones et tablettes tactiles a augmenté la demande pour des applications de e-Learning instrumental sur ces supports. En effet, ces derniers présentent de nombreux avantages, tant sur le plan de l'expérience utilisateur que sur le plan économique. Pour le musicien, il s'agit principalement de pouvoir travailler son instrument n'importe où, en posant la tablette sur son pupitre par exemple, et de naviguer dans l'application avec des « gestes<sup>30</sup> » sans avoir à recourir à une télécommande ou à une souris. Le concepteur de l'application bénéficie quant à lui du modèle de marché des applications pour smartphones et tablettes. Par exemple, l'application peut être téléchargeable sur l'App Store d'Apple avec un petit nombre de leçons, l'utilisateur devant par la suite payer séparément tout contenu additionnel. L'application étant modulable et dynamique, les relations avec les professeurs de musique sont facilitées, ces derniers pouvant

<sup>30</sup> Mouvements des doigts (swipe, pan, pinch, tap) permettant de naviguer sur un terminal tactile.

intervenir aussi bien ponctuellement que sur toute la durée du projet. Sur ce point, on note de plus en plus l'intervention de « stars » plutôt que de professeurs de musique certifiés, les premiers rendant le produit plus attractif par leur renommée (exemple : iMusic School<sup>31</sup> pour la guitare).

Le jeu-vidéo est également une source d'inspiration importante pour les concepteurs d'applications de e-Learning instrumental. Il permet en effet de motiver les utilisateurs en leur faisant incarner des musiciens de renom (immersion) et en rendant l'apprentissage ludique (gameplay). Ainsi, plutôt que d'afficher une partition à un débutant qui ne saurait la lire, on représente directement les notes à presser sur l'instrument, et on évalue son taux de réussite grâce à un score, de la même manière que dans les jeux musicaux (Guitar Hero, Rock Band, SingStar). Bien sûr, les deux types d'affichage (instrument et partition) peuvent être utilisés conjointement (voir Figure 21). Parmi les applications avancées utilisant cette approche, on compte notamment l'outil d'apprentissage de GarageBand d'Apple, ainsi que Songs2See, développé depuis 2011 par une équipe du Fraunhofer Institute for Digital Media Technology. Elle demande toutefois un important travail de recherche et développement pour l'analyse de l'interprétation du joueur. En effet, pour ces applications, le musicien n'est pas contraint d'utiliser un instrument MIDI, qui enverrait chaque événement de note produite à la machine numériquement. Une étape d'analyse audio est donc nécessaire pour déterminer la justesse de l'interprétation du joueur en temps réel. Par ailleurs, l'application Songs2See est particulièrement innovante car elle propose également aux musiciens de créer leurs propres leçons à partir d'un fichier audio, grâce à un éditeur dédié. Ce

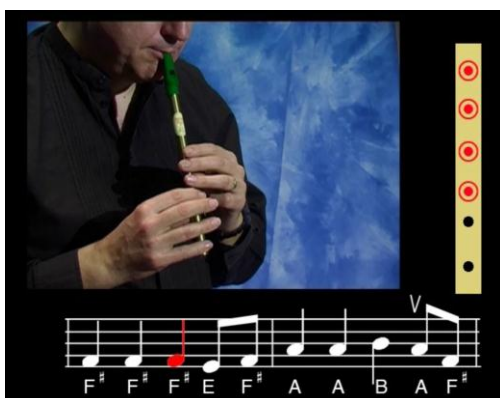


Figure 21 : extrait d'un DVD d'apprentissage du tin whistle. La vue schématique de la flûte à droite permet de repérer le doigté à utiliser pour chaque note.

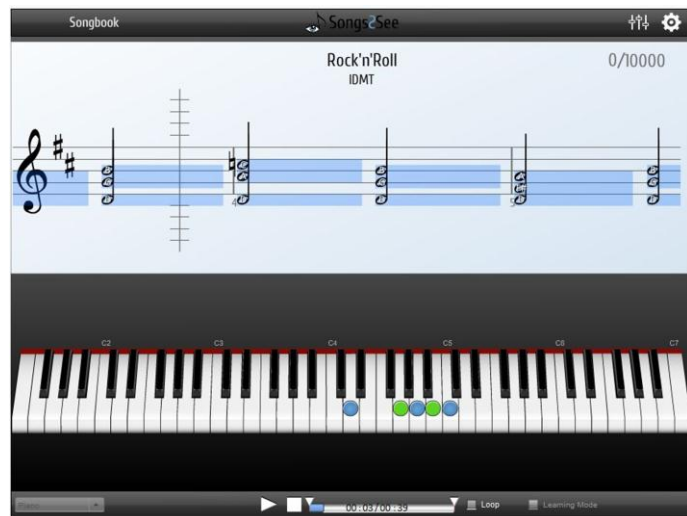


Figure 22: interface de l'application Songs2See. Les pastilles bleues sur le clavier permettent d'anticiper les prochaines touches à appuyer

dernier tente d'extraire la ligne mélodique afin de générer la partition correspondante. L'utilisateur peut corriger toute erreur avant d'enregistrer le fichier MIDI qui sera utilisé dans l'interface d'apprentissage. Ce passage de l'audio au MIDI est indispensable pour générer la partition défilante et l'allumage des touches sur l'instrument virtuel (voir Figure 22). Toutefois, Songs2See présente certaines limites, notamment pour les musiciens non débutants. En effet, l'extraction de la mélodie et la génération de la partition peuvent être délicates suivant la complexité de la pièce choisie et la qualité de l'enregistrement audio en entrée de l'éditeur (pièces orchestrales, mélodies avec contrechants, tempo non régulier). L'utilisateur a

<sup>31</sup> <http://www.imusic-school.com/>, visité le 25/02/2013.

également la possibilité de générer la leçon directement à partir d'un fichier MusicXML. Il semble toutefois que la polyphonie (deux mains au piano) ne soit pas encore prise en compte. Malgré ces limites, l'approche de Songs2See est particulièrement intéressante et innovante pour le musicien, puisque ce dernier peut théoriquement travailler n'importe quelle pièce, lorsque les autres applications d'apprentissage proposent une liste bien arrêtée.

Le jeu-vidéo a également inspiré l'usage de la 3D dans l'apprentissage. Cette technologie présente l'avantage de pouvoir observer l'interprétation du professeur sous n'importe quel angle, comme dans un cours en présentiel et même plus. En effet, en 3D, il est également possible d'obtenir des points de vue impossibles à avoir dans la réalité, comme par exemple voir à travers les yeux du professeur. C'est un angle très utile car totalement calqué sur ce que voit l'élève lorsqu'il tient l'instrument. Il n'a donc pas à faire de symétrie pour reproduire les mouvements de l'expert [51].



Figure 23 : interprétation iPerform3D réalisée par motion Capture

La plate-forme iPerform3D (Figure 23) propose ainsi des vidéos de cours de guitare en 3D, réalisés grâce à des techniques de motion capture. Cependant, cette technique requiert un équipement assez lourd pour la captation des interprétations, notamment le professeur doit porter des gants munis de capteurs pendant son interprétation, afin que chacun de ses gestes soit reporté sur le modèle 3D. Ces gants peuvent entraver certaines interprétations techniquement complexes. Le projet e-guitare a également expérimenté sur la 3D en proposant un guitariste virtuel interprétant automatiquement une partition MusicXML en entrée. Le projet Virtual Piano Tutor [35] recourt également à la 3D pour animer une main de pianiste sur un clavier à partir d'un fichier MIDI et d'un algorithme de détermination automatique des doigtés (voir partie 2.3.3). Cette approche est particulièrement utile, car du point de vue de l'apprenant, savoir quelle touche appuyer ou quelle corde pincer n'est pas suffisant : il faut également savoir avec quel doigt le faire, de façon à optimiser le jeu global et prendre dès le début de bonnes habitudes sur les positions de mains.

De fait, la distinction entre jeu musical et application d'apprentissage d'un instrument est de plus en plus ténue. A titre d'exemple, les dernières versions du jeu vidéo Guitar Hero permettent de connecter une véritable batterie électronique à la console pour jouer les pièces proposées sur son instrument. Dans le jeu Rocksmith sorti en 2012 (Figure 24), le joueur peut connecter une véritable guitare électrique pour interpréter les pièces proposées. Le jeu applique automatiquement les effets adaptés à la pièce choisie. Le joueur ne fait donc plus semblant : en suivant les instructions du jeu, il peut réellement produire et travailler une interprétation. Cependant, lire les indications à l'écran et les appliquer à la guitare en temps réel reste une tâche difficile pour un débutant. Rocksmith gère également l'augmentation progressive de la difficulté de la « partition » (défilement des rectangles de couleurs). Un joueur débutant peut ainsi n'interpréter que 5% de la partition totale de la pièce, jusqu'à ce qu'il la maîtrise et se sente prêt à enrichir son interprétation.



Figure 24 : Capture d'écran du jeu Rocksmith.

### 3.1.5.2 Approche ascendante/communautaire

Diverses plates-formes Web sont consacrées à l'apprentissage de la musique. La plupart, comme thesession.org ou humeur-piano.com, consistent en des forums de discussion pour échanger des astuces sur certaines pièces et techniques instrumentales. Elles peuvent être associées aux solutions off-line vues ci-dessus pour établir une communication de l'élève au professeur. Ainsi le projet e-guitare a abouti au développement de la plateforme en ligne FIGS<sup>32</sup> (Flash Interactive Guitar Saloon) en complément du service d'apprentissage sur DVD. Plus qu'un simple forum, FIGS propose un système de gloses localisées sur l'interprétation de référence (celle du professeur). L'apprenti musicien peut enregistrer sa question et ses extraits d'interprétation directement avec sa webcam et depuis son navigateur Web. Le professeur pourra lui répondre de la même façon, où qu'il se situe (Figure 25).

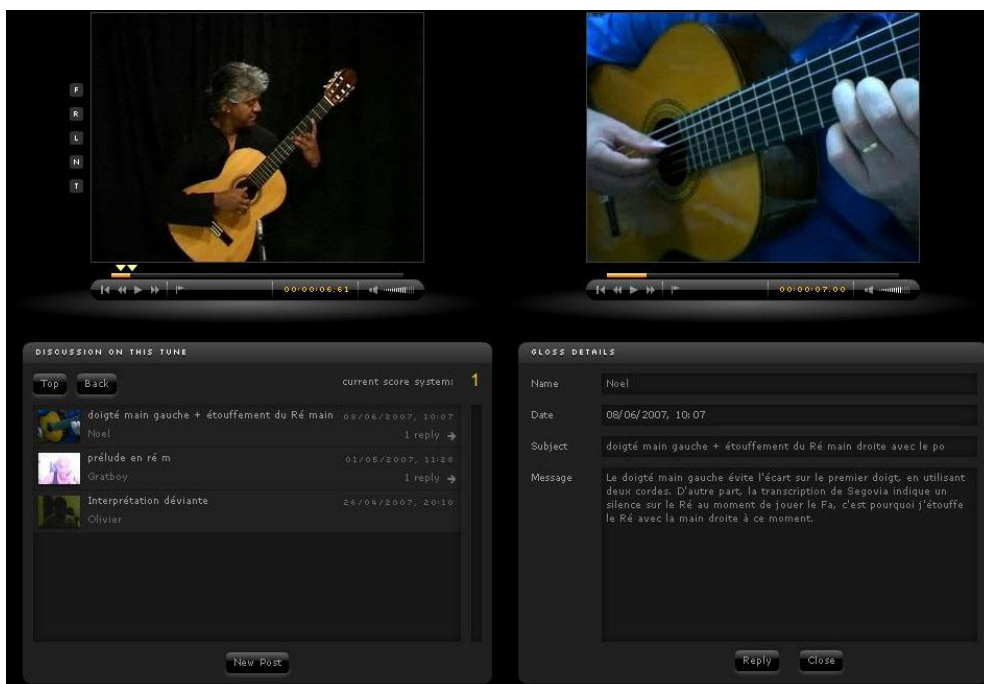


Figure 25 : interface de la plateforme FIGS

Cependant, le support de la partition peut s'avérer essentiel sur certaines pièces. Un exemple de discussion technique est donné sur la Figure 26. Il est difficile de mettre au point une solution technique sans un référentiel commun de la pièce, qu'il s'agisse de la partition ou de l'interprétation. Pour ce faire, il serait intéressant de disposer d'un outil d'annotation de partitions, pouvant concilier la représentation logique de la pièce (abstraite, support mnémorique), l'explication textuelle, et une vidéo montrant le doigté correspondant (concret, sur l'instant). Des services d'annotation de partitions électroniques sont étudiés dans la partie 3.2.4.

« J'aime beaucoup le ragtime, et j'ai voulu apprendre "The Entertainer" de Scott Joplin. Les 3 premières mesures sont strictement identiques, avec un décalage d'une octave vers la gauche à chaque fois : Ré, Mi, Do La, Si, Sol. Sur ma partition, le doigté préconisé est le même pour les 3, c'est à dire en décalant la main au début de la mesure : 453131. J'ai trouvé bien plus facile de jouer la première mesure 451513 et commencer la suivante par le 1, parce que je peux attraper le Ré sans avoir à lever la main ni regarder mes doigts »

Figure 26 : Exemple de discussion sur un doigté sur le forum humeur-piano.com.

<sup>32</sup> <http://e-guitare.univ-reunion.fr/figs/figs.php>, visité le 25/02/2013.



De plus en plus de professeurs proposent également des cours par visioconférence, avec par exemple les logiciels Skype ou Adobe Connect. Bien que ces derniers permettent une communication directe avec le professeur, la qualité de la connexion à internet peut grandement influencer le déroulement du cours. En effet, l'utilisation d'une webcam en temps réel requiert une bande passante très importante, au risque de subir des coupures et désynchronisations durant le cours.

Bien que toujours en cours de développement au moment de la rédaction de cette thèse, le projet PRAISE (Practice and peRformance Analysis Inspiring Social Education) s'annonce très prometteur. Issu d'un partenariat entre divers établissements publics (Université Goldsmiths de Londres, Vrije Universiteit Brussel, Spanish National Research Council) et privés (SONY CSL), ce dernier propose de construire un environnement social pour l'apprentissage de la musique, basé sur l'échange de commentaires gratifiants (« praise » en anglais) pour motiver l'apprenant. Ce dernier pourra être suivi par un agent d'apprentissage (learning agent) adapté à ses besoins. Les nouveautés apportées par le projet européen seront alors tant pédagogiques que technologiques.

Ce projet souligne les dernières tendances en matière de e-Learning : le suivi personnalisé et l'interaction sociale (commentaires élogieux, compétition, performance de groupe) comme moteur de l'effort à fournir pour s'améliorer. Dans un esprit plus académique, il existe également des outils spécialisés pour les écoles de musique. Nous en énumérons quelques-uns dans la partie suivante.

#### 3.1.5.3 *Les solutions pour les écoles de musique*

Plusieurs projets de e-Learning instrumental ont été conçus ou étendu pour un usage dans le cadre de l'école de musique. Par rapport à l'auto-formation, ces projets proposent également des outils pour assister le professeur dans son travail, qu'il s'agisse du cours en présentiel ou de la préparation d'exercices.

Au niveau européen, le projet VEMUS<sup>33</sup> (Virtual European Music School) [18], débuté en 2005, a mis en place des outils d'aide à l'apprentissage musical avancés, aussi bien dans le cadre du travail personnel que celui du cours en présentiel. Il dispose par exemple d'un module de communication entre élève et professeur reposant sur la technologie pair-à-pair, mais aussi d'un module d'écoute automatique de l'élève (cependant limité à la hauteur et à la durée des notes) ainsi que d'outils d'annotations de partitions numériques [11]. Ce module d'annotation est étudié plus en détail dans la partie 3.2.1 consacrée à ce thème. Cependant l'application ne semble utilisée que dans les centres de musique européens partenaires du projet (8 institutions dans 6 pays). Enfin, le projet s'étant terminé en 2008, il est difficile de quantifier l'usage qui en est fait actuellement.

L'éditeur de partitions en ligne Noteflight (voir partie 3.1.2) a également noué des partenariats avec des écoles de musique (dont le prestigieux Berklee College of Music) pour proposer son service spécialisé NoteFlight Campus. L'Environnement Numérique de Travail (ENT) de l'école est alors adapté aux activités musicales grâce à l'intégration de partitions animées dans les pages de cours en ligne. En particulier, NoteFlight s'interface aisément avec le LMS <sup>34</sup> Moodle, déjà utilisé par de nombreux établissements. Il permet notamment à plusieurs élèves d'une classe de rendre leurs exercices de composition réalisés à l'aide de l'éditeur en ligne. Le professeur prépare tout d'abord une partition de type « activity template » (modèle de partition), que chaque élève pourra instancier

---

<sup>33</sup> <http://www.vemus.org/>, visité le 25/02/2013.

<sup>34</sup> Learning Management System : système de gestion de l'apprentissage

et compléter pour réaliser son exercice. Une fois l'exercice rendu, le professeur peut parcourir les partitions réalisées par chaque étudiant et y apposer des commentaires textuels. Notamment, ce dernier a accès à chaque version de la partition, dans le cas où il la modifierait. Enfin, le professeur de musique peut donner une note au travail réalisé, comme pour n'importe quelle matière scolaire. Il est également possible d'intégrer des partitions animées directement dans les cours (Figure 28). Techniquement, il s'agit d'insérer un objet Flash (format swf) dans la page, permettant d'afficher et de lire la partition en MIDI avec une barre de défilement. La partition étant la même que celle sur le serveur de Noteflight, toute modification apportée dans l'éditeur sera automatiquement reportée sur la partition intégrée au cours.



Figure 28 : intégration d'une partition NoteFlight à Moodle.

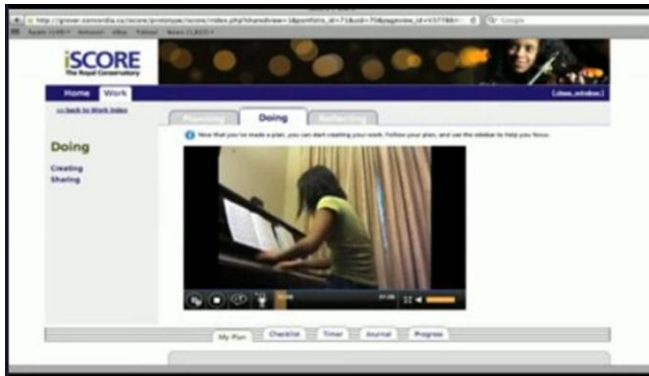


Figure 27 : enregistrement d'une interprétation sur iScore

iSCORE<sup>35</sup> est un outil développé au Royal Conservatory of Music, au Canada. Son principe est d'amener l'élève musicien à s'autoréguler en enregistrant ses interprétations et en se fixant des objectifs. Les différentes étapes de l'apprentissage musical prônées par iSCORE sont la planification, la réalisation et la réflexion. Pour ce faire, la plate-forme Web propose à chaque élève un portfolio personnalisé. Ce dernier peut enregistrer ses interprétations (Figure 27) et faire un retour sur ce qu'il

estime avoir réussi ou manqué. Les autres élèves et professeurs peuvent également faire des remarques qui seront rattachées à l'interprétation, grâce à un système d'annotation de vidéos et d'extraits audio. En un sens, iScore se pose donc comme un réseau social consacré à l'apprentissage musical. Ce type d'approche semble particulièrement destiné aux jeunes musiciens adeptes des réseaux sociaux. De plus, la possibilité de comparer ses interprétations entre élèves est un moteur d'apprentissage essentiel dans le domaine musical. L'interface d'iSCORE permet entre autres la gestion de fichiers, d'objectifs et la mise en place d'un calendrier de travail. Là encore, le professeur est l'administrateur principal des comptes de ses élèves, et peut leur proposer des objectifs à atteindre et des activités. Pour lui permettre de se familiariser rapidement avec les outils proposés, des workshops et webinars<sup>36</sup> payants lui sont proposés.

Nous avons donc vu deux approches différentes mais complémentaires en matière de services d'e-Learning pour les écoles de musique. Noteflight Campus semble résolument tourné vers l'apprentissage théorique de la musique, avec la réalisation de partitions en ligne, tandis qu'iSCORE se concentre sur la comparaison d'interprétations, et donc plus sur la pratique instrumentale. Ces

<sup>35</sup> <http://rcmusic.ca/iscore-home-page>, visité le 25/02/2013.

<sup>36</sup> Séminaires sur le Web

deux approches gagneraient bien sûr à être fusionnées, pour permettre à l'élève en musique de travailler conjointement ces deux compétences dans un environnement collaboratif.

Concernant les contenus pédagogiques en ligne, La Cité de La Musique, créée en 1995 avec le soutien du Ministère de la Culture, propose des guides d'écoutes pour les établissements, moyennant un abonnement à l'année. Ces derniers ont ainsi accès à des enregistrements de concerts, notamment ceux de la prestigieuse salle Pleyel qui est une filiale de la Cité de La Musique, des masters class, des parcours de découvertes d'œuvres ou de compositeurs en ligne.

D'autres outils sont utilisés par les professeurs de musique, bien que n'étant pas directement consacrés à l'apprentissage de l'instrument, mais plus à la réalisation d'études musicologiques assistées par ordinateur. Nous en étudions quelques-uns dans ce qui suit, en soulignant leurs apports sur le plan pédagogique.

#### 3.1.6 Outils pour la musicologie et la composition assistée par ordinateur

Les séquenceurs sont les applications les plus utilisées par les compositeurs. Ils leur permettent de réaliser des enregistrements multipistes de leurs créations, de manipuler des échantillons de son, d'y appliquer des effets, et de générer des partitions dans le cas d'enregistrements MIDI. Il existe une multitude de séquenceurs, mais les plus connus restent Cubase, le logiciel de Steinberg, et Pro Tools, celui d'Avid Technology (auparavant DigiDesign). A ce titre, ils sont largement utilisés dans les cours d'informatique musicale (MAO). Les professeurs de solfège peuvent également s'en servir pour saisir leurs partitions à partir d'un instrument MIDI. Associé à une carte son et des microphones professionnels, le séquenceur permet au musicien de réaliser des enregistrements de haute qualité de ses interprétations. Cette fonctionnalité est particulièrement intéressante pour un apprenant, car elle lui permet de prendre du recul sur son jeu, et de diffuser ses propres interprétations sur le Web. Le séquenceur peut également se révéler être un formidable terrain de jeu et d'expérimentation sur les timbres lorsqu'il est utilisé avec des instruments virtuels et des banques de son, permettant de passer instantanément de la flûte au piano ou à la guitare, mais aussi à des instruments plus rares et difficiles à se procurer tels que le shakuachi, le bouzouki, la vielle, le sitar ou l'oud.

Les logiciels tels qu'OpenMusic et MaxMSP sont des environnements de programmation graphique pour la création sonore. Ils sont également utilisés pour la composition, mais se distinguent des séquenceurs par l'approche graphique proposée. Différentes icônes sont assemblées et connectées, représentant des fonctions et des structures (transpositions, inversion d'intervalle, construction de gammes, de marches harmoniques, liste aléatoire de notes et d'accords) appliquées à un extrait sonore en entrée. A ce titre, OpenMusic [3] est surtout utilisé pour la composition d'œuvres contemporaines fondés sur des travaux en musicologie, ou pour des performances scéniques reposant sur de la synthèse sonore en temps réel. Il peut implémenter des algorithmes, des boucles, des graphes et des séquences pour générer une sortie audio. Bien que principalement utilisés par des musiciens confirmés, ces programmes de Composition Assistée par Ordinateur (CAO) peuvent constituer une intéressante entrée en matière pour la découverte de la musique contemporaine en lien avec l'informatique et les mathématiques.

iAnalyse<sup>37</sup> [14] est une application d'analyse d'œuvres musicales développée par Pierre Couprie, chercheur au laboratoire MINT (Paris IV) et à l'IUFM de Paris. Elle propose notamment un éditeur pour la création de vidéos de partitions animées<sup>38</sup>, grâce à un outil de synchronisation entre un fichier audio et une barre de défilement sur une image de fond représentant la musique. D'abord à l'attention des musicologues, l'environnement d'iAnalyse propose de nombreux outils d'annotations spécialisés dans l'analyse harmonique de pièces. La Figure 29 présente un exemple de partition annotée générée avec iAnalyse. Pendant l'écoute du morceau, l'utilisateur visualise la partition qui défile, faisant apparaître différentes explications sous la forme de textes, de symboles, d'images et de dessins, au fur et à mesure du déroulement de la pièce. iAnalyse permet ainsi d'afficher les différents thèmes et développements d'une fugue ou bien sa structure harmonique. Différents modes de visualisations permettent de mieux cerner la pièce selon le niveau de granularité souhaité (représentation synthétique des différentes parties).



Figure 29 : Extrait d'une partition animée réalisée avec iAnalyse (Pierre Couprie 2009)

Dans le même esprit, mais plus interactif, INScore est un environnement pour la création de partitions interactives et augmentées (Interactive Augmented Scores) [17]. Il s'agit de partitions comprenant des graphes, images, textes ou extraits audio reliés aux objets symboliques la composant (notes, mesures, etc.) et pouvant réagir en temps réel aux impulsions du musicien grâce à un langage de script dédié. Chaque élément graphique comporte une position et une dimension temporelle, directement liées aux notes de la partition (Figure 30). Par exemple, une barre de lecture de la partition pourra changer d'épaisseur en fonction de la durée de la note lue. Ces fonctionnalités

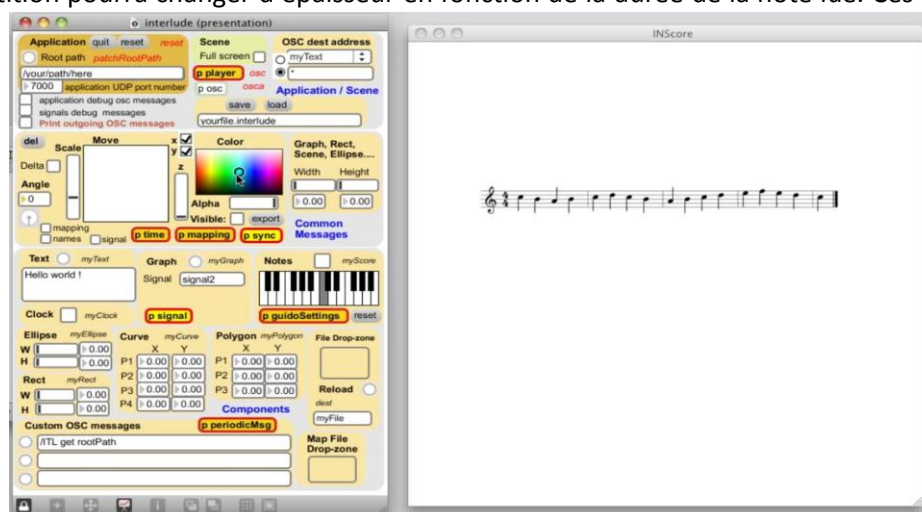


Figure 30 : Interface de création de partitions augmentées et interactives de INScore.

<sup>37</sup> [http://logiciels.pierrecouprie.fr/?page\\_id=25](http://logiciels.pierrecouprie.fr/?page_id=25), visité le 25/02/2013.

<sup>38</sup> <http://www.youtube.com/watch?v=an5qia4nVxo>, visité le 25/02/2013.

reposent sur le protocole OSC (Open Sound Control) permettant d'envoyer des messages afin de contrôler les éléments sur la scène. Cependant, l'interaction avec l'utilisateur semble se limiter pour le moment à des clics de souris.

Bien que les applications vues ci-dessus restent relativement peu utilisées dans le domaine de l'apprentissage instrumental, elles mettent en œuvre des techniques d'analyses poussées qui pourraient assister un élève dans l'apprentissage d'une pièce. Par exemple, l'analyse harmonique, bien que souvent éludée par l'élève, car considérée comme trop théorique, est souvent citée par les professeurs d'instrument comme importante pour la compréhension de la structure de l'œuvre et donc facilitant son assimilation. De ce fait, l'analyse d'œuvres constitue un composant essentiel de notre base de Signes musicaux.

#### 3.1.7 Synthèse et discussion sur le e-Learning instrumental

Deux philosophies semblent coexister dans le e-Learning instrumental. Dans la première, l'ordinateur n'est qu'un outil de traitement de l'information : il permet de collecter et synchroniser les contenus multimédia, et affiche une interface permettant de naviguer dans ces contenus aisément. Cependant, la machine n'interprète aucunement le sens des contenus diffusés ou enregistrés. Cette activité, qui est le cœur de l'apprentissage, revient aux humains uniquement. La machine n'est qu'un support intermédiaire facilitant la communication (synchrone ou asynchrone) entre le professeur et l'apprenant, dans un environnement adapté. Dans la deuxième approche, plus rare et délicate à mettre en œuvre, l'ordinateur intervient également sur le plan pédagogique, avec plus ou moins d'efficacité suivant le niveau de l'apprenant. L'application peut par exemple analyser la correspondance de l'interprétation du joueur (humaine) avec celle d'un fichier MIDI extrait de la partition (machine). Bien que permettant à l'apprenant de pratiquer l'instrument en totale autonomie, cette approche comporte des biais, du fait qu'une bonne interprétation ne se mesure pas uniquement sur l'aptitude à respecter scrupuleusement le tempo et la justesse des notes, surtout pour les niveaux avancés. En effet, sur certaines pièces, il peut être demandé de légèrement ralentir certaines parties, de réaliser certains effets qui ne sont pas indiqués sur la partition. Ces nuances peuvent difficilement être perçues et interprétées par la machine, quand bien même des travaux existent pour tenter de les quantifier et de les répercuter sur des interprétations MIDI générées automatiquement [27]. En effet, chaque musicien les implémentera différemment suivant son « feeling », sa technique, son expérience musicale. Deux interprétations, même réalisées par une unique personne, seront toujours très différentes, ce qui fait la richesse et l'intérêt du jeu musical et rend le professeur de musique indispensable. La mesure de la distance entre une interprétation humaine et une exécution computationnelle d'une pièce constitue une piste de recherche intéressante, tant pour le domaine de l'ECM que pour les domaines sociologiques et artistiques.

Finalement, les deux approches peuvent être utilisées à différents stades de l'apprentissage. Plus l'élève s'améliore, et moins la machine pourra juger de la qualité de ses interprétations. En revanche, cette dernière pourra toujours pointer des ressources pour l'aider à avancer, sur la base de difficultés techniques clairement identifiées. Cette identification des difficultés d'une pièce est traitée dans notre proposition de Base de Signes. Bien sûr, l'expertise du professeur prévaut toujours. Pour ce faire, ce dernier doit être en mesure de valider ou rectifier les suggestions effectuées par la machine. Cependant, devant la recrudescence de données utilisables dans l'apprentissage musical, la création d'un module d'assistance de l'enseignant dans le cadre du e-Learning instrumental semble judicieuse. Cet outil permettrait au professeur de recentrer son enseignement sur l'essence de

l'interprétation : l'expression musicale. Bien que délicat, le passage à la deuxième approche semble bien entamé et s'inscrit dans la suite logique des derniers développements informatiques, notamment en Intelligence Artificielle. En particulier, l'équilibre entre les deux approches « humaine » et « automate » peut être assurée par une pratique courante dans le domaine du partage de savoir-faire pratiques : l'annotation.

### 3.2 L'annotation en musique

Annoter un document consiste communément à y ajouter des tracés succincts (mots-clés, symboles, dessins) afin de l'expliquer ou de le commenter. L'annotation constitue alors un support pour la mémoire, rappelant à son auteur l'idée ou la réflexion menée au moment où il l'a apposée. La codification utilisée peut être propre à l'annotateur ou semi-formalisée (symboles et syntaxe propres à un domaine donné). Si le document est partagé entre plusieurs personnes, l'annotation peut également être un outil de communication pour transmettre des commentaires et remarques au sein du groupe. Il est alors important de convenir de la signification des symboles et abréviations utilisés au préalable. La Digital Library Federation (DLF, association américaine de bibliothécaires) a défini trois types d'annotation pour les documents numériques : administrative (titre, auteur, création), structurelle (portant sur la représentation logique du document) ou descriptive (portant sur le contenu du document). Dans le contexte du partage d'interprétations, nous nous intéresserons essentiellement aux annotations structurelles et descriptives.

#### 3.2.1 L'annotation de partitions musicales

Figure 31 : Exemple de partition annotée par un professeur de piano

Bien que rarement entièrement formalisée, l'annotation de documents reste une pratique très répandue, notamment dans un cadre pédagogique : commentaire de texte, d'une recette, d'une partition. En musique, annoter sa partition pendant une leçon permet de se remémorer les gestes, intentions, doigtés ou passages difficiles étudiés avec le professeur afin de les mettre en œuvre une fois seul (Figure 31). Comme le précisent Chapuis et al. [11], ces annotations possèdent ainsi une double dimension temporelle, la première s'exprimant dans le temps de la partition, la seconde en tant que témoignage des lectures passées. Le recours à cette pratique dépend bien sûr de l'usage ou non d'un support durant la leçon (certaines pièces folkloriques ne se transmettant que par voie orale). De plus certains professeurs laissent la liberté à l'étudiant d'apposer ou non des notes sur leur

partition, quand d'autres le font eux-mêmes systématiquement. La sociologue Megan Winget a réalisé en 2008 une étude sur cette pratique dans le cadre de répétitions d'orchestres [69]. Cette dernière souligne l'importance du lien entre l'interprète et sa partition en recueillant près de 25000 annotations créées par des musiciens de différents niveaux et instruments. Celle-ci distingue trois types d'annotation dans la pratique musicale, liés à la proximité avec la technique instrumentale : « technical » (exemple du doigté : peu d'effet sur la sonorité), « technical-conceptual » (exemple du crescendo, accelerando : effet direct sur la sonorité), « conceptual » (musicalité, émotion : pas d'indication technique). Parmi les résultats de cette recherche, on note également que :

- les orchestres font bien moins d'annotations sur le phrasé que les groupes plus restreints,
- les symboles sont plus utilisés que les nombres qui sont eux-mêmes plus utilisés que les textes,
- la plupart des annotations sont des symboles et concernent des problèmes techniques,
- les professionnels font beaucoup plus d'annotations que les amateurs,
- il n'y a pas de "cours d'annotation" : les musiciens apprennent en regardant leurs professeurs annoter leurs partitions et reproduisent les mêmes signes. Ils ont tous plus ou moins les mêmes symboles pour annoter : si un musicien récupère une partition annotée par un autre, il peut comprendre l'essentiel, alors qu'ils n'ont pas eu les mêmes cours et qu'ils n'ont jamais travaillé ensemble. Il y a une sorte de consensus (sans doute propre à la pratique de l'instrument),
- interviews: les musiciens sont unanimes sur le fait qu'ils aimeraient consulter une partition annotée par une peinture du domaine (pour voir sa conception du morceau, essayer cette autre approche, effectuer des comparaisons, etc.).

A ce titre, l'auteur encourage la création d'un environnement numérique d'annotation dédié à la pratique musicale et donne des recommandations pour la réalisation d'un tel outil (nommé Augmented Annotation Framework AAF) :

- considérer la dualité interprétation/activité intellectuelle,
- concevoir un outil dynamique, interactif et non figé,
- disposer d'une grande variété de symboles et pas seulement ceux propres à une partition (exemple : point d'exclamation, étoiles, triangles). Penser aussi aux chiffres et aux textes,
- distinguer facilement les annotations du contenu original de la partition (notation musicale),
- permettre de poser des marqueurs, délimiter des parties, etc.,
- disposer d'un niveau de granularité très fin (à la note près),
- permettre le partage des annotations entre musiciens,
- faire des "push" (distributions) de l'ensemble des annotations à tout un groupe (exemple : orchestre comprenant 50 violons).

Nous proposons dans la partie 5.3 un modèle répondant à ces critères et permettant le peuplement d'une base de Signes Musicaux sous formes d'annotations sémiotiques décrivant des savoir-faire. Un prototype pour tablette tactile a été développé et est décrit dans la partie 6.2.

L'annotation a également un rôle important dans les travaux de musicologie. Plus formalisée, elle consiste généralement à identifier la structure d'une œuvre. On définit alors des labels (A, B, C, C', etc.) afin d'identifier les parties distinctes et leurs occurrences dans la partition. Chaque partie pourra ensuite être explicitement nommée : Introduction, Exposition, Développement,

Récapitulation, et Coda (forme de la Sonate). Des logiciels comme iAnalyse permettent de créer ces annotations structurelles (voir partie 3.1.6). Les interprètes peuvent également utiliser ce type d'annotation pour mieux comprendre la structure de la pièce à jouer, notamment si celle-ci est complexe et mélange plusieurs voix (exemple : Fugues de Bach). Le projet SALAMI [63] (Structural Analysis of Large Amounts of Music Information), débuté en 2009, a pour objectif de collecter des annotations structurelles sur un maximum de pièces à des fins d'analyse musicale de grande échelle (plus de 1400 enregistrements annotés à ce jour). Des réflexions sont menées par l'IRISA (Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires) sur les concepts, méthodes et conventions à adopter sur ce type d'annotation [9]. En effet, comme précisé dans la partie 2.3.3, les similarités entre deux extraits musicaux peuvent se situer sur plusieurs niveaux d'information (rythmique, harmonique, mélodique, dynamique, etc.). Un langage de représentation symbolique des structures musicales est donc proposé pour parer à ces difficultés.

Dans ce qui suit, nous définissons l'annotation dans un environnement informatique, puis présentons divers outils d'annotation de partitions numériques.

### 3.2.2 L'annotation en informatique

En informatique, le terme « annotation » peut avoir différents sens suivant l'objectif à réaliser. Il peut désigner l'activité traditionnelle d'annotation d'un document, comme à l'écrit, menée par un humain rajoutant un commentaire portant sur un document existant : cette pratique n'induit pas nécessairement la création de métadonnées sur le document, et n'est donc pas directement exploitable par la machine. Nous nommons cette pratique *l'annotation*, et les contenus qui en découlent *des annotations*. Ces annotations sont créées par des humains, à destination d'autres humains. Elles comportent au minimum un contenu (texte, vidéo, image, symboles, etc.) et un lien vers le document annoté (position de l'annotation dans le temps et/ou l'espace). Elles peuvent également comporter un titre, des mots-clés et autres métadonnées (identifiant, date, nom de l'auteur). Le sens du contenu peut être de diverses natures : commentaire/avis, explication, question, conseil, etc. (Figure 32). Une annotation peut à son tour être l'objet d'une annotation (exemple : réponse à une question ou réaction à un commentaire).

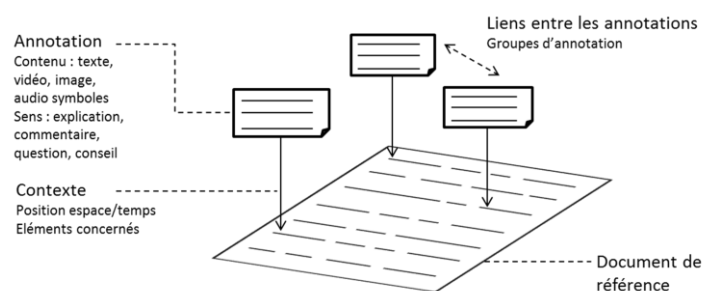


Figure 32 : Composants d'une annotation numérique.

Certains informaticiens nomment également « annotation » l'activité consistant à créer des étiquettes formalisées ou semi-formalisées sur des contenus à destination des machines. L'objectif de ces annotations est principalement le référencement, la classification et la recherche de ressources par thème, et dans une moindre mesure la génération de connaissances par des mécanismes d'inférence, comme par exemple la découverte de liens entre ces ressources. Afin d'éviter toute confusion avec l'annotation traditionnelle (qui tient plus du commentaire), nous nommons l'activité consistant à créer de tels étiquettes *annotation sémantique*, qu'elles soient saisies par un humain ou générées automatiquement. On distingue alors deux types d'annotations sémantiques : la saisie de mots-clés (ou tagging) et la description de ressources à l'aide d'ontologies (peuplement d'ontologies). Dans certains cas, l'un et l'autre peuvent être confondus (par exemple,



un système de tagging ne proposant que des mots-clés issus d'une ontologie). Dans le tagging, les étiquettes consistent souvent en un simple mot issu d'un vocabulaire prédéfini (taxonomie) ou non, que l'on appellera *tag* (ou *mot-clé*). Un tag est souvent reconnaissable au symbole dièse (#) placé devant lui. La plupart des applications Web collaborative actuelles utilisent ce système pour référencer les contenus créés par leurs utilisateurs. Les annotations structurales décrites précédemment peuvent être un cas particulier d'annotation sémantique dans un contexte de tagging d'extraits musicaux : la formalisation du langage utilisé (symboles prédéfinis) permet leur lecture par des algorithmes de classification par genre (voir partie 3.2.5).

Annotations et annotations sémantiques peuvent être utilisées conjointement. Ainsi, un utilisateur créant un commentaire sur une zone d'une image pourra y ajouter des tags pour faciliter la navigation dans l'ensemble des commentaires de l'application. De même, un tag appliqué à un extrait d'une partition peut faire l'objet de commentaires de la part d'autres annotateurs (validation, discussion, autres possibilités).

Dans la partie 4.2.1, nous relierons la notion d'annotation à celle de Signe après avoir défini ce dernier. Pour ce faire, on propose une modélisation sémantique d'annotations sémiotiques.

#### 3.2.3 Ontologies pour l'annotation

Diverses initiatives ont vues le jour afin de représenter sémantiquement des annotations. Une description sémantique d'une ressource étant déjà qualifiée d'« annotation sémantique» de cette ressource, on peut légitimement se demander pourquoi introduire un concept d'annotation. On peut y répondre qu'une annotation n'est pas nécessairement « sémantique » (il peut s'agir d'un commentaire ou d'une schématisation d'un document), mais aussi qu'elle est le fait d'un individu, qui n'est pas nécessairement le créateur de la ressource annotée. Le concept d'annotation interposé entre le tag et la ressource taggée permet de prendre en compte ces considérations.

Dans ce contexte, l'ontologie la plus récente et la plus documentée au moment de la rédaction de ce mémoire est l'Open Annotation Data Model & Ontology<sup>39</sup> (OA). Cette ontologie est le résultat de la fusion de différentes initiatives de modélisation sémantique d'annotations au sein du W3C Open Annotation Community Group. La Figure 33 présente un cas d'utilisation basique de cette ontologie avec ses concepts et relations élémentaires. Dans ce modèle, une annotation est une ressource identifiée par un URI (Uniform Resource Identifier), de type *oa:Annotation*. La relation *oa:hasTarget* permet d'identifier la ressource annotée (ici, une image). La relation *oa:hasBody* permet de préciser le corps de l'annotation (ici, un texte). Les relations *oa:annotatedAt* et *oa:annotatedBy* permettent d'indiquer respectivement la date de création de l'annotation et son auteur.

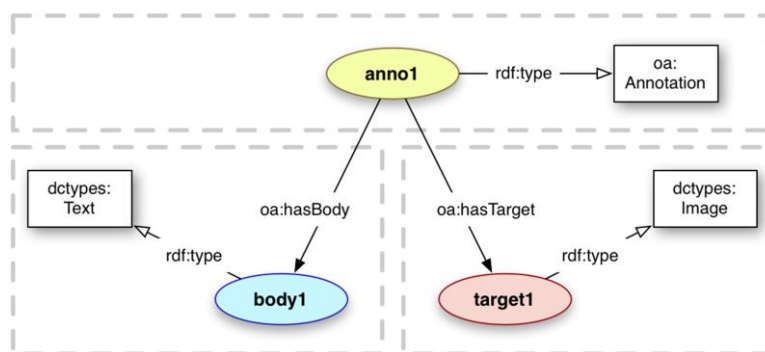


Figure 33 : Exemple d'utilisation de l'Open Annotation Ontology. (source : openannotation.org).

---

La particularité de l'OA est de ne présumer ni du contenu de l'annotation ni de sa cible. Ces derniers peuvent être multiples (exemple : une même annotation ciblant différentes ressources). La documentation recommande de se fonder sur les types de contenu définis par le modèle Dublin Core (*dctypes*). Pour autant, le type tag (*oa:Tag*, parent de *oa:SemanticTag*) est défini comme un type particulier d'annotation. L'OA permet également d'annoter des parties d'un document à l'aide de sélecteurs (*oa:FragmentSelector*).

Si l'OA semble régulièrement utilisée dans le domaine de la biologie et de la recherche scientifique en général (exemple : application Utopia<sup>40</sup>, framework YUMA<sup>41</sup>), il reste difficile de quantifier son usage dans les applications d'annotation pour le grand public (exemple : fonctionnalités de commentaire des CMS, lecteurs de PDF, Google Docs, etc.). L'explication est sans doute que l'OA n'a d'intérêt que si elle est utilisée avec une ontologie de domaine appropriée, ce dont ne sont pas munies les applications citées précédemment. De plus, l'OA va au-delà du simple commentaire personnel, puisqu'il s'agit avant tout de créer de la connaissance via l'annotation collaborative de documents. Elle présente donc un intérêt certain dans notre contexte de gestion de savoir-faire pratiques.

#### 3.2.4 Annoter des partitions électroniques


Dans le domaine musical, on compte peu d'outils spécialisés dans l'annotation de partitions électroniques. Il existe des logiciels d'analyse spécialisés (voir partie 3.1.6), mais ces derniers ne sont pas dédiés à une utilisation en situation de jeu. Pour la musique neumatique on peut citer toutefois le projet Neuma présenté précédemment dans la partie 2.3. Son outil d'annotation repose sur les technologies HTML 5 et Javascript permettant à l'utilisateur de sélectionner un groupe de notes et de lui attacher un commentaire textuel et des tags (Figure 34). Pour les auteurs du projet, une annotation consiste en « un tag placé par un utilisateur sur un document ou une partie de ce document (pour être exploité au mieux, celui-ci doit appartenir à l'ontologie) ». L'ontologie associée au projet Neuma est étudiée dans la partie 2.3. Les discussions sur les pièces seront donc régies par les thèmes proposés par l'ontologie de Neuma. En effet, le projet s'adresse avant tout à des musicologues spécialistes du sujet, et a donc été conçu pour leurs besoins, même si les collections sont publiques et donc également accessibles aux chœurs désireux de les interpréter. Cependant, l'outil d'annotation semble toujours en développement au moment de la rédaction de ce mémoire, et il est notamment impossible d'effectuer une recherche sur les annotations existantes.

---

<sup>40</sup> <http://getutopia.com/index.php>, visité le 19/04/2013.

<sup>41</sup> YUMA Universal Media Annotator : <https://github.com/yuma-annotation/>, visité le 19/04/2013.

**Répertoire International des Sources Musicales**  
**[Orphée et Euridice. W 41. Acte 2, scène 1. Ah ! la flamme qui me dévore. Do mineur]**  
 Gluck, Christoph Willibald von



Ah ! la flam-me qui me dé - vo - re

Neuma (<http://www.neuma.fr>) -- URL: [http://www.neuma.fr/opus/rism:D10450\\_3\\_0\\_1](http://www.neuma.fr/opus/rism:D10450_3_0_1)

ID: (new) range: P1-1,P1-2 new

Text Keyword

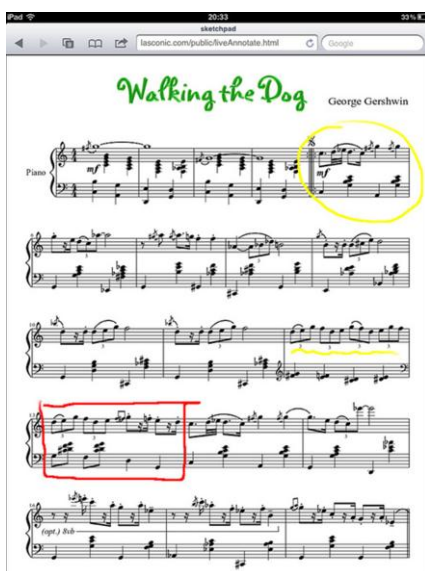
Music Ontology Filtering

- [-] Finale
- [-] Cadence
  - [-] cadence de ténor
  - [-] cadence de basse
  - [-] cadence de dessus
- [-] Rythme
- [-] Mélodie
- [-] Altérations
- [-] Ornement
- [-] Figuralisme
- [-] Clé
- [-] Registre

add

**Figure 34 : Interface d'annotation de partitions du projet Neuma**

Plus généraliste et proche de l'apprentissage musical, l'initiative LiveScoreAnnotator est née lors des rencontres Music Hack Days 2011 (journées d'échanges entre développeurs informatiques sur la musique). Il permet à un professeur et un élève de se connecter à une même partition et de l'annoter en temps réel en y créant des tracés. Reposant sur les technologies HTML 5 (balise canvas et WebSocket), ce premier prototype a été créé par Nicolas Froment, développeur de l'éditeur de partition Open Source MuseScore (voir partie 3.1.2).



**Figure 35 : Interface d'annotation de LiveScore Annotator**

Il fonctionne notamment sur les navigateurs des tablettes tactiles et distingue le professeur de l'élève par la couleur de leurs annotations respectives (Figure 35). A tout moment, le professeur peut effacer l'ensemble des tracés sur la page. Là encore, l'application n'est pas finalisée et ne semble plus fonctionner. LiveScoreAnnotator reste une initiative intéressante par sa proximité avec l'annotation traditionnelle à main levée. Son utilisation est particulièrement pertinente dans le cadre d'un cours en visio-conférence. Cependant, les annotations créés n'ont pas vocation à être sauvegardées mais plutôt à servir de pointeur pour faciliter la communication à distance entre le professeur et l'élève (exemple : « reprend à ce passage » avec désignation sur la partition partagée). On peut alors imaginer une fonctionnalité permettant de sauvegarder les annotations « pérennes » (doigtés, exercices pratiques ou remarques générales).

L'application pour tablette iPad Tonara propose un outil d'annotation plus développé, avec gestion des calques, des couleurs, de la taille des annotations et bibliothèque de symboles vectoriels (Figure 37). L'ajout d'un symbole sur la partition par glisser-déposer est facilité grâce à un zoom contextuel permettant de viser avec précision l'emplacement où déposer ce dernier. Cette fonctionnalité est particulièrement adaptée à la saisie de doigtés, chaque chiffre étant associé à une note bien précise.

Les différents symboles sont de plus classés par instrument (exemples : symboles de mouvement d'archet pour les violonistes, symboles de pédale pour les pianistes). Cependant, les annotations ainsi créées ne semblent liées à la partition que par une position en pixels (pas de lien logique avec les symboles de la partition), et ne peuvent être partagées avec d'autres utilisateurs.

Le module d'annotation pour Tablet PC du projet VEMUS (voir partie 3.1.5.3) essaye quant à lui de déterminer automatiquement le contexte de l'annotation en fonction de sa proximité avec d'autres éléments [11]. Cependant, la levée de certaines ambiguïtés reste complexe (voir Figure 36). Les auteurs proposent donc également un système de reconnaissance sémantique du contexte (par rapport au sens de l'annotation),



Figure 36 : Exemples de tracés pour lesquels la portée la plus proche n'est pas celle qui correspond aux événements manifestement concernés (encadrés). (source : Chapuis07 [11]).

pendant cette méthode est plus compliquée à mettre en œuvre puisqu'elle requière un module de reconnaissance de symboles. En effet, l'outil d'annotation de VEMUS, en plus de formes graphiques diverses, textes, symboles, extraits sonores et leurs courbes caractéristiques associées (spectres de fréquences, forme d'ondes, etc.), propose à l'utilisateur de « dessiner » l'annotation à l'aide d'un stylet : entourer un passage, barrer une note ou bien encore écrire un phrasé. Le musicien retrouve alors les mêmes sensations qu'avec sa partition papier. Le concept de partition dynamique permet également aux différents symboles de se réorganiser automatiquement (taille, position) afin d'optimiser la mise en page de la partition en fonction des nouvelles annotations saisies. Cependant, le projet VEMUS s'est arrêté en 2008, et ne semble pas avoir été poursuivi depuis, même si une adaptation sur les tablettes tactiles actuelles serait tout à fait pertinente.

Les outils INScore et iAnalyse présentés précédemment (partie 3.1.6) sont également des outils d'annotation de partitions électroniques. Cependant, l'activité même de création des annotations n'y a pas été pensée pour être collaborative : seul le produit final (partition augmentée d'éléments graphiques animés) est éventuellement partagé (sous forme de vidéo par exemple), écartant une réflexion commune nécessaire dans la pratique d'un instrument. Ces outils sont donc plus intéressants dans le cadre d'un exposé musicologique ou d'une performance scénique.

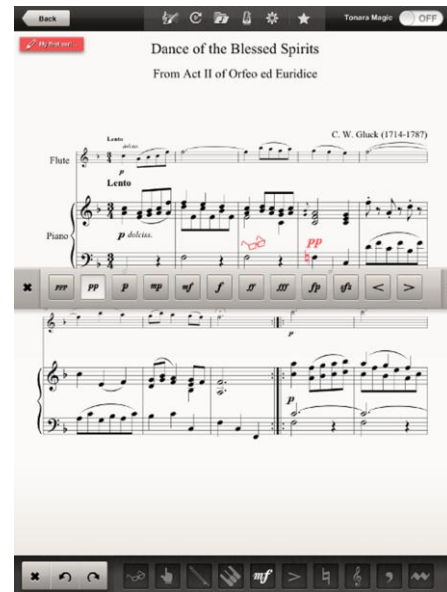


Figure 37 : Interface de l'outil d'annotation de Tonara sur iPad

Tableau 1 : Comparatif d'outils d'annotation de partitions pour la pratique musicale

	Neuma	LiveScore Annotator	Tonara	Vemus	INScore	iAnalyse
Type d'application	Application Web	Application Web mobile	Application mobile	Application pour Tablet PC	Application offline (Multiplateforme)	Application offline (MAC OS)
Cibles	musicologues, interprètes de la musique ancienne	élèves et professeurs de musique	élèves et professeurs de musique, interprètes	élèves et professeurs de musique	compositeurs et enseignants	musicologues et enseignants
Objectif principal	centraliser des partitions de musique ancienne	support d'annotation commun pour cours de musique en visioconférence	tourner automatiquement les pages d'une partition pendant son interprétation	support d'annotation augmenté pendant un cours de musique en présentiel	création d'animations musicales à visées pédagogiques ou artistiques	structuration et explication d'une partition animée
Saisie des annotations	Clavier+souris	Manuscrite	Glisser-déposé / clavier iPad	Manuscrite	Clavier+souris	Clavier+souris
Contenu des annotations	Texte, tags	Tracés manuscrits	Bibliothèque de symboles	Tracés manuscrits + Bibliothèque de symboles + fichiers audio	Texte + éléments graphiques vectoriels et bitmap + fichiers audio/vidéo	Texte + Bibliothèque de symboles
Indexation sur la partition	A la note près	non	non	A la note près	A la note près	A la note près
Référencement des annotations	tags	non	non	non	non	non
Recherche d'annotations	inconnu	non	non	non	non	non
Mobilité	non (navigateurs Web mobiles ?)	oui	oui	oui	non	non
Export partition annotée	inconnu	non	non	inconnu	fichier pdf, image jpeg, png, etc.	image jpeg, vidéo H264
Travail collaboratif à distance	Entre utilisateurs authentifiés ?	Entre 2 utilisateurs connectés	non	non	non	non
Statut de la partition annotée	publique	privée	privée	privée	privée	privée
Type de communication	asynchrone	synchrone				
Modération des annotations	inconnu	non				

Pour résumer, bien que développés dans de nombreux domaines, les outils d'annotation collaboratifs restent rares en musique. En effet, la plupart des services existant concernent la consommation de musique, et rarement sa création ou son interprétation. Toutefois, le développement d'outils d'apprentissage collaboratif et de nombreuses bibliothèques de partitions en ligne appelle à des progrès imminents dans ce domaine. Il sera alors déterminant de disposer de services accompagnant efficacement l'utilisateur dans sa démarche (recherche d'annotations, classification, agrégation, groupes d'intérêt, filtres, automatisation de processus, etc.). L'usage de dispositifs mobiles et tactiles (notamment compatibles avec des stylets) permet de se rapprocher de la pratique naturelle de l'annotation tracée à la main. Il convient alors de bien distinguer la couche de base représentant le document annoté (« notation »), des informations saisies par les utilisateurs (« annotations »).

### 3.2.5 L'annotation sémantique automatique en musique

L'annotation sémantique automatique d'extraits audio englobe plusieurs des problématiques caractéristiques de l'ECM vues précédemment (partie 1). L'objectif est d'associer automatiquement à un extrait audio des tags définissant son genre, l'ambiance du morceau (mood), ou encore son instrumentation. On parle alors d'« autotags » au contraire des « social tags » créés par des

---

humains. Ces tags sont particulièrement importants pour les systèmes de recommandation de musique tels que Last.fm ou Pandora. En effet, si les suggestions basées sur les goûts d'utilisateurs similaires peuvent être pertinentes pour les titres populaires existant sur la plate-forme depuis longtemps, il est beaucoup plus difficile pour un titre nouveau (et donc moins plébiscité) de réussir à s'imposer (effet du cold-start [8]). Ils ne peuvent bien sûr atteindre la précision et la justesse des tags apposés par des critiques musicaux, mais présentent l'avantage de pouvoir traiter des volumes de données très importants en un temps restreint. Le principe général de l'autotagging consiste à entraîner l'algorithme sur un jeu de données déjà renseigné (Machine Learning). Différentes méthodes existent pour recueillir de telles données auprès des auditeurs (sondages, études, applications, blogs ou jeux comme la page Web « bac à sable » de Last.fm). Cette étape permet à l'algorithme de corrélérer les caractéristiques des extraits audio aux tags correspondants. L'algorithme se fonde ensuite sur les règles inférées (exemple fictif : saturations répétées → mot-clé « heavy metal ») pour classer un nouveau titre. La thèse de Mohamed Sordo [64] traite de ce sujet en détail et propose une comparaison intéressante entre des tags issus de folksonomies et ceux issus de vocabulaires contrôlés mis en place par des experts.

Des concours ont lieu annuellement pour départager les algorithmes d'autotagging sur une même base d'extraits audio. Le plus connu est MIREX (Music Information Retrieval Evaluation eXchange), se déroulant dans le cadre des conférences ISMIR.

Dans le cadre de la gestion des savoir-faire musicaux, ce type d'annotation pourrait être exploité afin d'analyser automatiquement des interprétations ou des conseils en vidéo et en extraire les métadonnées « de base » : compositeur, style, ambiance, tonalité, mode. L'objectif reste de minimiser les tâches subsidiaires pour les musiciens (c'est-à-dire non directement liées à l'apprentissage ou l'enseignement de la musique).

L'ECM s'attache également à annoter automatiquement les représentations symboliques de la musique (fichiers MIDI, partitions, etc.). Les méthodes décrites dans la partie 2.3.3 peuvent être exploitées afin de générer des annotations concernant les doigtés ou la structure de la pièce. Ces informations sont au cœur du processus d'apprentissage décrit dans la partie 2.2.4.2 et sont donc particulièrement intéressantes pour notre cas. La génération automatique d'annotations sur les partitions musicales est donc étudiée dans la partie 5.5.4.

### **3.3 Synthèse**

Ce chapitre a permis d'étudier les différents types d'outils utilisés dans l'apprentissage de la musique. Après une brève discussion sur la place des TIC dans l'éducation musicale, nous avons présenté un des outils les plus utilisés par les professeurs de solfège : l'éditeur de partitions. Ce dernier tend aujourd'hui à être couplé à une plateforme en ligne de partage de partitions, à l'image de la solution proposée par MuseScore. En effet, le Web a maintenant une place prédominante dans l'enseignement musical, comme en atteste les nombreuses interprétations, démonstrations et leçons postées sur Youtube, ou encore les bases de contenus pédagogiques de la Cité de La Musique. Les applications dédiées à l'apprentissage d'un instrument sont également de plus en plus nombreuses. Nous en avons distingué deux sortes : celles reposant sur une approche descendante et globalement offline (approche du DVD e-guitare), et celles s'appuyant sur une approche ascendante, online et communautaire (approche de l'outil FIGS). Parmi ces dernières, beaucoup sont réservées aux établissements d'enseignement, tels que NoteFlight Campus et iScore. D'autres outils pour la

composition et l'analyse musicologique ont été étudiés, même s'ils restent moins utilisés dans un contexte pédagogique. Une discussion sur la place de la machine dans le e-Learning instrumental a également été présentée. En effet, si dans e-Guitare les traitements informatiques ne servent qu'à synchroniser et présenter une vue adaptée des flux, la machine fait presque office de professeur dans Songs2See, en jugeant des notes manquées par le musicien. Les avantages, limites et évolutions pressenties des deux approches sont donc également évoqués.

La deuxième partie de ce chapitre revient sur l'apprentissage communautaire en se concentrant cette fois-ci sur une pratique courante dans le partage de savoir-faire : l'annotation de documents. Différents types d'annotations sont définis, suivant qu'elles soient à destination d'humains (annotation) ou de programmes informatique (annotation sémantique, ou tagging). Les différentes interactions homme-machine en jeu dans cette pratique ont également été étudiées au travers d'exemples d'outils d'annotation.

Les nombreux modèles et outils décrits dans cet état de l'art suggèrent des pistes intéressantes pour traiter de problèmes liés à la transmission de savoir-faire vivants bien qu'aucun ne soient à même de les gérer dans leur ensemble, notamment :

- si les œuvres sont décrites sémantiquement (par exemple dans la base de titres MusicBrainz), ces descriptions sont adaptées à l'écoute, et non à la pratique musicale. Inversement, les applications d'apprentissage de la musique n'utilisent pas ces représentations sémantiques (principalement parce qu'elles ne l'exploitent pas, les ressources utilisées étant internes à l'application). Certaines librairies de partitions en ligne le font, mais traitent de musicologie et non d'interprétation musicale. Ainsi, on ne peut décrire un geste avec précision par exemple.
- La saisie d'interprétations n'est pas considérée : l'utilisateur entre soit une connaissance structurée (exemple : un tag, une description sémantique via un formulaire), soit un commentaire non structuré. Il n'existe pas de structure adaptée pour décrire des interprétations, impactant directement sur la recherche, la mise en relation et la présentation de savoir-faire.

En outre, l'explosion des données sur les réseaux actuels met en exergue d'autres difficultés liées à la gestion de savoir-faire :

- Comment centraliser les savoir-faire et s'assurer de leur qualité ? Cette question se posait déjà avec les autres supports (livres, DVD), mais avec le Web, où tout internaute peut diffuser du contenu, la frontière entre savoir éprouvé et opinion à confirmer est encore plus difficile à établir. Des outils existent (rubriques, tags, autorégulation, animateurs de communauté) mais peuvent être détournés. Cette question requiert un compromis entre restrictions et libertés de création pour assurer l'organisation et la pérennité des contenus sans museler la créativité des utilisateurs.
- Peut-on agréger les contenus déjà existants sur le Web pour créer notre base de Signes ? Si oui, comment le réaliser, quels modes de sélection et quels traitements appliquer ?
- Quel est le rôle de la machine : support de traitement et diffusion de média ? aide à la navigation ? à la décision ? à l'apprentissage ? peut-elle juger de questions propres au domaine considéré, ou n'est-ce que du ressort de l'humain (voire uniquement de l'expert du domaine) ? Que doit-on formaliser et pourquoi ?

- Pour un domaine donné, jusqu'à quel niveau de complexité travailler ? La plupart des outils existants abordent les fondements du savoir-faire considéré. Peu d'outils s'adaptent à la création et au partage de notions de haut niveau. Ces dernières présentent des exigences bien supérieures aux initiations couramment rencontrées : représentation logique complexe, précision du geste, adaptation à l'apprenant. Dans ce qui suit, nous étudions notamment un cours de piano classique, sur une pièce de niveau débutant, mais mené par un professeur de très haut niveau. Il s'agit de déterminer si chaque subtilité abordée doit être modélisée dans le système de gestion du savoir-faire ou non.

Le chapitre suivant décrit notre première contribution : le Signe Interprétatif. Son modèle se veut adapté à la description d'interprétations pour tenter de répondre aux questions soulevées.



## 4 Gérer des Signes : définition, modélisation et acquisition

Ce chapitre présente notre première contribution pour la gestion de savoir-faire et l'élaboration d'une base associée. Nous proposons d'employer un nouveau paradigme pour la gestion de savoir-faire pratiques, fondé sur la description d'interprétations : la théorie des Signes.

Dans une première partie, nous étudions la définition linguistique du Signe donnée par Saussure, puis nous l'adaptions à notre contexte en définissant un Signe Interprétatif. Pour ce faire, nous proposons une définition et une formalisation simple de la notion d'interprétation, et de sa relation au Signe. Nous étudions ensuite le processus de construction du Signe Interprétatif (sémiosis) avant de recenser quelques théories connexes et leur rapport à la théorie des Signes. Enfin, on met en évidence les apports pressentis de la gestion des Signes par rapport à la gestion des connaissances dans un environnement informatique à l'aide de deux exemples concrets. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous proposons une modélisation informatique du Signe Interprétatif fondée sur l'annotation multimédia de documents. On nomme cette structure l'annotation sémiotique. Une méthodologie d'acquisition de Signes reposant sur des logiques descriptives est ensuite détaillée. Enfin, les contributions proposées sont appliquées au domaine de la pratique musicale via la définition d'un Signe Musical et de ses outils de modélisation et d'acquisition associés : des logiques descriptives, un modèle descriptif générique et des ontologies adaptées à la sémantique musicale.

### 4.1 Théorie des Signes et Interprétation

#### 4.1.1 Définition du Signe

Le Signe, tel que défini par Saussure, est un objet composé d'un signifiant et d'un signifié. Le signifiant est une entité représentant une autre entité (le signifié) pour un agent. Le Signe peut également comporter un référent, qui est l'objet concret évoqué, lorsqu'il existe (par exemple, il n'y a, à priori, pas de référent pour les mots « licorne » et « fée »). Ainsi, les mots et les chiffres sont des Signes (ils servent à représenter des idées ou des quantités). La Figure 38 donne un exemple de Signe faisant apparaître ces composants sous la forme d'un triangle : imaginons deux personnes discutant d'un cheval présent sur les lieux, le Signe /cheval/ (notation usuelle d'un signe) présente alors un signifiant qui est le mot prononcé, un signifié qui est l'idée que se font les protagonistes d'un cheval (un mammifère à quatre pattes, qui hennit, utilisé communément comme monture...), et un référent qui est le véritable cheval désigné par les protagonistes.

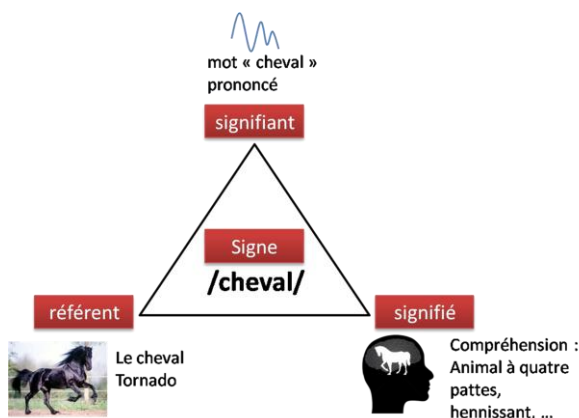


Figure 38 : Exemple de décomposition du Signe en signifiant, signifié et référent.

Il convient de bien distinguer le Signe du symbole : le symbole est un type particulier de Signe. En effet, un symbole est un objet graphique (une colombe, une balance, une note de musique) représentant un concept ou un phénomène et résulte d'une convention, tandis qu'un Signe n'est pas nécessairement un graphisme (il peut s'agir d'un geste, d'un symptôme, ou d'un son) et n'est pas systématiquement partagé par un groupe (exemple : une sonnerie de téléphone personnalisée).

La sémiotique (ou sémiologie) est la science étudiant les Signes. Plus spécifiquement, elle s'intéresse au processus de signification (ou sémosis), c'est-à-dire la production, la codification et la communication de Signes. La sémantique linguistique, se concentrant sur le sens des mots, en est une branche. Charles W. Morris [38] identifie trois dimensions de la sémiotique :

- la **sémantique** : la relation entre les signes et ce qu'ils signifient (relations internes entre signifiant et signifié ou relation externe entre le signe global et le référent),
- la **syntaxe** : les relations entre signes. Quand des Signes sont régulièrement utilisés ensemble, on parle de systèmes de Signes (exemple : une langue est un système de Signes, le code de la route est également un système de Signes),
- la **pragmatique** : la relation entre les signes et leurs utilisateurs. Comment utilisent-ils les Signes ?

Nombre de chercheurs ayant bâti leur propre théorie des Signes (parfois en reprenant une partie des travaux de leurs pairs), il existe aujourd'hui plusieurs sémiotiques, souvent dépendantes des domaines de recherche considérés et de leurs systèmes de Signes propres (linguistique, épistémologie, sciences du vivant, anthropologie, philosophie, arts). Nous prenons donc le parti d'en exploiter principalement les définitions fondamentales sur lesquelles s'accordent tous les sémioticiens, et de les adapter à notre contexte de gestion de savoir-faire, et plus particulièrement d'interprétations.

En effet, nous avons vu dans la partie 2.2.2 l'importance de la production et de la comparaison d'interprétations dans la transmission de savoir-faire, notamment dans la pratique musicale. La théorie du Signe peut se prêter à la description d'interprétations, l'usage de Signes traduisant finalement l'approche personnelle d'un sujet dans une situation donnée. Nous nous intéressons donc dans ce qui suit à la notion d'Interprétation et à sa relation au Signe.

### 4.1.2 Définition de l'Interprétation

De manière générale, les dictionnaires associent l'interprétation à « l'action d'interpréter, d'expliquer un texte, de lui donner un sens » (Dictionnaire Larousse). Comme pour le Signe, on retrouve donc le fait d'associer un sens à un objet (pas nécessairement un texte). Cependant, l'interprétation désigne également un processus, sinon, elle se confondrait avec le sens. Plus précisément, le lexique du CNRLT<sup>42</sup> donne les définitions contextuelles suivantes :

- Dans l'étude des langues : une traduction d'un discours d'une langue dans une autre (exemple : l'interprète dans une conférence internationale).
- En littérature : une explication, la recherche de sens cachés dans un texte (exemple : herméneutique de textes religieux ou philosophiques).

---

<sup>42</sup> Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, <http://www.cnrtl.fr>, visité le 03/06/2013.

- En linguistique : attribution d'un sens à une structure profonde (*interprétation sémantique*) ou attribution de traits phonologiques et phonétiques à une structure de surface (*interprétation phonétique*).
- En psychanalyse : attribution d'une signification déformée ou erronée à un fait réel, à un événement, à un comportement. Action de donner un sens allégorique, symbolique, mystique à quelque chose; résultat de cette action. *Interprétation d'un songe, d'un oracle*.
- En droit public : Interprétation d'un décret, d'une loi. Fait de dégager le sens exact d'un texte qui serait peu clair, d'en déterminer la portée, c'est-à-dire le champ d'application temporel, spatial et juridique ainsi que l'éventuelle supériorité vis-à-vis d'autres normes.
- Dans les arts scéniques : Action de jouer un rôle ou un morceau de musique en traduisant de manière personnelle la pensée, les intentions d'un auteur ou d'un musicien; résultat de cette action.

On trouve également les définitions suivantes de l'interprétation :

- En logique mathématique : l'interprétation de formules, permettant d'associer à toute formule un objet dans une structure abstraite appelée modèle, et ainsi de définir la validité des formules.
- En informatique :
  - o un mode d'analyse et d'exécution ligne par ligne de programmes.
  - o la sémantique interprétative de traces d'exécution d'un programme (voir partie 4).

Ces définitions ont en commun les éléments suivant (implicitement ou explicitement) :

- Un **objet** observé : un texte, un discours, un mot, un panneau, un rêve, un comportement, une œuvre, une formule, un programme informatique. Dans la théorie du Signe, il s'agit du **réfèrent**.
- Un **observateur** : l'agent observant, analysant l'objet et construisant l'interprétation. Il s'agit du **sujet**, ou de **l'interprète**.
- Un **processus** de construction du sens à partir de l'observation : une analyse, une étude, une association ou une déduction sur la base de l'expérience, des connaissances et de la sensibilité de l'interprète. En sémiotique, on nomme ce processus la **signification**.
- Un **résultat** de cette observation personnelle : un avis, un texte traduit, une définition, un acte (exemple : condamnation ou acquittement dans le cas d'une interprétation de texte de loi), des sons (interprétation musicale), un affichage, etc.

On propose donc la définition suivante :

- Une interprétation désigne un **processus de construction du sens** d'un **objet** par un **sujet** ainsi que le **résultat** de ce processus. Selon la nature de cet objet, la sensibilité et les modes d'expression privilégiés du sujet, l'interprétation peut prendre des formes diverses. Une interprétation peut donc être perçue comme un sens en cours de formation.

Naturellement, selon les domaines considérés, l'objectif de l'interprétation est très variable. Ainsi, un interprète traduisant un discours dans une langue cible s'efforce de rester fidèle au texte original sans exprimer sa personnalité ou ses opinions, alors qu'on attend au contraire d'un musicien qu'il affirme sa personnalité en interprétant une œuvre d'un compositeur, sans toutefois trahir l'esprit de

cette œuvre. Cette distance entre l'objet réel, tel qu'il a été conçu par l'homme ou par la nature, et la perception qu'en a un individu constitue toute l'essence et la difficulté à appréhender la notion d'interprétation.

De plus, l'interprétation est influencée par de nombreux facteurs liés aux situations d'observation. Elle peut par exemple dépendre de l'échelle d'observation : deux experts observeront des structures différentes sur un même fragment de corail selon la puissance de grossissement de leurs microscopes respectifs, et en tireront donc des conclusions distinctes (peut-être complémentaires).

Cependant, l'existence de différentes interprétations appelle à la réflexion, à la discussion, voire à la création de nouvelles conventions ou de nouveaux modes d'enseignement : elles sont donc capitales pour le développement individuel des protagonistes, et celui du domaine considéré. Ainsi, dans l'apprentissage d'un instrument de musique, l'élève s'approprie les interprétations de ses prédécesseurs (interprètes célèbres, amis, professeurs), pour construire les siennes en y ajoutant sa touche personnelle. La dimension pédagogique de nos travaux implique que l'on ne s'intéresse pas uniquement aux interprétations en tant que résultat, mais également à leur explicitation : pourquoi un tel choix de l'interprète ? Pour ce faire, l'expression et l'explicitation d'interprétations requiert l'usage d'outils, et plus particulièrement d'instruments (appropriation par l'utilisateur) : instrument de musique, ordinateur, applications, caméras, microphones, toiles, peintures, couteaux, etc. La gestion d'interprétations peut être résumée ainsi : mieux comprendre un domaine de connaissances, en manipulant et en étudiant ses instances, individus et manifestations concrètes plutôt que des considérations théoriques. Bruno Bachimont affirme ainsi que « la connaissance ne s'appréhende qu'à travers des objets dont elle est l'interprétation » [4]. Il nomme ces objets « inscriptions ».

Nous avons vu que les notions d'Interprétation et de Signe partageaient de nombreux points communs. Comment les relier ?

#### 4.1.3 De l'Interprétation au Signe : le Signe Interprétatif

La théorie des Signes s'intéresse à la description, à l'illustration et à la signification de gestes, de sons ou d'images, au cœur de la notion d'interprétation. On s'affaire d'ailleurs régulièrement à « interpréter des signes » (météo, coïncidences, symptômes). Cependant, la définition du Signe donnée précédemment y inclut le signifié, qui est la compréhension du Signe par le sujet l'employant. L'interprétation issue du sujet est donc contenue dans le Signe. On définit alors la relation entre Signe et Interprétation comme suit :

- Le **Signe** est une **entité véhiculant l'interprétation** d'un **objet** ou d'un **phénomène** par un **sujet** à un **moment** donné.

On souligne le fait que si une interprétation est généralement interne au sujet, le Signe qui véhicule cette interprétation peut être communiqué grâce à son contenu. Le Signe est donc une nouvelle production, traduisant la perception et la connaissance d'un objet par un sujet. La Figure 39 résume la relation entre Signe, Interprétation et Connaissance. La connaissance interne de chaque individu lui permet d'interpréter les objets qui l'entourent pour se les approprier. La communication de ces interprétations, sous quelque forme qu'elle soit, produit des Signes. Ces Signes peuvent varier d'une personne à l'autre.

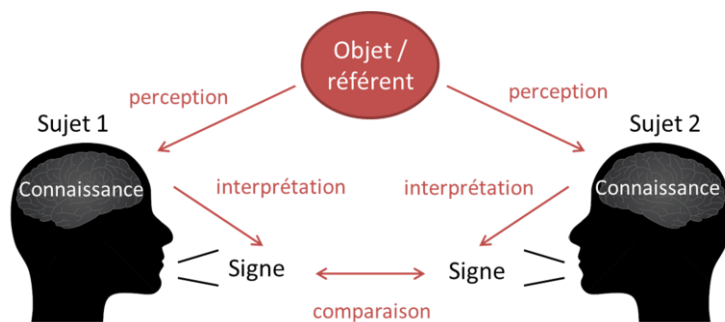


Figure 39 : Relation entre Signe, Interprétation et Connaissance

Cette nouvelle définition du Signe faisant apparaître la notion d'interprétation par un sujet, nous la nommons **Signe Interprétatif (SI)**. Le SI est donc subjectif, c'est-à-dire qu'il peut faire l'objet de débats, générant alors de nouveaux SI traduisant des points de vue distincts. Il peut être décomposé en quatre éléments : le sujet, le contenu, la forme et le sens. Cette structure peut être représentée sous la forme d'un tétraèdre [13] (Figure 40). Chacun des composants est décrit de la façon suivante :

- le **sujet** est le créateur du SI : d'une idée, il crée un objet physique ou numérique qu'il peut transmettre à d'autres personnes. Le SI naît alors de la volonté de communiquer son savoir-faire via une expression concrète de ce dernier. Il s'agit de l'apport principal du SI par rapport au Signe traditionnel qui n'inclut pas l'entité dont est issu le Signe. Le sujet fait passer le Signe d'un modèle triangulaire à un modèle tétraédrique.
- le **contenu** regroupe des objets sensoriels (images, sons, gestes). C'est l'ensemble des objets communiqués entre le sujet et les destinataires du Signe. Dans le modèle triangulaire du Signe, il s'agit du référent (ce dont parle le sujet).
- la **forme** désigne l'organisation matérielle de ces objets (formats d'enregistrement, écrits) permettant de les partager avec d'autres personnes (niveau externe). La forme implique généralement un processus de capture, de codification ou de représentation (écriture, gravure, enregistrement, codage) des contenus. Dans le modèle triangulaire du Signe, il s'agit du signifiant.
- le **sens** exprime la signification que donne le sujet au contenu et à la forme qu'il a construit. Ce composant constitue la dimension sémantique et interprétative du SI. Dans le modèle triangulaire du Signe, il s'agit du signifié.

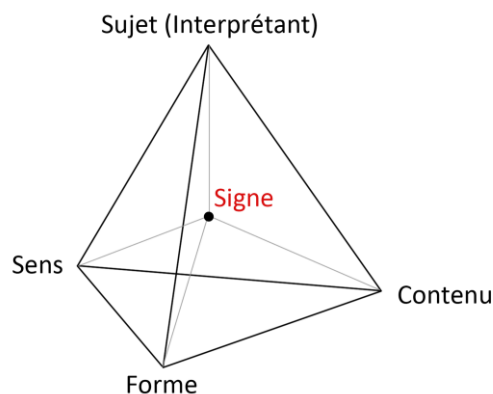


Figure 40: Représentation tétraédrique du signe [13]

De nombreux objets du quotidien traduisant des interprétations peuvent être perçus comme des SI et ainsi être décomposés suivant cette grille :

- un livre :
  - o sujet : l'écrivain
  - o contenu : le propos de l'écrivain
  - o forme : les constituants du livre : couverture, pages, écrits
  - o sens : l'objectif, le message transmis par l'écrivain (exemple : morale, divertissement, enseignement, dénonciation, positionnement)
- Un enregistrement musical :
  - o sujet : l'interprète
  - o contenu : l'onde sonore produite lors de la lecture
  - o forme : le support (CD, fichier MP3, WAV), le signal encodé
  - o sens : dépend de l'interprète et de l'auditeur : transmission d'émotions, divertissement, détente
- un feu de circulation :
  - o sujets : les autorités, les automobilistes
  - o contenu : couleurs affichées et perçues par les automobilistes
  - o forme : les constituants de l'appareil (pilonne, lampes, circuits, etc.)
  - o sens : rouge = stop, vert = avancer, orange = bientôt rouge (ou orange = bientôt vert en Angleterre).
- le mot « vaisseau » :
  - o sujet : celui qui parle
  - o contenu : le mot écrit ou le son correspondant au mot prononcé (phonétique)
  - o forme : l'encre ou les pixels formant les lettres du mot
  - o sens : selon le sujet un navire, ou bien une navette spatiale, un chameau (« vaisseau du désert »)
- le tableau « La Joconde » :
  - o sujet : Leonard de Vinci
  - o contenu : un portrait de femme
  - o forme : une toile peinte à l'huile
  - o sens : dépend de l'intention du peintre (non explicite dans le cas présent) : la maternité, un alter-ego travesti du peintre, une femme riche

Comme le suggèrent ces exemples, cette décomposition se prête mieux à la description de manifestations artistiques ou culturelles (une peinture, une interprétation musicale, une performance), où l'intention du sujet gagne à être explicitée car non triviale et sujette à la polysémie (ce qui ne devrait pas être le cas du feu de circulation par exemple).

Si une œuvre peut être un SI, un commentaire sur cette œuvre peut également en être un. Ainsi, on pourra par exemple avoir :

- un commentaire sur le tableau « La Joconde » :
  - o sujet : un historien de l'art
  - o contenu : du texte, des images, des liens expliquant le point de vue
  - o forme : article de blog portant sur l'œuvre

- sens : « La personne représentée serait Lisa Maria Gherardini »
- une annotation sur une partition de la Toccata et Fugue en ré mineur de J.S. Bach :
  - sujet : un pianiste amateur
  - contenu : un triangle
  - forme : un symbole de triangle tracé au crayon sur la partition
  - sens : « le thème de cette Fugue débute là où se trouve le triangle »

Si les œuvres sont des SI (voir exemples précédents), alors les commentaires constituent des SI sur des SI. Des fils de discussion peuvent alors tout à fait être perçus comme des chaînes de SI.

Ces SI « commentaires » ou « annotation » (voir partie 4.2) sont particulièrement pertinents dans le cadre de l'apprentissage d'un savoir-faire. Ils permettent aux apprenants de communiquer leurs interprétations d'une partie d'une œuvre avec précision. Les structurer faciliterait la comparaison d'interprétations distinctes pour une même partie de l'œuvre.

La définition précédente nous permet de positionner le SI par rapport aux concepts vus dans la partie 2.1.1 (voir Figure 41). Le SI y apparaît comme étant un objet de communication du savoir-faire d'un individu via la description d'interprétations.

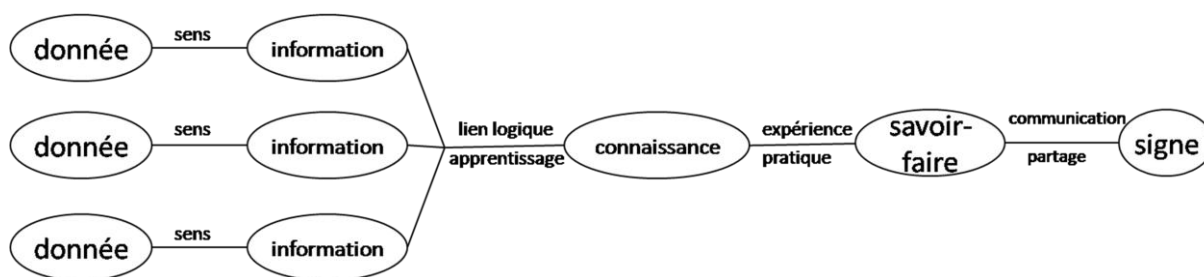


Figure 41: Relations entre donnée, information, connaissance, savoir-faire et signe

On note que le SI est donc le résultat d'une construction : le sujet part de son expérience et de sa sensibilité pour fabriquer le SI à l'aide d'instruments. Dans ce qui suit, nous décrivons le processus de création de Signes chez un individu : la Signification.

#### 4.1.4 Le processus de Signification

La Signification (ou sémiotique, ou encore sémiotose) désigne le processus de construction du Signe par un sujet : c'est l'action de donner du sens à un objet. Dans notre modèle de Signe Interprétatif, ce dernier est construit progressivement par le Sujet, au fur et à mesure de sa démarche personnelle d'interprétation de l'objet. Il génère alors trois Signes intermédiaires :

- Le **Signe phénoménal** est issu du ressenti d'un sujet face à un phénomène : il est donc interne et difficilement perceptible pour une tierce personne. Il peut s'agir par exemple d'une réaction physiologique (émotion, dégoût, etc). Ce Signe est caractéristique de la réceptivité de l'individu à son milieu (Umwelt), ce sur quoi se porte son attention. Il a une place importante dans le processus de sémiotique car il conditionne le passage à l'action du sujet (motivation, volition).
- Le **Signe interpersonnel** est celui de l'oral : le sujet communique son interprétation à d'autres personnes via des discussions informelles.

- Le **Signe formel** est celui de l'écrit : le sujet synthétise son interprétation sous une forme transmissible à une communauté, dans le but d'accroître la connaissance du domaine (postérité).

Chacun de ces Signes intermédiaires peut se rattacher à un composant du SI : le signe phénoménal est produit suite au recueil d'**informations** dans l'environnement, le signe interpersonnel s'appuie sur la production et le partage de **contenus**, et le signe formel sur la production de **sens** à partir des connaissances et de l'expérience du sujet. Ce processus est de plus itératif : suite à la communication d'un premier SI, le sujet peut entamer une nouvelle réflexion (nouveau signe phénoménal) qui aboutira à la production d'un nouveau SI. La Figure 42 illustre ce processus.

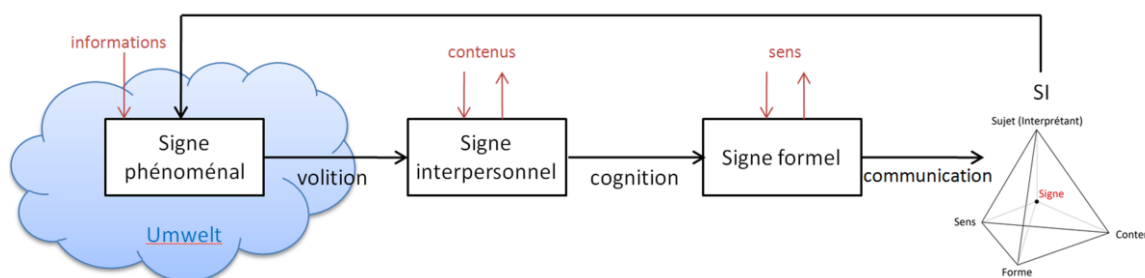


Figure 42 : Processus de Signification.

Naturellement, les Signes n'atteignent pas systématiquement le stade de Signe formel. Notre objectif est donc entre autres de concevoir des outils-instruments destinés à accompagner l'utilisateur dans la création de SI aboutis. Nous reproduisons donc ce processus psychologique de Signification sur notre plateforme de gestion de SI via l'usage de logiques descriptives (voir parties 4.2.4 et 4.3.4.1).

Dans ce qui suit, nous étudions des théories proches du SI, et développons en quoi elles s'en distinguent dans le cadre de la gestion d'interprétations. Ce travail nous permet de positionner notre approche sémiotique est d'exposer ses intérêts pour le partage de savoir-faire à une grande échelle.

#### 4.1.5 Théories connexes

##### 4.1.5.1 La Théorie des Traces

Pierre Deransart définit la Trace comme étant une suite discrète d'événements constitués chacun d'un ensemble d'attributs et susceptibles de rendre compte en partie du comportement d'un système ou d'un phénomène observé [15]. La Trace peut donc être perçue comme un enregistrement, une mémoire brute de l'activité d'un système, qui peut être réutilisée à des fins d'analyse. Il ne s'agit pas uniquement du résultat recherché de l'activité considérée, puisque les « effets de bords » constituent également des Traces. On distingue la Trace Effective (ce qui est effectivement observé) de la Trace Virtuelle (ce qui est observable). Cette dernière peut être formalisée par un modèle de transition d'états dans un automate. Ce modèle, muni de domaines d'états et de fonctions de transitions, est nommé Sémantique Observationnelle : il représente tout ce que l'on est susceptible de décrire du système vu de l'extérieur. Une Sémantique Interprétative est également introduite, permettant d'associer un sens à la Trace Effective pour former une Trace Virtuelle. Par exemple, un chasseur trouvant des empreintes de pas dans le sol peut en déduire des informations sur l'animal qui les a laissés (mouvement, forme des pattes, alternance droite/gauche, vitesse de progression). Les empreintes dans le sol constituent alors la Trace Effective (brute, aucune interprétation), et les informations déduites sur la forme de la patte la Trace Virtuelle (non présentes



à l'origine, déduction). Cette distinction correspond à celle faite dans la partie 2.1.1 entre données (brute, objective) et informations (construites en donnant du sens aux données). La Sémantique Interprétative désigne alors le processus de construction de ce sens, sachant qu'il peut y en avoir plusieurs (polysémies).

Le concept de Trace présente donc des analogies avec celui de Signe :

- Il est commun à différents domaines : de la biologie (traces mémorielles d'un système nerveux) au génie logiciel (traces laissées par un algorithme ou une simulation)
- Il ne traite pas directement d'un système ou d'une activité mais de toute manifestation concrète de celle-ci dans l'environnement d'exécution, afin de mieux le comprendre. Il s'agit de donner du sens à l'activité en observant ses Traces ou ses Signes et en construisant un modèle adapté, dans l'objectif de mieux gérer les connaissances qui y sont liées.

Mais se distingue cependant du Signe car :

- Il englobe tous les objets observés (ou observables) durant l'exécution du système, sans considérer l'objectif du Traceur (le générateur de traces), là où le Signe Interprétatif désigne un objet délibérément communiqué par le Sujet à un moment donné. Le Signe fait sens pour le sujet. La Trace est objective car précédant la phase d'analyse, le Signe est subjectif car il est le résultat d'une interprétation, et donc d'une réflexion. De plus, en sémiotique, le sujet peut être à la fois traceur (il génère la Trace) et observateur (il la classe, l'analyse).
- La Trace évolue en fonction du temps, elle contient donc plusieurs états. Le Signe est une interprétation à un moment donné.

On peut donc relier le Signe à la Trace comme suit :

- Le Signe peut être l'interprétation (au sens d'explication) de la Trace d'une activité à un moment donné par un sujet. Dans le cadre d'une activité musicale par exemple, la Trace sera l'interprétation capturée par un microphone, et le Signe comprendra l'explicitation de cet enregistrement (techniques utilisées, émotions transmises) par l'interprète.
- La Sémantique Interprétative constitue alors la partie sémantique du Signe (formalisation de l'objet dans un but de communication et de réflexion).

Pour résumer, La Trace est la manifestation d'une activité, alors que le Signe en est une interprétation construite par un sujet. Si la théorie de la Trace a pour objectif de modéliser toutes les interprétations possibles, via la notion de Sémantique Observationnelle, la théorie des Signes ne présume pas du nombre total d'interprétations pour un même objet ou phénomène, et s'intéresse plutôt à la comparaison et à l'explication des interprétations existantes ou émergentes par rapport aux profils des interprètes.

Pierre Deransart note de plus que « L'analyse du comportement humain dans des d'environnements complexes et multimédiés repose sur l'accumulation de traces d'observations tant de l'opérateur humain que des artéfacts utilisés. Les environnements considérés portent souvent sur un partage de compétences entre des machines et des humains. Le défi ici serait de permettre l'observation dans un tel système de la frontière des capacités, là où les parties coopèrent ou là où elles s'affrontent, c'est à dire d'une certaine manière les limites de l'automatisation ». Cette citation souligne ainsi l'intérêt d'étudier les Traces issues de la transmission de savoir-faire pour la construction de Signes

---

dans un domaine donné. Elle suggère également l'étude poussée de processus d'automatisation pour la capture et la transmission de savoir-faire : pourrait-on générer automatiquement des Signes ? Ce thème est étudié plus en détail dans les parties 5.3.2 et 5.5.4.

#### 4.1.5.2 *La Théorie du Document*

Jean-Michel Salaün, chercheur en sciences de l'information au Collegium de Lyon et professeur à l'Université de Montréal propose une Théorie du Document pour l'analyse de la structure du Web [50]. Pour ce faire, il définit la notion de document : il s'agit d'un objet matériel ou électronique sur lequel est consignée une information. Le document dispose d'un statut et d'une fonction (la plupart du temps « transmettre » et « prouver »). Il se décompose en trois entités : la forme (le vu), le contenu ou le texte (le lu), et le médium (le su). La forme est anthropologique : elle caractérise notre rapport à l'objet. La forme permet à l'objet d'être trouvable, percevable. Pour un livre, il s'agira par exemple de la couverture et des pages qui le composent. Le contenu est intellectuel : on peut le décrypter (ce sont les écritures du livre), il est lié à la signification. Enfin, la troisième composante, le médium est social : il désigne l'acte de lecture, la transmission de l'auteur au lecteur, la mémoire collective. Cette dimension est liée à la fonction du document.

Pour le chercheur, cette grille peut être utilisée dans l'analyse documentaire, en particulier pour expliquer les stratégies des firmes travaillant sur le Web Documentaire. Ainsi, Google développe l'ingénierie linguistique, privilégiant le contenu, Apple se spécialise dans le design et la production de matériels, privilégiant la forme, et Facebook étend son graphe social, permettant la transmission et la recommandation documentaire, privilégiant ainsi le médium. Les humains y sont d'ailleurs indexés de la même manière que les documents. Le smartphone est présenté comme le néo-document, équilibrant le rapport entre les trois composantes. Jean-Michel Salaün recommande également d'utiliser cette grille tridimensionnelle pour l'appliquer aux transformations du document numérique et ainsi former les bibliothécaires, libraires et documentalistes à devenir des architectes de l'information.

Le document, tel que défini par Jean-Michel Salaün et le Signe Interprétatif semblent proches. Ils partagent effectivement certains composants, tels que la forme et le contenu. Cependant, ces deux composants présentent des différences ténues chez l'un et l'autre. Le contenu du document renvoie à un décryptage, quand cette opération ne fait pas partie du SI : le contenu du SI désigne directement l'ensemble des données transmises par ce dernier (l'histoire narrée, le propos), sans considération sur la forme de ces données (code, écritures). Ce dernier aspect est inclus dans la composante « forme » du Signe. De plus, le document n'intègre pas la notion de subjectivité propre au SI, alors même que l'approche sociale y est essentielle. La décomposition du SI est, elle, entièrement dépendante du sujet qui l'opère, et ce dernier est clairement identifié afin de relier l'interprétation au sujet qui l'a produite, alors que le composant « médium » du document semble constituer une interprétation globale, collective de l'objet. Cependant, Signe et Document se rejoignent dans leurs fonctions de transmission et de partage de connaissances.

La Figure 43 résume les distinctions et similarités entre Signe Interprétatif et Document sur l'exemple du livre.

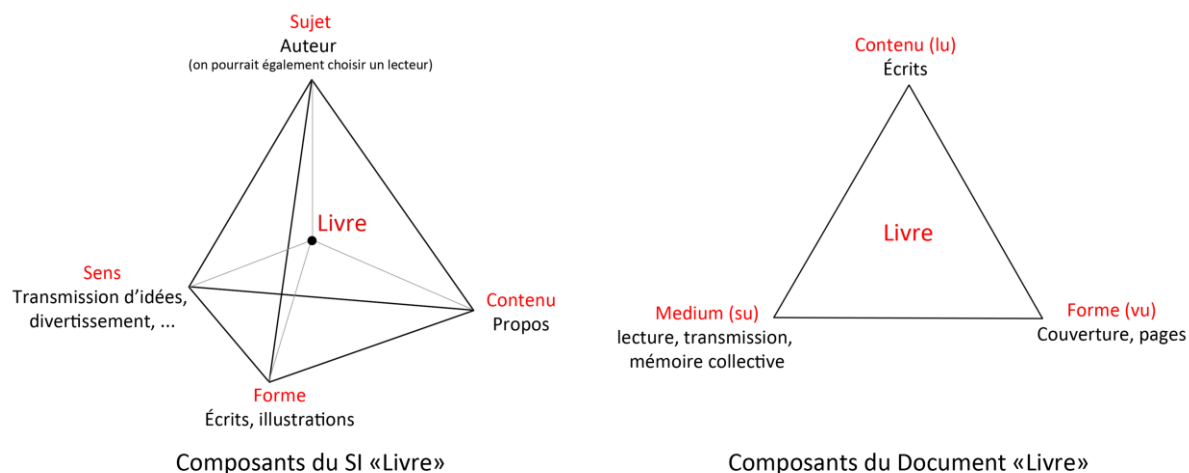


Figure 43 : Comparaison des entités SI et Document sur un exemple.

#### 4.1.5.3 L'Ontologie Sémiotique

Manuel Zacklad et son équipe du Tech-CICO de l'Université Technologique de Troyes prônent un Web Socio-sémantique combinant les approches du Web Social (fondé sur les réseaux sociaux et les interactions entre usagers) et le Web Sémantique (fondé sur la formalisation des connaissances pour leur exploitation par des programmes informatiques). Le Web Socio-sémantique se veut adapté aux activités coopératives, ouvrant les points de vue, plutôt qu'à la formalisation à tout prix, qui les réduit en cherchant à automatiser les comportements (ce que Zacklad appelle la « remontée des couches du cake sémantique »). Il estime en effet que la plupart des connaissances ne peuvent être formalisées, et que le langage naturel sur le Web ne doit pas être systématiquement écarté au profit des langages formels dans l'aide à la navigation et à la recherche de connaissances. Il considère ainsi que la sémantique formelle n'exprime qu'une partie des contenus sémiotiques : ceux composés d'attributs simples, et univoques. Il propose donc de définir des ontologies sémiotiques pour caractériser des contenus issus de transactions complexes [70]. Une ontologie sémiotique est un système de classification contextualisé et partagé par une communauté. Par rapport à l'ontologie différentielle proposée par Bachimont [4], reposant essentiellement sur l'analyse d'extraits de texte, l'ontologie sémiotique se fonde sur une approche situationnelle plus large et non nécessairement textuelle. Ces deux notions semblent toutefois assez proches : elles se fondent sur le langage naturel et précèdent toute formalisation.

La construction d'une ontologie sémiotique repose sur l'extraction d'expressions stéréotypées à partir de transaction communicationnelles. Ces expressions constituent alors des concepts sémiotiques, organisés suivant des points de vue. Chaque point de vue représente une signification particulière de l'expression, dépendante de la finalité de son usage, de son auteur, du contexte de production, etc. Ces concepts sémiotiques, issus d'accords définitionnels entre les membres de la communauté, doivent permettre des parcours guidés vers des finalités identifiées, mais non réduites à des processus automatiques. Si l'auteur reconnaît bien une formalisation dans ce processus de

construction d'une ontologie sémiotique, cette dernière est réalisée de façon à ouvrir le sens des expressions manipulées, et non à les fermer en vue d'un traitement automatique.

Cette approche a été implémentée dans un outil appelé HyperTopic [71], dédié à la réalisation d'enquêtes collaboratives. Ces enquêtes consistent en l'analyse de différents **Items** du domaine considéré. À chaque Item peuvent être rattachées des **Ressources** (documentation, vidéos, images, etc.). Un item peut présenter plusieurs **Thèmes** et **Attributs standards** (essentiellement des métadonnées). Chaque thème est étudié selon différents **Points de vue**, émanant des catégories d'acteurs participant à l'enquête.

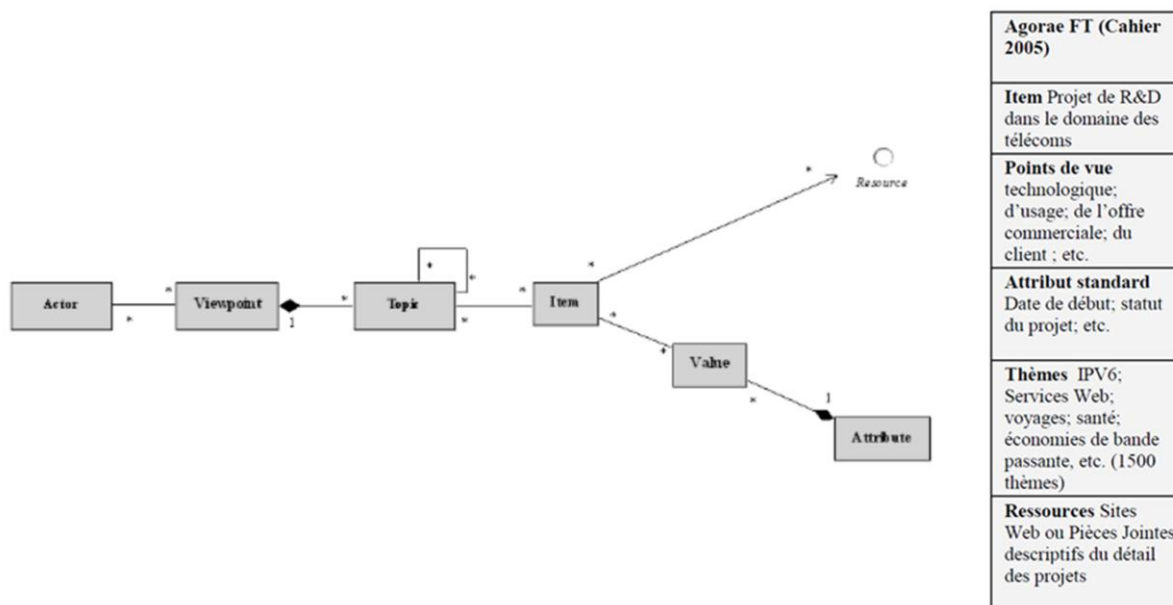


Figure 44 : Diagramme de classe UML de l'outil HyperTopic et exemple d'application sur un programme de valorisation de projets R&D (extraits de Zacklad et al. 2007 [71]).

La Figure 44 détaille le diagramme de classe UML de cet outil et présente un exemple d'application sur des projets de Recherche et Développement. La gestion des points de vue semble particulièrement intéressante dans notre contexte, puisque l'on souhaite gérer des savoir-faire via des interprétations. Cependant, on relève des difficultés liées à l'usage d'HyperTopic pour notre propos. En effet, dans la gestion des signes, l'usager n'est pas uniquement un observateur : il produit également un contenu qui est la substance de son interprétation et peut être réutilisé pour résoudre des problèmes techniques ou expressifs. Ce constat se vérifie particulièrement en musique, où l'interprétation est ambivalente : elle est à la fois le regard que pose l'interprète sur l'œuvre (ce qu'elle lui évoque), et une nouvelle production artistique en soi. Dans un contexte pédagogique, il peut s'agir d'une technique personnelle pour jouer un passage requérant un geste spécifique à maîtriser. La pertinence de cette technique peut ensuite être discutée, par exemple selon le contexte d'application. Ces considérations posent la question du processus d'acquisition des points de vues/interprétations. Les projets<sup>43</sup> exploitant le modèle HyperTopic génèrent des catalogues ou des annotations textuelles. La gestion de savoir-faire requiert de pouvoir capturer également des sons, des gestes ou des animations. On s'intéresse de plus à l'explicitation des interprétations et aux liens

<sup>43</sup> <https://github.com/Hypertopic/Protocol/wiki>, visité le 13/08/2013.

pouvant exister entre elles. Ces points nécessitent une modélisation fine des interprétations elles-mêmes, ce que nous proposons de réaliser avec le Signe Interprétatif.

L'ontologie sémiotique implémentée par HyperTopic reste une des rares initiatives du domaine de l'ingénierie des connaissances pour se détacher du « tout formel » au profit des interactions entre usagers pour la gestion de situations transactionnelles complexes. Dans cet esprit, nous considérons que le formalisme doit suggérer de nouvelles pistes d'études et non les restreindre. Notre modèle de Signe Interprétatif s'inspire donc de cette approche pour la gestion d'interprétations dans un cadre éducatif et culturel.

Dans la partie suivante, nous mettons en évidence l'intérêt et les objectifs de la gestion des Signes par rapport à la gestion des Connaissances, à travers deux exemples d'échange de savoir-faire entre apprenants.

### 4.1.6 De la Connaissance au Signe

L'ingénierie des connaissances s'intéresse communément à la représentation de connaissances à l'aide de modèles prédéfinis : schémas conceptuels, taxonomies, ontologies, etc. Mais elle tend à ignorer ensuite les processus de construction ayant permis d'aboutir à ces modèles et de leur attribuer un sens : les interprétations. Finalement, utiliser un modèle plutôt qu'un autre, c'est adopter et se conformer à l'interprétation d'un modélisateur : les propriétés qu'il a choisi d'inclure ou d'exclure, son système de représentation et son langage. Cette façon de procéder est adaptée aux domaines formels, on l'on cherche à réduire au maximum les interprétations possibles, afin d'aboutir à une représentation unique de chaque objet.

Cependant, certains domaines pratiques reposent justement sur la multiplication et la confrontation des interprétations, qui peuvent être modifiées, réadaptées, réajustées en cours de route. Ces dernières sont les matières premières des réflexions menées au sein du domaine. C'est notamment le cas dans les domaines culturels, riches de techniques et méthodes appliquées différemment selon les individus et les situations. Chacun peut alors construire sa propre interprétation d'une œuvre et la comparer à celles des autres, ou tout simplement l'améliorer suite à une réflexion ou une expérience personnelle. De plus, dans le cas particulier du savoir-faire, l'importance de la pratique amène à l'usage de méthodes tacites, qui gagneraient à être montrées et explicitées à l'aide de documents multimédias. Pour ce faire, on propose de capturer des Signes Interprétatifs, objets sémiotiques illustrant des interprétations, en sus d'une modélisation sémantique adaptée à la gestion d'interprétations. Il convient d'abord de bien distinguer quels types de SI peuvent être extraits d'une activité de transmission de savoir-faire.

Nous étudions donc deux exemples pratiques (dont l'un a été présenté dans la partie problématique). Ces exemples nous permettent également d'identifier les SI en jeu et leurs composants dans la description de savoir-faire par des membres d'un forum de discussion.

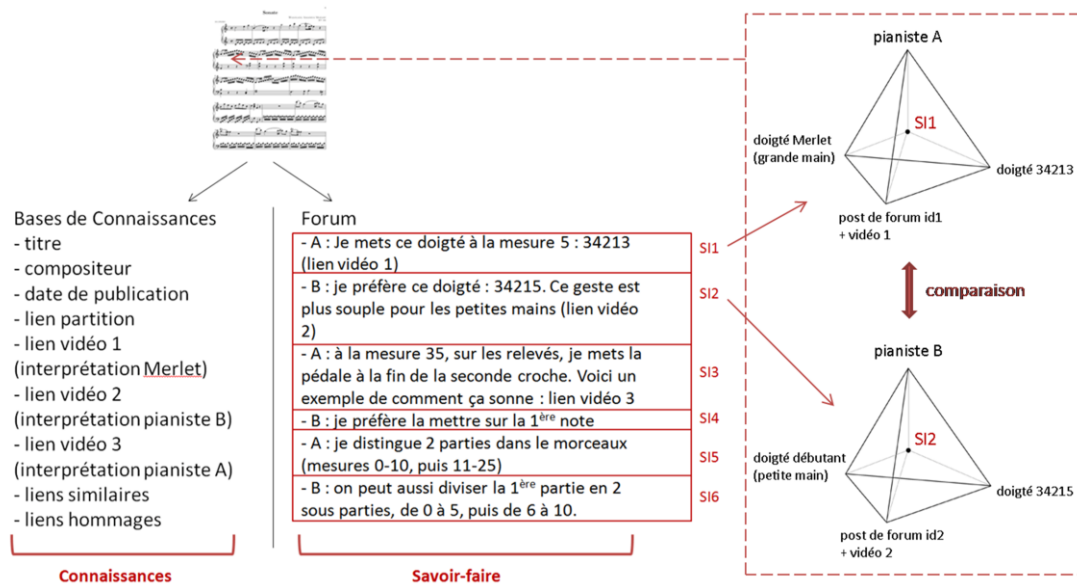


Figure 45 : Identification de Connaissances et de SI dans une discussion portant sur l'étude d'une pièce en piano

Dans l'exemple de la Figure 45, deux pianistes partagent leurs astuces pour surmonter les difficultés d'un morceau. Les ontologies actuelles permettent de décrire les connaissances suivantes : métadonnées de la pièce (titre, compositeur, date), ressources (interprétations audio, vidéo, concerts, partitions) et pièces liées (similaires, hommages, etc.). Mais il n'existe pas de modèle permettant de décrire précisément des interprétations subjectives avec une syntaxe formelle. Ces dernières sont trop variables et complexes pour être formalisées : en musique, elles peuvent être simplement une affaire de préférence (goût, esthétique). Toutefois, on peut tenter de les structurer en appliquant la grille de notre modèle de Signe Interprétatif. Ainsi, on peut identifier le contenu véhiculé, sa forme et son sens selon les points de vue des deux pianistes A et B. Cette structuration permet d'identifier clairement les points de vue des deux pianistes sans les isoler de leur contexte de validité (ici, la mesure 5 de la Sonate). Les questions suivantes se posent alors :

- Comment représenter des SI dans un environnement informatique, en identifiant leurs quatre composants de façon explicite ? Peut-on utiliser les technologies existantes (bases de données, ontologies) ?
- Comment permettre aux usagers de saisir des SI simplement (dans le meilleur des cas, une telle saisie ne demande pas plus de travail que la création du post sur le forum de discussion) ?

Pour répondre à ces questions, nous proposons respectivement un modèle informatique et une méthodologie d'acquisition de SI fondés sur l'annotation et les logiques descriptives dans la partie 4.2. La modélisation des savoir-faire en jeu s'effectue alors au fur et à mesure que des significations partagées et validées par les usagers émergent. Cela peut se traduire par la co-construction de modèles descriptifs d'objets du domaine, où la conception d'ontologies adaptées à la description des interprétations (voir exemple en musique dans la partie 4.3.4).

Il convient de bien prendre en compte le contexte de l'interprétation en cas de formalisation poussée. Par exemple, la règle « notes  $n_1, n_2, \dots, n_5 \Rightarrow$  doigté 34213 » est contextuelle : elle peut dépendre du style de pièce considéré, des passages avant et après le doigté décrit, du niveau et de la morphologie de l'interprète. Si un musicien expérimenté s'adapte au contexte de façon quasi automatique, un débutant a plus de mal à trouver un doigté optimal dans des cas difficiles. L'étude des SI a donc également pour objectif d'identifier ce contexte sur de nouveaux cas. Par ailleurs, lorsqu'une interprétation traite plus particulièrement de concepts esthétiques ou expressifs, l'établissement de règles reste encore plus délicat. Le passage dans les couches hautes du « cake sémantique » (raisonnement, preuve) doit donc être étudié avec attention selon le contexte d'application (aide technique, réalisation expressive, etc.). La composition semi-automatique de SI est discutée dans la partie 5.3.

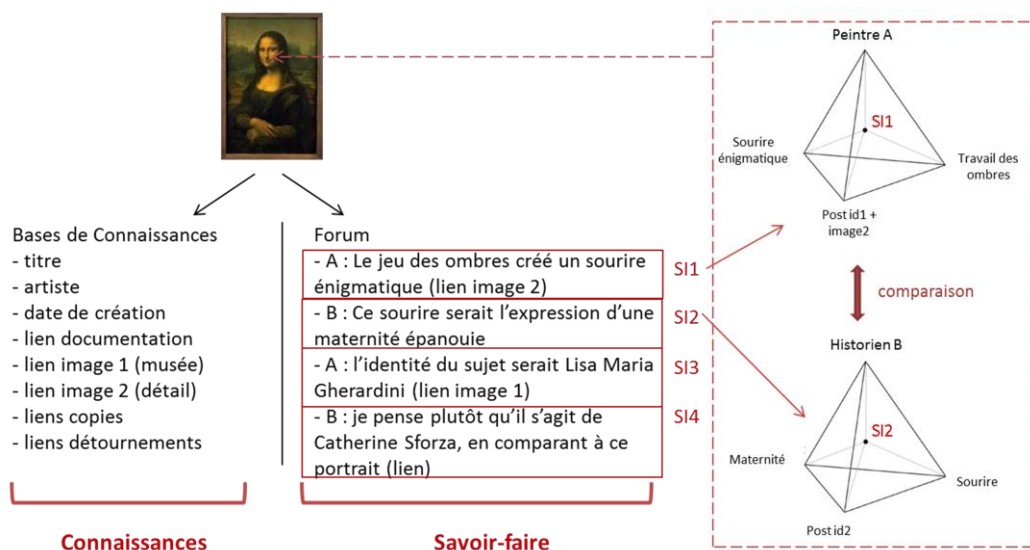


Figure 46 : Identification de Connaissances et de SI dans une discussion portant sur l'étude d'un tableau

La Figure 46 présente une autre décomposition d'échanges informels suivant le modèle tétraédrique du Signe que nous avons défini. Si sur le premier exemple, le sens du SI2 pouvait être considéré comme une **adaptation** du SI1, sur ce deuxième exemple, il s'agit plutôt d'une **précision**. La comparaison d'interprétations est essentielle dans la pratique des savoir-faire. Être capable de nommer les liens entre ces différentes approches serait pertinent dans le cadre d'une base de savoir-faire, afin de naviguer et d'effectuer des recherches parmi les interprétations. On met également en évidence les rôles des interprètes : les distinctions relevées entre leurs ressentis peuvent être dues à leurs profils (fonction, âge, sexe, expérience). L'étude des interprétations implique donc indirectement une étude des interprètes.

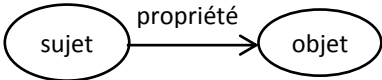
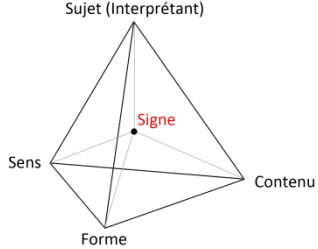
Enfin, on note l'importance de la contextualisation des SI sur les deux exemples : les interprétations portent ici sur un détail de l'objet étudié. Suivant le contexte, les SI peuvent avoir des significations différentes. Dans la mesure du possible, il faut donc disposer d'une description logique fine de l'objet interprété afin d'adresser précisément ses éléments constitutifs les plus élémentaires : les notes d'une partition, les zones d'un tableau, un timecode d'une vidéo, etc.

Pour résumer, les intérêts pressentis du modèle tétraédrique du SI sont multiples. On souhaiterait ainsi pouvoir :

- Dégager les principales interprétations d'un objet (ses significations) : distinguer les plus communes des plus originales, esthétiques, audacieuses, provocantes ou anticonformistes, et comprendre les techniques qui permettent d'aboutir à ces résultats. Cette base serait interrogeable indépendamment de toute application de e-Learning.
- Permettre aux usagers de saisir et d'illustrer leurs interprétations d'une manière simple et réutilisable, selon une démarche propre à domaine considéré.
- Répondre à des questions pratiques et techniques précises à l'aide de ressources multimédia réutilisables : exemple : comment jouer une note faiblement au piano ? Suivant le contexte (classique, romantique, juste une note ou toute une phrase), la réponse peut varier.
- Trouver une solution personnalisée pour un problème donné. Par exemple, après avoir testé le doigté donné par le pianiste A et l'avoir trouvé trop difficile par rapport à la taille de sa main, le pianiste C pourra rechercher un doigté adapté à sa morphologie et trouver celui décrit par le pianiste B. La construction de son interprétation pourra être inspirée des travaux des pianistes précédents, sans pour autant en être une copie conforme.
- Concevoir des agents d'aide à l'interprétation : suggérer des pistes d'études d'une œuvre, des méthodologies, trouver automatiquement les points d'intérêts par type (complexité, polysémie, motif remarquable, difficulté technique, contrastes). Ces agents n'auraient bien sûr pas pour objectif de remplacer un professeur, à même de réagir au mieux aux difficultés d'un apprenant, mais plutôt de suggérer des ressources intéressantes par rapport aux problèmes détectés.

Finalement, l'objectif principal du SI n'est pas de remplacer la description sémantique à l'aide d'une ontologie : elle lui est complémentaire. Plus précisément, elle s'inscrit essentiellement en amont d'une formalisation, lorsque des individus réfléchissent à des méthodes pour résoudre un problème pratique sur un cas concret. L'idée de notre modèle de SI est d'identifier les différentes approches, de les comparer, et d'en extraire éventuellement une règle contextuelle afin de constituer une base de pratiques. Au regard des deux exemples ci-dessus, le Tableau 2 résume les principales distinctions mises en évidence entre gestion des Connaissances (à l'aide d'ontologies formelles) et gestion des Signes (à l'aide de SI) pour la transmission de savoir-faire.

Tableau 2 : De la description sémantique à la description sémiotique.

	Description Sémantique	Description Sémiotique (SI)
Définition	Représentation d'une connaissance à l'aide de concepts et de relations issus d'une ontologie	Représentation d'une interprétation d'un objet par un sujet (Contribution : définition d'un Signe Interprétatif [58])
Schématisation		
Objets représentés	Connaissances univoques, faits	Interprétations, transactions complexes, polysémiques



<b>Champs d'applications</b>	Bases de Connaissances pour les sciences exactes, applications commerciales, gestion de documents.	Bases de Signes pour les savoir-faire artistiques, la culture, les pratiques traditionnelles, le e-Learning. (Contribution : <b>structure et peuplement d'une Base de Signes [58]</b> )
<b>Objectifs</b>	Permettre à un programme informatique de saisir le sens d'une entité identifiée par une URI. Générer de nouvelles connaissances à l'aide de règles logiques : requêtes complexes, segmentation, classification, etc.	Structurer des interprétations personnelles pour créer une base de savoir-faire pratiques. Partager des interprétations explicitées et illustrées sur le Web. Identifier des règles pratiques. Créer des agents d'aide à l'apprentissage pour les plateformes de e-Learning.
<b>Modélisation</b>	RDF (Resource Description Framework), OWL (Web Ontology Language)	RDF + Annotation Sémiotique (Contribution : <b>modèle d'Annotation Sémiotique [58] [57]</b> )
<b>Standards et Technologies</b>	RDF-Schemas, OWL, SKOS RDF-XML, Turtle SPARQL	Standards usuels du Web (RDF, XML, HTML, etc.) + formats multimédia (MPEG, FLV, MP3, etc.)
<b>Méthodes d'acquisition</b>	Encodage des connaissances à l'aide des technologies développées par le W3C, tagging, inférence.	Plateformes collaboratives d'annotation sémiotique (Contribution : <b>prototype de plateforme d'annotation sémiotique de partitions musicales [54]</b> )
<b>Approches</b>	Approche formelle, mathématique, homogénéisation, fermeture sémiotique.	Ouverture sémiotique, sociale, hétérogénéité des points de vue.

Proposer des technologies abouties pour la modélisation et la saisie de Signes en informatique est bien sûr un travail conséquent, dépassant le cadre de travaux de thèse. Notre recherche se concentre donc sur la modélisation du Signe Interprétatif dans un environnement informatique et sur une première implémentation dans un environnement de partage de savoir-faire musicaux.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous proposons un modèle de SI adapté à un environnement informatique pour la gestion de savoir-faire : l'Annotation Sémiotique (AS).

## 4.2 Modélisation du Signe Interprétatif en informatique

### 4.2.1 L'annotation comme modèle de SI numérique

Pour capturer et partager des savoir-faire pratiques de haut niveau, nous souhaitons manipuler des Signes Interprétatifs dans un environnement numérique. Les SI existent sous une multitude de formes matérielles : un livre, un tableau, un panneau, un article de presse, un album de musique, une critique de film, etc. Afin de les manipuler dans un environnement informatique, on fait correspondre chaque composant du SI à une entité numérique :

- le **sujet** est le créateur du SI. Il dispose ici d'une identité numérique, communément un profil enregistré sur une plateforme de partage de savoir-faire.
- le **contenu** doit être capturé et numérisé afin d'être exploité dans un environnement informatique. Dans notre modèle numérique de Signe Interprétatif, il s'agit donc d'un ensemble de **données** véhiculant la substance de l'interprétation. Il peut s'agir par exemple d'un fichier multimédia (vidéo, audio) présentant le point de vue du sujet de manière concrète et directe (on « montre » le savoir-faire). Dans le meilleur des cas, cette donnée est intégrée à un environnement immersif permettant de recréer les conditions idéales de partage de savoir-faire entre le sujet et le destinataire du SI [52] (contrôle des angles de vue, ralentissement, etc.). Les données doivent être des plus expressives (gestes, sons, émotions), ce que le texte seul ne permet pas.
- la **forme** du SI est modélisée à l'aide d'**informations**. Ces informations permettent de lier les données entre elles afin d'identifier clairement le contenu et le contexte du SI dans l'environnement numérique considéré. Ce composant du SI numérique contient donc des

métadonnées et documents numériques permettant de préciser le contexte de validité de l'interprétation décrite par le sujet.

- le **sens** donné par le sujet au SI est représenté sous forme de **connaissances**. Ces connaissances peuvent s'énoncer selon deux modes distincts :
  - **Interpersonnel (entre sujets)** : une explicitation textuelle du savoir-faire ou de l'interprétation décrite par le sujet au travers du SI, à destination de toute la communauté. Cette description permet de nommer et expliquer les méthodes, techniques et règles en jeu, les effets obtenus, les problèmes rencontrés (dans le cas d'une demande d'aide) à l'aide du langage naturel. Elle résume les savoir-faire ou problèmes évoqués dans le contenu du SI.
  - **Computational** : une description sémantique permettant à la machine d'opérer des traitements automatiques sur cet élément de savoir-faire (classification, référencement, contextualisation, recommandation, raisonnement à partir de cas, etc.). Cette description peut-être rajoutée à posteriori, lorsque le langage adapté aura été défini et/ou suffisamment enrichi pour exprimer le savoir-faire (ou une partie de ce savoir-faire) évoqué.

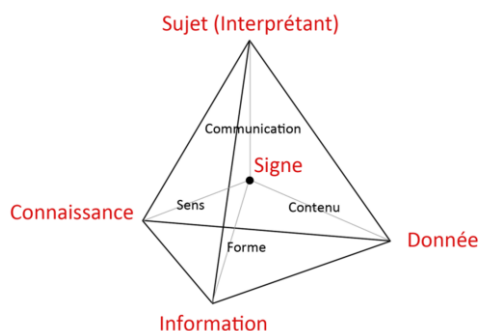


Figure 47: Représentation tétraédrique du SI Numérique [13]

On nomme cette structure Signe Interprétatif Numérique (SIN). La Figure 40 présente les différents composants du SIN sous forme de tétraèdre. Ces composants constituent différents niveaux de représentation de l'interprétation dans un environnement numérique : réel (donnée), symbolique (information) et cognitif/formel (connaissance). A l'instar des interprétations qu'il représente, le SIN peut évoluer pour donner naissance à d'autres SIN. Si le sujet modifie l'un de ses composants (car son interprétation de l'objet a

évolué par exemple), un nouveau SIN sera généré. En effet, comme vu dans la partie 4.1.3, le Signe Interprétatif décrit l'interprétation d'un sujet à un moment donné. Cette interprétation est tout à fait susceptible de changer en fonction de l'expérience du sujet. Générer un nouveau SIN permet de conserver la précédente interprétation, afin d'effectuer des comparaisons entre sujets, mais aussi réflexives (un seul sujet). Afin d'illustrer ce modèle, nous reprenons les SI présentés dans la partie 4.1.3 et les implémentons sous forme de SIN (Figure 48).

Sur l'exemple (A) le composant « Donnée » consiste en une vidéo montrant comment appliquer le doigté choisi dans la pièce. Le composant « Information » précise le contexte de validité de ce doigté, c'est-à-dire l'extrait de la pièce concerné. On dispose alors d'informations sur la pièce (titre, compositeur), de sa partition, et du numéro de mesure concerné sur la partition. Ces informations peuvent également être des tracés, des schémas ou des symboles sur la partition. Enfin, le composant « Connaissance » consiste en un court texte expliquant le choix de ce doigté et comment le réaliser, ainsi qu'une description sémantique sous forme de tags (exemple : #technique, #doigté, #expression). Ces éléments ne sont pas forcément tous créés par le Sujet (ici, un musicien) : ce dernier peut utiliser des ressources préexistantes, dans la mesure où il dispose des autorisations nécessaires pour le faire (exemple : partitions du domaine public). Le principe en jeu, suivant le domaine, peut être de donner du sens aux nombreuses ressources disponibles sur le Web.

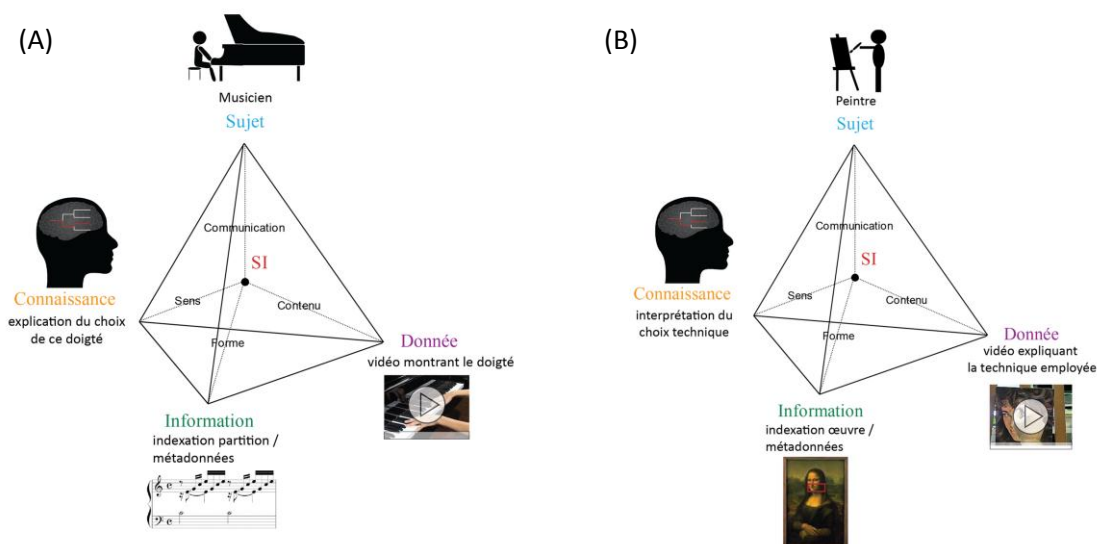


Figure 48 : Exemples de SIN en musique et en peinture.

Sur l'exemple (B), le peintre pointe une vidéo expliquant la technique employée par De Vinci sur son tableau : il s'agit de la partie donnée du SIN. Cette vidéo est rattachée à une partie d'une image bitmap de haute résolution du tableau, à l'aide d'une sélection rectangulaire. La partie information est donc constituée des éléments suivants : l'image du tableau et ses métadonnées, les coordonnées en pixels du rectangle de sélection identifiant le contexte du SIN. Comme sur l'exemple précédent, la partie connaissance comporte une explication textuelle de la technique et de la raison pour laquelle celle-ci a été employée (les émotions ou idées qu'elle permet de véhiculer), ainsi que les tags appropriés (#glacis, #énigme, #ombres).

Cette structure se veut des plus expressive possible, afin d'être utilisée pour des interprétations complexes de haut niveau. Dans certains cas simples, il est possible que seule une partie du SIN soit renseignée (exemple : un simple commentaire sur un document est déjà en soi un SIN, même incomplet). D'une part, les autres composants peuvent être renseignés a posteriori par le sujet, et d'autres parts les interprétations peuvent être simples et non-équivoques dans certains cas techniques évidents. Ainsi, en musique par exemple, un SIN préconisant d'apprendre rapidement par cœur une partie du morceau n'a pas nécessairement vocation à être illustrée par un contenu, l'activité « apprendre par cœur » ne prêtant pas vraiment à confusion quant à sa réalisation effective (bien que la raison de cet apprentissage spécifique puisse être questionnée). L'illustration ou non du conseil ou de la question est laissée libre à l'utilisateur de la plateforme. Le service d'annotation pourra toutefois recommander la saisie d'un contenu multimédia en cas de détection d'expressions du domaine requérant une illustration ou une démonstration. Ainsi, des expressions ou des termes tels que « sonorité », « émotion », « couleur », « timbre », « geste » nécessitent plus souvent d'être explicités dans leurs contextes d'utilisation que « partition », « canevas », « pinceau », « apprendre », « attention à », dont les sens sont relativement stables et partagés par les différents sujets.

Concrètement, on choisit de saisir et stocker les SIN sous forme d'annotations. En effet, les exemples vus précédemment peuvent être saisis et affichés en tant qu'annotations de ressources représentant des œuvres. Cette implémentation requiert un document de référence, partagé entre les usagers, sur lequel apposer les annotations-SIN afin de disposer de leur contexte. En musique, ce document peut être une partition, en cuisine, une recette, en danse, un schéma des mouvements successifs. Ce choix

s'appuie sur le constat suivant : nombre de savoir-faire disposent d'un support de référence pour repérer des difficultés, partager des astuces, expliquer des techniques et des effets. Ainsi, nous avons vu dans la partie 3.2.1 l'importance de l'annotation de partitions en musique classique.

On pourrait y opposer que beaucoup de savoir-faire traditionnels s'appuient sur une transmission exclusivement orale. Il s'agit en effet du mode privilégié de transmission des savoir-faire, dans le meilleur des cas : la personne qui sait montre comment faire à celle qui ne sait pas, et peut corriger en temps réel ce qui ne va pas. Mais le support écrit, nécessitant une codification des gestes et des sons à produire, a justement été inventé parce que ce contexte idéal est très exigeant. Il nécessite la présence continue du professeur, à chaque moment où l'apprenant le requiert (oubli d'un élément, difficulté technique, risques, etc.). L'absence totale de support d'apprentissage réduit de plus le nombre total de pratiquants à un petit nombre d'initiés, les professeurs étant bien moins nombreux que les potentiels apprenants, et pas toujours aussi disponibles que ce que ces derniers souhaiteraient (ou du moins requerraient).

On pose également la question du type de support d'apprentissage : la partition, la recette, le schéma proposent une restitution spatiale de l'information, même si le déroulement temporel y est suggéré (via une lecture linéaire, ou la séparation en étapes du document), alors que la vidéo et l'audio s'appuient sur une restitution temporelle de l'information [4]. On peut tout à fait imaginer lier les contenus des SIN (interprétations secondaires) sur d'autres contenus audiovisuels, qui seraient dits « de référence » car interprétés par des experts (interprétations principales). C'est ce qui a été fait sur la plateforme FIGS, présentée dans la partie 3.1.5.1. Bien que le système de gloses soit un moyen innovant d'instaurer une communication entre apprenants et experts, il y manque une possibilité importante dans la pratique instrumentale classique : celle donnée au musicien de visualiser toutes ses annotations (sous forme symbolique) pendant qu'il joue, directement sur la partition. Ces points justifient le recours à un document de référence de forme sémiotique spatiale pour la gestion des SIN, aussi simple soit-il. Bien sûr, selon l'encodage de ce document, le contexte du SIN sera plus ou moins explicite. Par exemple, si ce document est une carte, le SIN ne sera pas contextualisé de la même manière selon que la carte soit une simple image, ou une carte interactive géolocalisée. L'objectif est de disposer à tout moment du contexte de l'annotation SIN, y compris pendant la pratique du savoir-faire associé requérant une vision d'ensemble de l'objet à interpréter. Cela n'empêche naturellement pas de synchroniser des documents audiovisuels de référence à ce document « papier », l'idéal étant de pouvoir rattacher les annotations SIN de façon transparente à tous les documents dits « de référence ».

L'annotation présente également l'avantage d'être déjà pratiquée par beaucoup d'apprenants et d'enseignants, comme moyen de communication et support mnémotechnique. Comme le montre la Figure 49, l'annotation peut être créée de façon à faire figurer chaque composant du SIN :

- Le contenu est intégré à l'annotation sous forme de documents multimédia montrant l'interprétation (qui peut être un exercice, un commentaire, une question), d'où l'appellation « annotation multimédia ». Il est important de pouvoir véhiculer le geste, l'émotion à transmettre.

- Le sujet est clairement identifié sur l'annotation : en effet, plusieurs sujets peuvent travailler sur le même document de référence.
- L'information est composée du document de référence qui est annoté, et des métadonnées contextuelles de l'annotation (tracés et symboles liés, données de sélection du contexte). Ils constituent en quelque sorte des intermédiaires entre l'interprétation véhiculée et son sens, à des fins bien identifiées (moyen mnémotechnique pour les symboles, identification du contexte pour les coordonnées de sélection).
- La connaissance est exprimée ici succinctement, au moyen d'un simple titre (topic) et de tags associés à l'annotation. Le titre permet de comprendre rapidement ce qu'exprime le symbole qu'a tracé le sujet sur la partition (son intention) et ce qu'il faut s'attendre à trouver dans la vidéo. Les tags permettent de référencer l'annotation pour pouvoir la retrouver lors d'une requête précise (ici par exemple, « comment jouer une ligne de basse ? », ou « comment faire ressortir une voix dans une pièce polyphonique ? »).

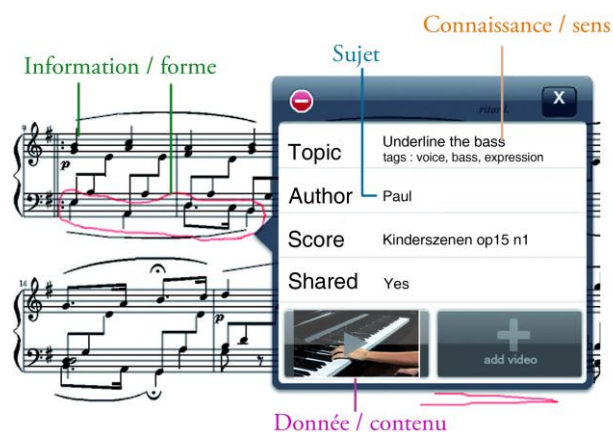


Figure 49 : Implémentation du SIN sous forme d'annotation de documents. Exemple d'annotation sémiotique de partitions électroniques.

Un autre sujet, interprétant le même passage différemment, pourra à son tour créer une annotation multimédia expliquant son point de vue et sa méthode. Il donnera ainsi lieu à une discussion entre les différents musiciens. On nomme cette pratique l'**Annotation Sémiotique**, qui regroupe l'annotation sémantique et l'annotation multimédia dans un environnement collaboratif.

#### 4.2.2 Formalisation de l'annotation sémiotique

Une **annotation sémiotique** est une annotation véhiculant l'interprétation d'un objet par un sujet à l'aide de contenus multimédia contextualisés (démonstration) et explicites (description sémantique). Elle est composée d'un **contenu**, d'une **forme** et d'un **sens** créés par le **sujet**.

On propose de formaliser l'annotation sémiotique afin de vérifier la cohérence des concepts en jeu et faciliter leur modélisation dans un environnement informatique.

Soient  $o \in O$  un ensemble d'objets,  $s \in S$  un ensemble de sujets et  $t \in T$  le temps. Soient  $content \in Content$  un ensemble de contenus multimédia,  $sense \in Sense$  un ensemble de connaissances,  $form \in Form$  un ensemble de métadonnées. Chacun de ces éléments est décrit dans un langage approprié au domaine d'application considéré.

Une fonction d'annotation sémiotique  $a$  est une application de  $O \times S \times T$  dans  $Content \times Sense \times Form$ .  $a(o, s, t)$  est l'annotation sémiotique créée par  $s$  à l'instant  $t$  sur  $o$  par la fonction  $a$ . On a :

$$a(o, s, t) = \langle content, sense, form \rangle$$

Plus précisément :

- *content* est un flux audiovisuel démontrant l'ensemble des gestes, sons, images, émotions et expressions que véhicule  $a(o, s, t)$ .
- *sense* est un littéral (description du sens de  $a(o, s, t)$  en langage naturel) ou un ensemble de prédicats (description sémantique du sens de  $a(o, s, t)$ ).
- *form* est un ensemble de métadonnées de  $a(o, s, t)$  (date, titre, forme de l'annotation, contexte de validité, tracés associés).

L'annotation sémiotique exprime l'interprétation personnelle de l'objet par le sujet à un moment donné au moyen de contenus organisés et explicités.

On peut également définir les ensembles d'annotations sémiotiques suivant :

- $A$  l'ensemble de toutes les Annotations Sémiotiques.
- $A_s = \{ a(o, s, t) | o \in O, t \in T \}$  est l'ensemble des Annotations Sémiotiques de  $s$ .
- $A_o = \{ a(o, s, t) | s \in S, t \in T \}$  est l'ensemble des Annotations Sémiotiques sur  $o$ .
- $A_{os} = \{ a(o, s, t) | t \in T \}$  est l'ensemble des Annotations Sémiotiques de  $s$  sur  $o$ . On a  $A_{os} = A_s \cap A_o$ .

Si  $P(A_o)$  est l'ensemble des parties de  $A_o$ , on peut définir une **fonction d'interprétation de  $o$**  sur  $S$  :  $f_o : S \rightarrow P(A_o)$  qui associe à chaque sujet  $s$  de  $S$  l'ensemble  $A_{os}$  des Annotations Sémiotiques de  $s$  sur  $o$ . On note que  $f_o$  est une fonction injective :

- un sujet  $s$  peut ne pas avoir annoté  $o$  :  $f_o(s) = \emptyset$ ,
- une Annotation Sémiotique n'a qu'un seul sujet, donc  $f_o(s)$  a au plus un antécédent dans  $S$ ,
- si  $s_1$  et  $s_2$  sont deux sujets distincts de  $S$ , alors  $f_o(s_1) \cap f_o(s_2) = A_{os_1} \cap A_{os_2} = \emptyset$  : on considère pour l'instant que l'Annotation Sémiotique est personnelle et ne peut donc être commune à plusieurs sujets. En revanche, on peut avoir  $A_{os_1} \sim A_{os_2}$  :  $s_1$  et  $s_2$  ont des interprétations similaires de l'objet  $o$ . La nature de cette similarité dépend des domaines d'application considérés.

De façon générale, la fonction  $f_o$  permet d'exprimer comment le sujet, avec son profil et son expérience, construit sa vision, son approche de l'objet étudié à l'aide d'annotations sémiotiques.

### **Crédit de l'interprétation**

On propose d'introduire une pondération à chaque annotation sémiotique exprimant le crédit qu'accorde un sujet à une interprétation. Ce procédé peut également servir à prioriser des interprétations se confrontant, fussent-elles issues du même sujet (exemple : différentes hypothèses expliquant un même phénomène).

Pour tout  $a(o, s, t)$  et tout sujet  $s'$ , on définit donc un coefficient  $c_{s'} \in [0,1]$  indiquant le crédit qu'accorde  $s'$  à  $a(o, s, t)$ .

- Si  $s' = s$ , alors le sujet  $s'$  évalue sa propre interprétation,
- Si  $c_{s'} = 0$ , alors  $s'$  pense que l'interprétation portée par  $a(o, s, t)$  est fautive,
- Si  $c_{s'} = 1$ , alors  $s'$  pense que l'interprétation portée par  $a(o, s, t)$  est vraie.

Cette notion de crédit de l'interprétation est reprise et détaillée dans la partie 5.4 sur la validation des annotations sémiotiques.

#### **Relations entre interprétations, relations entre objets**

On peut définir des relations entre les Annotations Sémiotiques afin d'établir des rapprochements ou des oppositions entre les interprétations, indépendamment des objets étudiés. On obtient alors des graphes d'Annotations Sémiotiques. On peut également identifier des relations entre les objets annotés, afin d'identifier des similarités ou des contrastes (voir exemple en musique dans la partie 4.3.4.3). Cependant, une relation entre deux objets distincts n'implique pas nécessairement l'existence de la même relation entre les interprétations respectives de ces objets, même si cette relation est définie sur ces deux ensembles. En effet, soit  $r$  une relation binaire sur  $O$  et  $A$ ,  $o_1$  et  $o_2$  deux objets distincts,  $s_1$  et  $s_2$  deux sujets et  $t_1$ ,  $t_2$  deux instants,  $r(o_1, o_2) \not\vdash r(a(o_1, s_1, t_1), a(o_2, s_2, t_2))$ . Ainsi, même si  $o_1$  et  $o_2$  sont similaires en tout point,  $a(o_1, s_1, t_1)$  et  $a(o_2, s_2, t_2)$  n'interprètent peut-être pas les mêmes aspects des objets étudiés. En revanche, les deux objets étant similaires, on peut induire que les approches utilisées sur l'un peuvent également fonctionner sur l'autre, moyennant des adaptations. On pourrait ainsi dupliquer  $a(o_1, s_1, t_1)$ , l'adapter à  $o_2$  puis l'y attacher, afin de générer automatiquement une nouvelle annotation sémiotique notée  $a'(o_2, s_1, t_1)$ , puis opérer de même avec  $a(o_2, s_2, t_2)$  sur  $o_1$ . Il faut alors prendre garde à ce que les sujets soient conscients d'une telle démarche et puissent valider les nouvelles annotations, qu'il s'agisse de leur pertinence dans leur nouveau contexte ou des adaptations apportées. Un algorithme de génération automatique d'annotations sémiotiques est proposé dans la partie 5.4.

Réciproquement, deux interprétations présentant des approches similaires impliquent-elles que les objets auxquelles elles se réfèrent soient également similaires ? Même si l'on pressent que ce doit être le cas, il faut prendre garde à caractériser précisément le lien existant entre les deux objets. En musique par exemple, si deux annotations illustrent comment jouer avec une sonorité douce et délicate, les passages respectivement annotés doivent effectivement présenter des similitudes en terme d'expression. Pour autant, ils peuvent être écrits de manières très différentes (tonalités, harmonies, contrepoints distincts). Il convient alors de définir avec précision les relations existantes entre les objets du domaine considéré (relations sur  $O$ ), mais également celles existantes entre les interprétations de ces objets (relations sur  $A$ ), qui ne sont pas nécessairement les mêmes. Par exemple, la relation « est mieux expliquée que » peut exister sur  $A$  mais pas sur  $O$ .

#### 4.2.3 Schémas de classe de l'annotation sémiotique

L'annotation sémiotique peut être intégrée aux ontologies de haut niveau existantes (« top level ontologies »), notamment FRBR<sup>44</sup> pour la description de créations intellectuelles. Le schéma de la Figure 50 détaille cette modélisation ontologique. On note que l'expression d'interprétations d'objets par des sujets peut s'intégrer aux schémas usuels du Web Sémantique à condition d'être bien identifiée en tant que tel. Cette intégration implique d'encapsuler toute description susceptible d'être discutée dans une annotation sémiotique. La difficulté est alors d'identifier clairement une frontière entre les descriptions relevant des connaissances du domaine, et celles relevant des interprétations. On décrit notre approche dans ce qui suit.

---

<sup>44</sup> Functional Requirements for Bibliographic Records : <http://vocab.org/frbr/core.html>, visité le 10/04/2013.

L'ontologie FRBR a été choisie comme base de description car elle permet de distinguer les œuvres (*frbr:Work*) de leurs expressions (*frbr:Expression*) et des manifestations de ces expressions (*frbr:Manifestation*). Elle est ainsi propice à la description d'œuvres artistiques. Dans le domaine musical par exemple, une *expression* d'une œuvre peut être une interprétation lors d'un récital ou un arrangement adapté à une formation instrumentale spécifique. Cette *expression* n'a pas nécessairement de forme concrète, contrairement à une *manifestation* résultant d'une publication (exemples : un CD audio, un recueil de partitions ou une vidéo d'interprétation). FRBR permet également d'adresser les parties d'une œuvre, bien qu'elle ne précise pas leur nature. En effet, la définition d'une partie d'une œuvre peut être extrêmement vaste (est-ce également une œuvre ?), et dépend du type d'œuvre considéré. Nous introduisons donc le concept de *WorkPart*, destiné à être spécialisé suivant le domaine considéré : un extrait de roman, un chapitre entier, le sujet ou le décor d'une peinture, un solo musical. On souligne le fait que *WorkPart* existe indépendamment de toute expression ou manifestation de l'œuvre. En effet, on peut faire référence aux éléments du tableau de *La Joconde* (la femme, le sourire, le fond), sans s'appuyer sur une *expression* spécifique de l'œuvre (l'esquisse de De Vinci, l'originale finalisée, ses copies, ses détournements) ou une de ses *manifestations* (l'image au format JPG représentant le tableau original sur Wikipédia). De fait, ce partitionnement peut être subjectif : deux individus n'identifieront pas forcément les mêmes parties, et ne les articuleront peut-être pas de la même manière. Comme indiqué par le dégradé de la Figure 50, l'étape d'identification de parties à l'aide du concept *WorkPart* ne relève donc pas exclusivement du savoir ou de l'interprétation. Dans certains cas, une structure sera nettement identifiable, dans d'autres, elle dépendra de la sensibilité de l'interprète. On introduit donc la relation *partitionner* afin d'identifier la personne ayant réalisé le partitionnement. FRBR ne précise pas non plus comment extraire ces parties sur diverses manifestations de l'œuvre (exemple : sélection spatiale dans le cas d'un tableau, temporelle dans le cas d'un extrait audio). Nous introduisons donc le concept *Selection* permettant de sélectionner les éléments constitutifs d'une partie d'une œuvre sur une *Manifestation* d'une *Expression* donnée de cette œuvre.

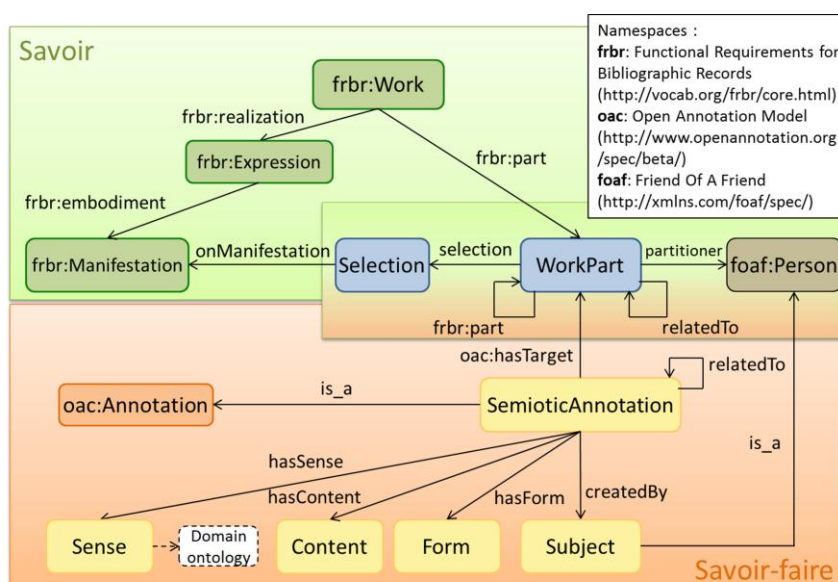


Figure 50 : Schéma de classes de l'annotation sémiotique d'œuvres.

En pratique, les plateformes de partage de ressources définissent rarement les œuvres évoquées par ces dernières de façon explicite. Cela pose d'ailleurs des problèmes de droit (exemple : reprises par



des amateurs de titre musicaux protégés sur YouTube). Dans certaines situations, on travaillera donc directement sur des documents qui pourront être identifiés à posteriori comme manifestations d'œuvres, par exemple en exploitant des bases de Connaissances décrivant ces œuvres ou en les enrichissant si une œuvre n'est pas encore référencée.

Une fois la partie isolée, on peut l'annoter. On passe alors de la description de savoirs plutôt univoques à la description de savoir-faire de sujets, propices aux divergences d'interprétation. L'annotation sémiotique (concept *SemioticAnnotation*) se positionne comme une spécialisation du concept d'*Annotation* de l'Open Annotation Model Data Model (OA) présenté dans la partie 3.2.3. En effet, l'annotation sémiotique peut également posséder un corps (*oa:hasBody*) correspondant au contenu de l'annotation, et une cible (*oa:hasTarget*) correspondant à l'extrait d'œuvre annoté. Toutefois, elle se distingue de ce que propose l'OA :

- L'OA est principalement conçu pour annoter des documents, alors que l'on souhaite annoter des œuvres. La notion d'œuvre doit donc apparaître dans le schéma de classe. De plus, les parties de l'œuvre étudiée ne sont pas uniquement des cibles d'annotations : elles existent indépendamment de toute annotation créée par la suite.
- L'annotation sémiotique met en avant la constitution d'interprétations personnelles et leurs comparaisons par l'intermédiaire de Signes. L'identification des composants du Signe Interprétatif (sens, contenu et forme) au sein de l'annotation est donc essentielle. Dans le cadre du concept *oa:Annotation*, ces derniers seraient inclus indistinctement via la relation *oa:body*, ou seraient répartis dans différentes annotations interconnectées. La spécialisation *SemioticAnnotation* permet donc de visualiser la même annotation de différentes manières, qu'il s'agisse d'un usager visualisant son contenu audiovisuel ou d'un programme parcourant sa description sémantique pour déterminer si elle répond à un problème donné. Elle va également permettre d'établir des relations entre annotations sémiotiques (voir ci-dessous).

Notre travail porte donc essentiellement sur le concept *SemioticAnnotation*. Ce dernier permet d'exprimer l'interprétation d'un sujet (*Subject*) sur l'œuvre, à l'aide des composants forme (*Form*), contenu (*Content*) et sens (*Sense*) décrits précédemment. L'immersion de l'annotation sémiotique dans un domaine particulier s'effectue notamment via le concept *Sense* qui peut être rattaché à une ontologie de domaine (musique, peinture, biologie, etc.) ou tout simplement à une explication en langage naturel du contenu véhiculé.

Les différentes annotations sémiotiques créées peuvent être mises en relation. La Figure 51 détaille les différentes relations possibles. D'autres peuvent être créées suivant les besoins des usagers de la plateforme d'annotation et les pratiques en cours dans le domaine considéré. Globalement, les relations entre annotations peuvent être divisées en deux catégories : celles relevant d'un dialogue entre les sujets (*question, answer, comment, validation, reaction, etc.*), et celles caractérisant une démarche personnelle. En effet, un sujet peut établir des liens entre ses annotations sémiotiques. Ces dernières constituent alors des traces de ses réflexions passées. Le sujet peut ainsi définir une nouvelle interprétation comme étant une amélioration (relation *enhancement*), voire le résultat final (relation *finalVersion*) de ses essais. Ces Signes « non aboutis » constituent des traces concrètes du processus psychologique de signification détaillé dans la partie 4.1.4. On note que ces relations peuvent s'effectuer aussi bien au niveau de l'annotation sémiotique globale, qu'au niveau de ses

composants. On peut ainsi imaginer que deux annotations sémiotiques de deux sujets distincts présentent la même signification de l'œuvre, mais à l'aide de contenus différents.

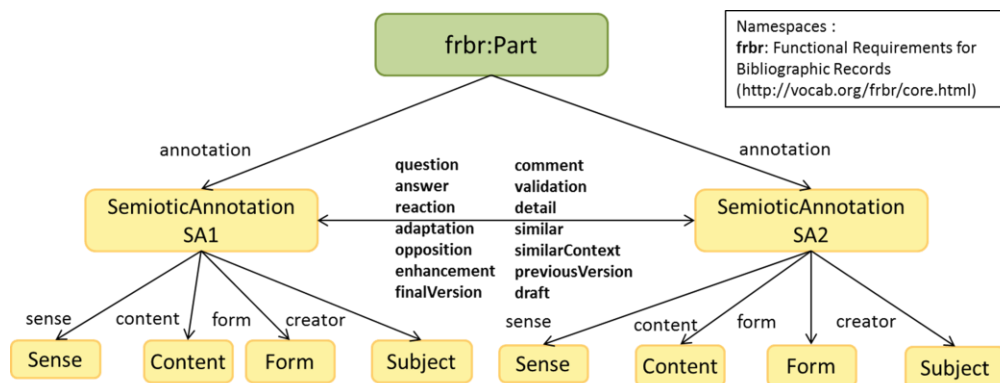


Figure 51 : Schéma de classes : relations entre annotations sémiotiques.

Cependant, la création de telles annotations demande un investissement personnel de la part du sujet, selon le niveau d'expression qu'il souhaite atteindre lors de la description de son interprétation. En musique par exemple, on pressent que dotés d'un outil d'annotation de partitions électroniques, la plupart des musiciens reproduiront les usages de la partition traditionnelles, à savoir y apposer des symboles pour le jeu personnel, et que seule une minorité y ajoutera des contenus multimédia. Il convient donc de proposer des outils appropriés, proches des pratiques du domaine considéré, pour accompagner les usagers dans la saisie de leurs interprétations sous forme d'annotations sémiotique abouties. Nous proposons donc une méthodologie de création de SIN par étapes : la logique descriptive.

#### 4.2.4 Processus de Signification : logiques descriptives et annotations sémiotiques

Les **logiques de descriptions** ont été créées afin de définir la sémantique d'un domaine à l'aide de concepts et de relations logiques entre ces concepts. Les ontologies sont les logiques de descriptions les plus utilisées à l'heure actuelle, notamment avec le développement du Web Sémantique (voir partie 2.1.2). Cependant, une ontologie n'a d'utilité que si elle est effectivement utilisée : sa puissance d'expression ne peut être exploitée qu'à condition que de nombreux cas concrets aient effectivement été décrits en l'employant. Or dans notre contexte, la création de descriptions sémantiques est principalement initiée par les usagers du service d'annotation. Les modalités de saisie de telles descriptions dépendent des domaines concernés et des objets et processus qui leurs sont propres. Comme vu dans la partie 3.2.2, il s'agit essentiellement d'activités de tagging ou d'annotation de corpus à l'aide de formulaires simples. Mais dans des transactions complexes, comme le partage de savoir-faire et d'interprétations, le respect des mécanismes et processus du domaine est essentiel afin d'obtenir des descriptions sémiotiques pertinentes et réutilisables. Notamment, l'illustration des interprétations à l'aide d'annotations multimédia constitue un point délicat dans la démonstration des savoir-faire en jeu. Nous appelons ces processus progressifs des logiques descriptives, à bien distinguer des logiques de descriptions.

Pour un domaine donné, une **logique descriptive** est une démarche d'observation des objets du domaine permettant d'aboutir à des descriptions sémiotiques de ces derniers, du point de vue de l'observateur. La logique descriptive respecte autant que possible les méthodes d'observation propres au domaine considéré et les implémente dans un environnement numérique. L'objectif de la logique descriptive est donc de guider l'utilisateur dans l'expression de son interprétation avec un

minimum de contraintes et en automatisant certaines constructions. La logique descriptive est donc directement liée au processus de signification décrit dans la partie 4.1.4 : elle propose une démarche constructiviste pour passer du Signe phénoménologique au Signe formel.

Le Renard et al. [33] définissent différents types de logique descriptive pour la description d'objets biologiques (systématique), qu'ils appliquent à l'étude des éponges du genre *Hyalonema*. Ils distinguent entre autre :

- La *reconnaissance de traits* : elle consiste à identifier des couples (attribut, valeur) pour chaque objet à étudier. Par exemple, pour représenter le trait "pédoncule torsadé" d'une éponge, on utilisera la notation  $[forme(pédoncule)=torsadée]$ , où *forme* est l'attribut, *pédoncule* l'objet et *torsadé* la valeur de l'attribut *forme*.
- La *logique de composition* : constituant l'essentiel de la description, la logique de composition permet de partager l'objet en différents sous-objets pouvant eux-mêmes être décrits à l'aide d'attributs (descriptions locales).
- L'*expression de l'imprécision* permet d'apporter des nuances dans la description. Elle part de la constatation que de nombreux objets réel sont « imparfaits » (parties manquantes ou endommagées) entraînant des erreurs ou des difficultés d'appréciation de la part des observateurs. Ces nuances sont difficiles à formaliser. Dans le cas de valeurs numériques, on offre par exemple la possibilité d'exprimer la valeur sous la forme d'un domaine (exemple : [10-20 mm] au lieu de 17 mm).
- La logique des *objets multiples* permet d'exprimer le cas où un objet est composé d'autres sous-objets de même type que lui, ou lorsqu'il existe plusieurs sortes d'un même sous-objet (entraînant alors plusieurs logiques de compositions distinctes pour un même sous-objet).
- La *logique de spécialisation* permet de substituer ou supprimer de façon anticipée certaines parties de l'arbre descriptif à partir de certains attributs de l'objet ou du contexte d'étude. Par exemple, étant donné un modèle descriptif d'oiseaux, la description d'un individu « canard » remplacera automatiquement l'objet « pattes » par « pattes palmées ».
- La *logique d'exception* permet d'ouvrir le domaine observable pour gérer les cas particuliers. On pourra par exemple entrer une valeur extérieure au domaine sans pour autant modifier le modèle descriptif, et en prenant garde de prévenir l'observateur. L'exception est un cas complexe et requiert de bien analyser si elle doit être intégrée au modèle ou conserver son statut d'exception.
- Les *points de vue* permettent de spécifier des niveaux d'interprétation. Il peut s'agir d'une échelle d'observation (par exemple microscopique ou macroscopique) ou d'un centre d'intérêt (morphologie, anatomie, cytologie, biochimie ou génétique). Ces niveaux d'observations doivent être liés entre eux afin de passer de l'un à l'autre sur l'objet.

L'objectif de ces logiques est de définir au mieux l'ensemble des *observables* (ce que l'on peut observer, les espèces ou classes), afin de pouvoir ensuite décrire tous les *observés* (ce qui est réellement observé : les spécimens, individus ou instances) suivant le même modèle. Ce modèle est nommé **modèle descriptif**. Selon les auteurs, la construction du modèle descriptif à l'aide des

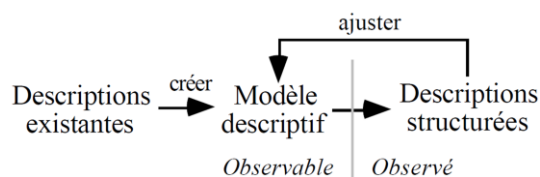


Figure 52 : Construction itérative d'un modèle descriptif (extrait de Le Renard et al. [33]).

logiques descriptives énoncées ci-dessus est un processus itératif : l'observable est sans cesse confronté à l'observé et nécessite parfois des ajustements pour prendre en compte de nouveaux individus présentant des caractéristiques non descriptibles avec le modèle actuel, ou ajuster les descriptions passées suite à un progrès ou une découverte dans le domaine (Figure 52). Le système IKBS (Iterative Knowledge Base System) a été développé afin de permettre à des experts en systématique de mettre en œuvre ce processus de construction itérative de modèles de façon collaborative. Ce système a été appliqué à la description et à l'identification de Coraux des Mascareignes [12]

L'usage itératif des logiques descriptives doit aboutir à la construction d'un modèle descriptif générique et objectif, sur lequel pourront se baser les experts pour comparer les cas sur une base uniforme et exacte. En effet, la variabilité des méthodes de description des experts empêche d'effectuer des comparaisons entre les cas saisis. Le modèle descriptif doit ensuite permettre de mettre en œuvre des applications de détermination/identification ou de classification automatique de cas.

Dans notre contexte, la variabilité et la subjectivité des œuvres à décrire (créations humaines et non de la nature) ont des conséquences sur les types de logiques que l'on favorisera, les résultats obtenus et les usages de telles descriptions. Selon le domaine de savoir-faire considéré, on pourra rencontrer diverses difficultés. Dans le cas particulier de la musique (que nous traitons en détail dans la partie suivante), on se pose par exemple les questions suivantes :

- Peut-on identifier un modèle générique de description de toutes les œuvres ? Faut-il se restreindre à un genre particulier ? La question se pose également en systématique, mais les spécimens y sont moins sujets à l'exception qu'en musique, où les compositeurs s'affranchissent régulièrement des « règles » d'un genre particulier dans une optique de créativité.
- Quel est l'objet à décrire ? L'œuvre (création du compositeur) ou l'interprétation (création de l'interprète, sur la base de l'œuvre) ? Là où les objets biologiques sont uniquement décrits, les objets musicaux sont décrits et exécutés. Doit-on alors considérer l'œuvre comme un modèle et l'interprétation comme une instanciation de ce modèle ? Qu'en est-il de l'improvisation (passages modifiés par rapport à la partition), de l'erreur ?

Les réponses que nous apportons dans la partie 4.3.4 se fondent en fait sur les usages futurs de telles descriptions, à savoir dans notre cas l'éducation. L'objectif étant de partager des interprétations illustrées, un modèle descriptif de l'œuvre interprétée permet de disposer d'un canevas commun pour discuter de celle-ci et comparer les interprétations selon des thèmes et des contextes mis en évidence par les usagers. Pour autant, comme dans l'exemple en systématique, le modèle ne doit pas restreindre les possibilités d'expression et doit pouvoir évoluer en fonction des nouvelles créations initiées par les usagers. Les logiques descriptives que nous proposons sont donc calquées sur les processus d'apprentissage, afin de guider les apprenants et professeurs dans l'annotation sémiotique d'une œuvre.

Plus précisément, la logique descriptive doit nous permettre d'aboutir à un ensemble de SIN contextualisés correspondant à l'interprétation complète de l'objet par le sujet. Chaque SIN détaille et illustre un aspect remarquable de l'objet. La logique descriptive a alors un triple rôle : mettre en évidence la structure de l'objet (ses composants, sous parties, sa structure hiérarchique), révéler ses

éléments caractéristiques (parties complexes, originales, erronées) et les illustrer à l'aide d'annotations sémiotiques véhiculant des interprétations concrètes de ces parties et les techniques pratiques associées. Ce dernier point n'est pas présent dans la gestion des objets biologiques et constitue donc une de nos principales contributions. Les logiques descriptives d'œuvres constituent donc un guide pour l'interprète, à l'interface entre son intention (ce qu'il veut montrer de l'œuvre), son expérience, les méthodes du domaine considéré et le langage de représentation des connaissances de la machine. Si ces dernières s'adressent d'abord aux experts et professeurs pour la construction de leçons dans un contexte éducatif, elles peuvent également servir aux élèves, en signalant par exemple les difficultés rencontrées ou les astuces trouvées. Elles peuvent également aboutir à une classification de l'objet étudié (par genre ou style, niveau de difficulté, etc.).

Dans la partie suivante, nous appliquons les contributions que nous avons proposées au domaine de la musique. Dans un premier temps, nous étudions donc quels sont les Signes Musicaux à traiter, puis nous proposons un modèle descriptif générique pour la description de pièces musicales, selon les logiques en œuvre en musicologie et en pédagogie musicale.

### **4.3 Application : étude des Signes Musicaux**

La musique est un domaine privilégié pour l'étude des Signes. Elle est en effet pratiquée dans le monde entier (avec toutefois des distinctions culturelles) et a fait l'objet de nombreuses innovations, tant pédagogiques qu'instrumentales. Mais par-dessus tout, le domaine musical donne lieu à de nombreuses situations transactionnelles complexes du point de vue sémiotique, délicates à capturer, organiser, expliquer et réutiliser de façon efficace. En effet, la musique peut être perçue comme un système de communication [9], avec un émetteur (le compositeur et/ou l'interprète), un destinataire (l'auditeur), un canal de communication (l'onde sonore), un message (le contenu musical) et un code (l'écriture musicale, principalement basée sur le système tonal en occident). Les modèles présentés précédemment sont donc ici appliqués au partage de savoir-faire musicaux afin de les éprouver sur un cas concret et complexe. Dans un premier temps, on analyse de façon générale les Signes Musicaux employés par les compositeurs et les interprètes. Au travers d'exemples réels, on propose une typologie simple des Signes Musicaux suivant les mécanismes utilisés par les musiciens pour transmettre du sens et « raconter une histoire » aux auditeurs. Dans un deuxième temps, on s'intéresse à la façon dont ces Signes sont transmis aux apprentis musiciens via des techniques instrumentales. Pour ce faire, on analyse le déroulement d'un cours de piano donné par un professeur assermenté. Les Signes Interprétatifs manipulés dans ce cadre pédagogique sont identifiés puis traduits en Signes Interprétatifs Numériques grâce à des annotations sémiotiques. Dans un troisième temps, des logiques descriptives adaptées au domaine musical sont proposées afin d'aider les usagers à illustrer leurs interprétations de façon naturelle et expressive. Ces dernières sont appliquées à un modèle descriptif générique de pièces de musique. On élabore également deux ontologies afin d'établir des descriptions sémantiques des annotations sémiotiques créées par les usagers. Enfin, on pose la question de ce qu'est une bonne description dans notre contexte pédagogique. Une implémentation partielle de ce travail est présentée et évaluée dans la partie 6.2.

#### 4.3.1 Typologie des Signes Musicaux

Les compositeurs mettent au point et utilisent de nombreux Signes Musicaux pour transmettre des émotions, raconter des histoires (opéras, ballets), réagir aux événements historiques (*Étude Révolutionnaire* de Chopin, *Symphonie du Nouveau Monde* de Dvorak), évoquer le divin (messes,

psaumes), faire rêver, séduire, voyager, voire démontrer sa virtuosité. Les Signes Musicaux, à ne pas confondre avec les symboles musicaux (éléments graphiques d'une partition), peuvent s'appuyer sur diverses variables musicales : des timbres d'instruments ou de groupes d'instruments, des structures harmoniques ou rythmiques particulières, ou encore des motifs itérés. Ces Signes Musicaux ont la particularité d'adresser deux niveaux de perception chez l'auditeur : l'un instinctif et primaire (« j'aime, je n'aime pas ce que j'entends ») et l'autre intellectuel, culturel et réfléchi (« je décède et comprends ce que j'entends »). Bien sûr, apprécier une musique n'implique pas systématiquement de lui attribuer une sémantique, l'objectif recherché pouvant être tout simplement le plaisir d'écoute. La musique est régulièrement employée pour illustrer les modèles et outils introduits par les sémioticiens (exemple : Peirce, Barthes). Mais il n'existe que peu de travaux entièrement dédiés à la sémiotique musicale. Dans ses ouvrages [65], le sémioticien musicologue Eero Tarasti étudie les systèmes de Signes de la musique classique. Il soulève la complexité de l'analyse du message musical, suivant les contextes historiques, culturels, sociologiques et psychologiques des compositeurs et auditeurs, et propose des exemples concrets de significations musicales. Le sémiologue et musicologue français Jean-Jacques Nattiez s'est également penché sur ces questions, notamment sur la comparaison des discours musicaux des compositeurs, interprètes et musicologues [40]. Mais rares sont ceux qui l'abordent sous l'angle de l'apprentissage pratique de l'interprétation musicale, avec sa double composante d'exécution (jouer les bonnes notes au bon moment), et d'expression (exprimer le beau).

Afin d'étudier ces significations (processus d'acquisition de Signes Musicaux) d'un point de vue interprétatif, nous introduisons un Signe Interprétatif Musical (SIM) générique suivant le modèle tétraédrique que nous avons présenté précédemment (Figure 53). Le sujet de ce Signe peut être toute personne créant ou écoutant de la musique, peu importe son éducation musicale. Le contenu est l'extrait musical perçu par le sujet : ce dernier doit pouvoir l'identifier clairement comme étant de la musique, et non un contenu sonore quelconque (discussion, bruit, sonnerie, etc.). Le sujet peut prêter attention à des variables précises de ce contenu musical, inconsciemment ou pas. Par exemple un auditeur sera plus sensible à l'harmonie, quand un autre mémorisera surtout les motifs rythmiques présents dans la composition. Pour un même fragment musical, on pourra alors extraire autant de Signes composites que de variables musicales perçues par les sujets. La forme principale véhiculant le contenu musical à ce jour est l'enregistrement audio (restitution « playback »). Mais l'interprétation réelle reste la meilleure forme de restitution musicale, les musiciens transmettant le contenu musical et les émotions associées en temps réel, sans perte d'information. La partition est une forme particulière de musique. Cette forme symbolique permet de faciliter le partage à grande échelle de la musique pour qui veut l'interpréter. Cependant, elle nécessite une étape de décryptage pour prendre du sens. Ainsi, peu d'auditeurs peuvent imaginer comment « sonne » une musique à partir d'une partition. Le sens attribué par le sujet au contenu musical peut avoir plusieurs niveaux, du plus viscéral (plaisir ou dégoût instantané), au plus réfléchi

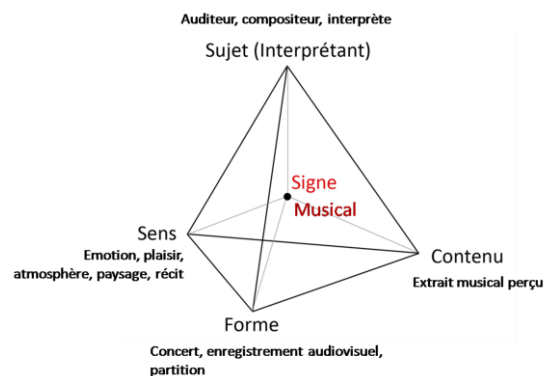


Figure 53 : Modèle de Signe Interprétatif Musical.

(interprétation littéraire, contextuelle, identification des instruments, des notes, des techniques employées pour les auditeurs-musiciens).

La palette des sons et significations associées est alors illimitée, faisant tout l'attrait et le plaisir de composer, jouer ou écouter une œuvre. Cependant, la culture musicale occidentale peut fixer certaines interprétations dans les esprits, en sus de la sensibilité de chacun. Nous proposons d'identifier et de classer les mécanismes musicaux les plus courants et leurs significations afin de mieux appréhender la richesse des Signes Musicaux utilisés par les compositeurs. Le tableau présenté dans l'*Annexe A : Typologie des Signes Musicaux* présente donc une typologie simple et non exhaustive de ces mécanismes avec des exemples de couples signifiant/signifiés courants (différents signifiés pour un même signifiant sont séparés par des virgules). Naturellement, les associations (signifiant / signifié) sont contextuelles et subjectives. Elles servent simplement à illustrer les types de Signes présentés. On n'utilise pas ici la décomposition sujet/contenu/forme/sens du SI car on ne s'intéresse pas encore à la capture d'interprétations de sujets, mais uniquement à l'association entre un contenu musical et son sens possible. Ce travail a bénéficié des retours de plusieurs musiciens, élèves et professeurs, et notamment des conseils avisés de Monique Equoy, musicologue au CNSM de Paris.

Dans une œuvre musicale, ces Signes sont associés par le compositeur pour créer les effets désirés. Ce dernier peut par exemple établir un dialogue entre deux personnages en utilisant deux instruments distincts, l'un « prononçant » une phrase interrogative (motif ascendant), l'autre « répondant » par une affirmation (motif descendant, retour à la tonique). Comme en peinture, le compositeur pour orchestre peut utiliser plusieurs « couches » d'instruments pour poser la trame générale de sa composition (accompagnements, nappes), et faire intervenir plusieurs figures principales (voix, instruments solistes, mélodie principale). La difficulté de la démarche décrite ci-dessus provient notamment du fait que nombre de mécanismes musicaux reposent sur l'association de plusieurs autres. Ainsi, le contrepoint peut être classé aussi bien dans « thème » que dans « harmonie » (celle découlant de l'expression simultanée des thèmes aux différentes voix). Il reste de plus difficile de distinguer clairement la poïétique (sémantique du compositeur, son intention) de l'esthétique (sémantique de l'auditeur, ce que l'œuvre lui fait ressentir) d'une œuvre d'art. La définition d'une Sémiotique Musicale est d'autant plus complexe que l'ambiguïté peut être recherchée et fait partie intégrante de l'attrait d'une œuvre. Néanmoins, les exemples cités précédemment sont encore régulièrement utilisés dans la musique populaire et enseignés dans les écoles de musique. On pourra donc s'appuyer sur cette typologie dans le cadre d'une base de savoir-faire musicaux pour le e-Learning par exemple.

Ces Signes permettent de créer une infinité d'effets. Le savoir-faire de l'interprète est de se les approprier pour les transmettre à l'auditeur. Créateur de l'œuvre au sens scénique, il se pose donc comme intermédiaire entre le compositeur et son public. Cependant, la restitution de ces Signes sous forme d'interprétations peut s'avérer techniquement complexe, requérant des gestes mesurés, une agilité, et des réflexes cognitifs particuliers. Nous définissons donc dans la partie suivante un autre type de Signe Musical adapté à la transmission de savoir-faire musicaux : le Signe Interprétatif Musical Pédagogique. L'objectif est de décrire non seulement l'interprétation musicale (point de vue de l'auditeur écoutant la pièce), mais aussi son exécution (point de vue du musicien jouant la pièce) ayant une répercussion directe sur l'expression musicale. Dans ce contexte, le Sujet est acteur du savoir-faire, soit en tant que dépositaire de ce dernier, soit en tant qu'apprenant. Afin d'identifier

concrètement les techniques que doivent véhiculer ces Signes, nous étudions un cours de piano réel donné par une enseignante professionnelle.

#### 4.3.2 Capture et analyse de Signes dans un cours de piano

Cette étude a pour objectif d'identifier les méthodes pédagogiques pratiques permettant de construire des Signes Musicaux en musique classique. Ces méthodes peuvent également être perçues comme des Signes Interprétatifs puisque chaque musicien a une façon différente d'aborder une pièce. Nous les nommerons Signes Interprétatifs Musicaux Pédagogiques (SIM-P) afin de faire la distinction entre la transmission de pratiques musicales, et la transmission de musique elle-même (vue précédemment). Notre objectif principal est de permettre aux musiciens de décrire leurs méthodes de travail et leurs interprétations de façon collaborative afin de constituer une base de savoir-faire musicaux, ou plus précisément, une Base de Signes Musicaux (voir partie 5.5).

Pour ce faire nous exploitons un enregistrement de cours de piano réalisé au Conservatoire à Rayonnement Régional de La Réunion (CRR). La pièce étudiée s'intitule *Petite Plaisanterie*, du compositeur russe Dimitri Kabalevski. Le cours est donné par Marie-Claude Equoy, professeur de piano au CRR, diplômée du CNSM de Paris, y ayant également enseigné. Cette pièce est considérée comme étant relativement simple et joyeuse, et reste donc régulièrement abordée en 1<sup>er</sup> cycle de piano.

La durée totale du cours est d'environ 25 minutes. Pendant cette durée, le professeur présente seul la pièce et l'anime avec des exemples concrets. Bien sûr la présence d'un élève aurait donné lieu à d'autres interactions : le professeur aurait alors plutôt réagi aux difficultés de l'élève en analysant son interprétation. Cependant, la teneur du cours s'en trouverait changée : on aurait essentiellement des indications personnalisées par rapport au jeu de l'élève, tandis qu'ici le professeur a passé en revue tous les aspects de la pièce qu'un élève aura à traiter dans son travail personnel. Pour ce faire, le professeur a dû se fonder sur son expérience passée, c'est-à-dire toutes les

fois où il a suivi des élèves travaillant cette pièce, voire celles où il l'a lui-même interprétée. La leçon consiste alors en une exploration en détail des points d'intérêts et des techniques à mettre en œuvre pour jouer correctement la pièce. La leçon a été découpée selon les huit points suivant :



Figure 54 : Interface de cours de l'application e-Piano. Le cadre rouge sur la partition désigne la partie expliquée par le professeur. Le menu de droite permet de sélectionner une partie du cours.



- 1/ Introduction
- 2/ Thème
- 3/ Développement
- 4/ Descente la-mi
- 5/ Calendrier de travail
- 6/ Coda
- 7/ Groupes (doigtés, exercices, rythme/altérations)
- 8/ Nuances/expression

Plusieurs caméras et microphones professionnels ont été employés afin de capturer au mieux les gestes et sons à reproduire (Figure 54). La vidéo obtenue a ensuite été découpée selon les huit grandes parties abordées durant la leçon, puis synchronisée à une partition animée afin de faciliter le suivi du cours. Pour ce faire, nous avons mis à profit l'expérience et les moyens acquis sur le projet e-Guitare décrit dans la partie 3.1.5, ainsi que notre propre expérience du piano. L'application Web résultante a été nommée e-Piano<sup>45</sup>.

Afin d'identifier les SI en jeu, nous présentons dans l'*Annexe B : Transcription d'un cours de piano* une restitution écrite partielle de la leçon. Malgré la relative simplicité de la pièce, le professeur y fait apparaître des détails et difficultés généralement insoupçonnés pour le débutant en piano. La durée et la teneur du discours pour une pièce de niveau débutant laisse présager de la complexité et de la finesse des thèmes abordés sur une pièce de haut niveau. On souligne également les points suivants :

- Le déroulement du cours suit à peu près le déroulement linéaire de la pièce (introduction, thème, développement, coda). On va du plus générique (grande partie) au plus précis (motifs). Dans le processus descriptif de la pièce, ce point suggère une logique de composition (voir partie 4.2.4).
- Certains conseils sont valables pour toute pièce de piano (exemples : lignes 42, 44, 45). Il s'agit de prendre très tôt de bonnes habitudes (positions, attitude, expression, gestes, écoute), de les appréhender correctement, afin qu'elles deviennent des réflexes au fur et à mesure des progrès de l'élève. Certains des conseils donnés ici ne sont pas évoqués sur des pièces de plus haut niveau, où l'on considère que l'élève les applique déjà naturellement. La généralité de ces bonnes pratiques conforte la constitution d'une base de SI par les TIC.
- A ce niveau, les points évoqués concernent principalement l'exécution (jouer les bonnes notes au bon tempo) même si l'élève est régulièrement amené à réfléchir à la sonorité finale dans les exercices donnés.
- Le professeur illustre presque constamment ses explications en jouant des extraits de la pièce, parfois en chantant par-dessus. Certains effets à produire ne sont pas exprimés par des mots mais directement par le son, en exagérant ce dernier pour que l'élève le perçoive facilement (ligne 47). Ce point souligne l'importance du multimédia pour la capture des SI.
- Le professeur fait souvent référence à la partition. Dans le contexte du piano classique, elle est indispensable. Toutefois, ce dernier insiste sur l'importance d'apprendre rapidement la pièce par cœur afin de se détacher du texte et se concentrer sur l'expression.
- Les indications de la partition rajoutées par l'éditeur ne sont pas systématiquement appliquées, en particulier pour les doigtés (lignes 27 et 28). Le professeur les corrige avec des

---

<sup>45</sup> Application Web e-Piano : <http://e-piano.univ-reunion.fr>, visité le 25/03/2013.

annotations. La plupart des conseils du professeur peuvent être résumés et symbolisés par des annotations.

- Les exercices à répéter sont détaillés étapes par étapes (lignes 31 à 41). Leur difficulté croissante permet d'assimiler les enchaînements de notes de façon progressive. Ces exercices se fondent sur un découpage du passage difficile en petits extraits très courts à répéter sur des rythmes différents, en augmentant progressivement la longueur des extraits.
- Certains conseils et exercices peuvent être adaptés au niveau de l'élève ou à sa morphologie (lignes 29 et 40).
- Les passages les plus difficiles sont bien mis en évidence (lignes 31 et 32) et font l'objet d'un travail plus poussé.
- Des références sont faites à des sonorités d'autres instruments (ligne 18), dont le chant (respiration, phrasé). L'intention du compositeur et l'esprit de la pièce sont régulièrement abordés, même sur les exercices techniques (lignes 2 et 43).

A partir de ces observations nous pouvons identifier les principaux composants des Signes Interprétatifs communiqués par le professeur : contenu, forme et sens. Le Tableau 3 résume les types de contenus, formes et sens identifiés. Le contenu permet d'identifier ce que fait le professeur (phases de discours, de jeu, de chant, démonstration d'un geste, rectification d'une position). Le sens permet d'identifier les objectifs de ces contenus (ce geste permet d'implémenter quel doigté ? Pour quel résultat ? Les notes chantées accentuent un phrasé). Enfin, la forme identifie tous les matériaux employés pour fixer les contenus démontrés (partitions, annotations, prêt de CD audio). Ces composants peuvent généralement être associés indifféremment. Par exemple, un geste pourra aussi bien servir à montrer un doigté qu'à rechercher une sonorité. La composante de forme est essentielle, car elle permet de fixer les éléments importants sur un support que l'élève conservera avec lui et pourra éventuellement échanger avec d'autres apprenants. Il pourra ainsi se rappeler des autres composants (contenus qui lui ont été présentés, significations associées) grâce à ces formes.

Tableau 3 : Types de contenus, formes et sens d'un SIM-P.

Types de Contenus	Types de Sens	Types de Formes
Geste, chant, discours, extraits interprétés, exagération du phrasé, montre la partition, décompte rythmique, répétitions d'extraits.	Structure/motifs, doigté, recherche de sonorité (pizzicato, amusement), assimilation (par cœur, passage au tempo, calendrier), gestes/articulation adaptés/phrasé, nuances, harmonie, rythme.	Partition, notes, tracés et symboles (annotations, doigtés écrits).

Si les méthodes de capture utilisées ici permettent de restituer le cours de façon satisfaisante au sein de l'application e-Piano, ce dernier reste difficilement exploitable dans le cadre d'une base de Signes Musicaux. En effet, pour permettre la co-construction de cette base, il faut isoler et référencer les SI en jeu. Ce travail permettra de concevoir des outils facilitant leur création et leur consultation. Plus précisément, on identifie les manques suivant :

- Les informations ne sont ni granularisées ni structurées : pour pouvoir réutiliser les techniques et conseils donnés, il faut pouvoir les extraire du cours général et préciser leur contexte de validité.
- La sémantique des savoir-faire discutés n'est pas clairement explicitée : par exemple, il est impossible de faire une recherche précise parmi un flot de cours vidéo.

- Les apprenants et les autres enseignants ne peuvent pas réagir aux explications du professeur. Afin de co-construire un savoir-faire vivant, tous les acteurs de ce savoir-faire doivent pouvoir poser des questions, réagir à une technique, proposer leurs astuces et soumettre leurs interprétations. Pour ce faire, ils doivent pouvoir construire (avec les ressources déjà existantes, ou en créant leurs propres contenus) leurs SIM-P eux-mêmes via des outils adaptés à l'activité considérée.
- Le musicien ne peut disposer des conseils pendant la pratique de l'instrument : une partition électronique enrichie d'annotations sémiotiques (tracés + contenus multimédia + explications) permettrait de pratiquer l'instrument comme avec une partition papier, mais avec des contenus supplémentaires et la possibilité de dialoguer avec les autres interprètes de la partition en question. L'application e-Piano n'étant ni collaborative, ni adaptée à un usage mobile, elle ne peut fournir ces fonctionnalités.

On propose donc d'intégrer les composants identifiés à des annotations sémiotiques numériques, comme présenté dans la partie 4.2.1.

#### 4.3.3 Du Signe Musical à l'annotation sémiotique pour l'apprentissage

Afin de capturer et partager au mieux des savoir-faire musicaux complexes, on définit un Signe Musical Numérique (SMN) composé des éléments suivant :

- Le contenu est véhiculé par des données multimédia montrant les techniques à mettre en œuvre pour jouer le passage concerné correctement.
- La forme est composée d'un extrait sous forme symbolique du passage à interpréter (partition, texte) et d'autres métadonnées identifiant le contexte de l'explication sous une forme « tangible » (tracés, écritures, symboles).
- Le sens consiste en une explication textuelle du point de vue du sujet (professeur ou élève), et éventuellement une description sémantique reposant sur un modèle descriptif de la pièce.

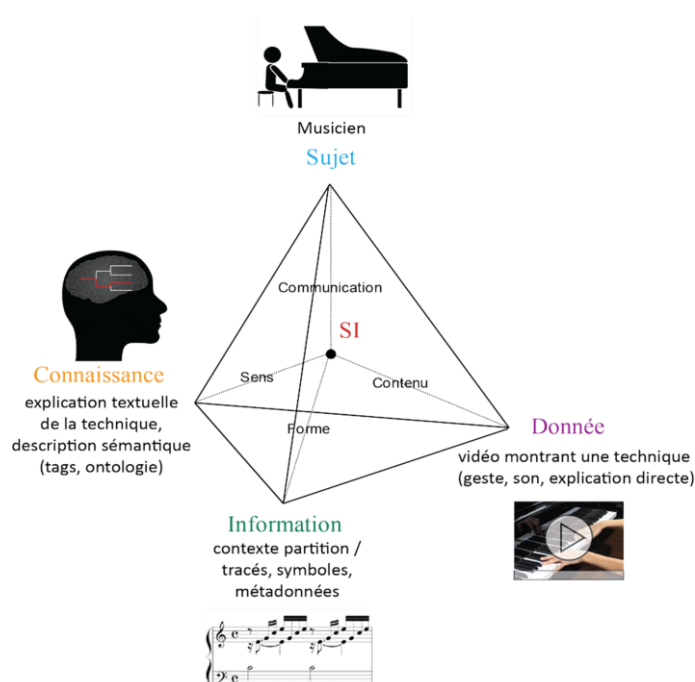


Figure 55 : Modèle tétraédrique du Signe Interprétatif Musical.

La Figure 55 présente ces composants suivant le modèle tétraédrique défini précédemment.

Nous avons remarqué lors du cours de musique que la partition était le support privilégié par le professeur pour structurer son discours : le déroulement de la pièce dicte le déroulement du cours, et les passages difficiles sont expressément soulignés sur la partition. De plus, comme précisé dans la partie 4.2.1, la partition est un support de restitution spatiale se prêtant naturellement à la pratique de l'annotation pour expliciter la musique écrite. On propose donc d'implémenter les SMN sous forme d'annotations sémiotiques de partitions. L'annotation étant déjà pratiquée par beaucoup de musiciens, on pressent qu'elle facilitera l'expression de leurs interprétations pour une pièce donnée. Elle permet également d'identifier clairement le contexte des échanges grâce à une référence commune, quoiqu'imparfaite. On peut alors établir un lien entre chaque composant du SMN et ses éléments représentatifs au sein de l'annotation sémiotique (voir Figure 56). L'annotation comporte alors l'identifiant du sujet (User 1), une vidéo expliquant la technique, un référencement sur la partition (cadre ou tracé dessiné), un titre, une explication textuelle et des tags pour la retrouver.

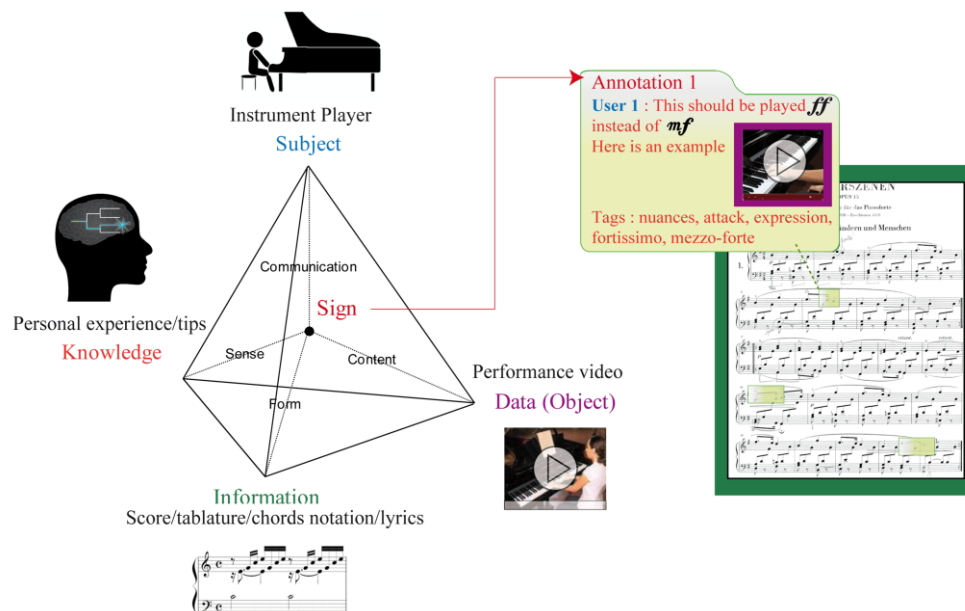


Figure 56 : Lien entre SIM et annotation sémiotique de partitions musicales.

Ce choix pose toutefois des questionnements pratiques sur l'implémentation d'un système de gestion d'annotations sémiotiques dédié à la musique : comment l'utilisateur peut-il ajouter une nouvelle pièce sur laquelle il souhaite travailler ? Comment va-t-il saisir les composants cités ci-dessus (contenus, sens), lier son annotation sémiotique à la pièce ? Comment un autre usager peut-il réagir à cette annotation ? Ces questionnements relèvent des domaines des interactions Homme-Machine, du multimédia et de la conception d'applications et sont étudiés dans la partie implémentation de ce mémoire (partie 6).

A présent, il faut lier ces Signes entre eux afin d'établir le fil conducteur de la pièce selon le point de vue du sujet (dans le cadre du cours, il s'agit du professeur). Pour faciliter la création et la réutilisation des Signes, et présenter clairement l'interprétation globale de l'œuvre par le sujet, on propose des logiques descriptives inspirées des cours de musique réels et adaptées à la saisie d'annotations sémiotiques.

### 4.3.4 Logiques descriptives, modèles descriptifs et ontologies pour l'étude d'œuvres musicales

Il est difficile d'étudier une œuvre musicale complexe si l'on ne dispose pas d'un canevas structuré pour le faire. C'est pourquoi beaucoup de professeurs introduisent une pièce en présentant tout d'abord sa structure globale, puis se concentrent sur ses passages importants en suivant le canevas identifié [19] [44]. Ce schéma de la pièce est ainsi mémorisé par l'élève, lui permettant d'établir des points de repère pour son interprétation. Pour faciliter la saisie et l'exploitation des annotations sémiotiques, on s'inspire de ce processus de structuration. On étudie tout d'abord les logiques descriptives applicables aux œuvres musicales, puis on établit un modèle descriptif générique pour les structurer. De même qu'un modèle général pour décrire toutes les espèces vivantes est difficile à établir, définir un modèle pouvant décrire toute pièce musicale de façon expressive est une tâche extrêmement complexe. Nous étudions donc les logiques descriptives employées dans notre contexte d'application, c'est-à-dire l'apprentissage de la musique occidentale, et plus particulièrement la pratique instrumentale. En effet, suivant l'objectif recherché, on ne décrit pas une pièce de la même façon : ainsi, un musicologue s'attardera plus sur la forme et les harmonies employées, alors qu'un interprète se focalisera plutôt sur les difficultés techniques de la pièce. Notre objectif est donc d'abord de proposer un modèle et des outils adaptés aux usages des enseignants et apprenants, mais qui pourra être étendu aux autres pratiques par la suite.

#### 4.3.4.1 Logiques descriptives d'une œuvre musicale

Afin d'identifier les logiques en jeu dans la description d'œuvres musicales, on part de celles présentées pour les objets biologiques dans la partie 4.2.4 :

- La *logique de composition* : L'étude d'une œuvre musicale suit naturellement une logique de composition. Une œuvre est divisée en plusieurs parties nommées différemment suivant le genre musical et la forme considérée. Ainsi les **chansons** populaires sont organisées en *refrains* et *couplets*, avec quelque fois des *ponts musicaux*. Les **sonates** sont constituées de trois *mouvements* présentant chacun des *thèmes* et leurs *développements* respectifs. La composition est la logique principalement mise en œuvre dans notre modèle descriptif d'œuvres musicales. Afin de faciliter le travail du descripteur (celui qui étudie l'œuvre et crée la description associée), on proposera une taxonomie des formes musicales et des structures communément associées. Cependant, de la même façon qu'un amateur peut identifier les différentes parties d'un animal sans pour autant savoir quel nom leur donner, un musicien peut tout à fait extraire les parties d'une œuvre sans les qualifier. Il pourra alors utiliser la notation par labels alphabétiques couramment employée en formation musicale (parties A, B, C, etc.). À un degré d'expression plus élevé, cette notation permet également de souligner les similarités entre parties. Une nouvelle logique descriptive devra être définie pour mettre en évidence ces similarités de façon appropriée. Le niveau de granularité de la décomposition conditionne le niveau de précision de la description. En effet, une partie peut être aussi bien une phrase musicale complète qu'un accord ou qu'une simple note, chacun de ces éléments pouvant être adressé et renseigné séparément. La logique de composition a donc ici un double rôle : identifier la structure générale de la pièce, et à une échelle plus fine, extraire ses motifs remarquables. L'annotation sémiotique permettra ensuite d'expliquer en quoi ces parties sont remarquables et comment les aborder en pratique.

- L'*expression de l'exception* est capitale pour le domaine musical. Même pour un domaine extrêmement « régulé » comme celui de la musique classique, les écarts volontaires à la norme sont courants et font l'objet d'attentions particulières de la part des artistes. Souligner un mouvement manquant ou une dissonance impromptue doit être possible dans notre modèle.
- L'*expression de l'imprécision* est également essentielle. Par exemple, une transition vers une nouvelle partie de la pièce peut être amenée de manière progressive, en mélangeant une voix issue de la partie précédente, avec une nouvelle voix. Identifier avec précision où s'arrête et où commence une partie devient alors délicat et pourra faire l'objet d'interprétations distinctes de la part des musiciens. Diverses solutions pourront être proposées, comme par exemple identifier clairement la partie de transition en tant que telle, ou bien définir des bornes approximatives pour les parties concernées.
- L'emploi de la *logique des objets multiples* est délicat pour la description d'œuvres musicales, et d'œuvres artistiques en général. En effet, elle suppose d'identifier clairement les parties identiques chez l'individu décrit (par exemple, les quatre pattes d'un quadrupède). Or la similarité en tout point est rare en musique. Deux parties pourtant distinctes seront qualifiées de « similaires » parce qu'elles partageront certains caractères : la même suite d'intervalles, ou le même motif rythmique, ou bien encore la même évolution de l'intensité sonore. On définit donc une nouvelle logique pour prendre en compte ces caractéristiques : la *logique de similarité*, évoquée plus loin.
- La *logique de spécialisation* permettra de simplifier le processus de description si l'on peut identifier la forme et le genre de l'œuvre. En effet, on sait qu'une forme particulière augmente les chances d'observer certaines structures. A titre d'exemple, une valse sera généralement en  $\frac{3}{4}$  avec un accompagnement régulier de type basse+accords. On pourra alors suggérer des termes ou des annotations au descripteur. La spécialisation pourra également permettre de « tailler » l'arbre descriptif. Par exemple, sur une pièce très simple et courte, il n'y a pas vraiment lieu d'identifier les grandes parties comme sur une œuvre orchestrale.
- Les *points de vue* permettront de supporter différents types de descriptions suivant l'échelle d'observation de la pièce (générale, ou précise) et l'objectif visé (étude musicologique poussée, cours de formation musicale, interprétation de l'œuvre), mais également d'étudier les désaccords entre musiciens (décompositions et passages remarquables distincts). Dans la mesure du possible, on établira des liens entre ces descriptions souvent complémentaires du même objet musical.

Les logiques énoncées ci-dessus ne suffisent cependant pas pour décrire une œuvre musicale dans notre contexte. En se rapportant au cours de piano analysé précédemment, on relève l'usage implicite d'autres types de logiques.

On note par exemple que le professeur établit régulièrement des liens entre les parties (exemple : « *ici on pourra travailler de la même manière qu'au début* »). On introduira alors une *logique de similarité* :

- la **logique de similarité** permet de souligner les caractères similaires entre deux parties d'une œuvre. Ainsi, la suite A, B, C, C' signifie par exemple que le morceau comporte quatre parties, les trois premières étant distinctes, et les deux dernières similaires. Cependant, cette notation ne permet pas de comprendre en quoi C et C' sont similaires. Il peut s'agir de la même phrase musicale répétée à l'exacte (reprise, bis), comme il peut y avoir une légère différence entre C et C' (modulation, ralentissement, transition différente), mais pas suffisante pour labéliser la dernière partie D. On pourra caractériser cette similarité via une annotation sémiotique (composant « sens » du Signe) ou en employant une relation spécifique entre les deux parties similaires. Dans un cas ambigu, un autre musicien aurait pu donner la structure A, B, C, D, d'où l'importance de la logique de points de vue présentée précédemment. Cette notation peut également être employée pour identifier des motifs au sein de grandes parties. Ainsi, dans la partie A, on pourra identifier ses motifs remarquables avec les labels A1, A2, A3, etc. qui pourront d'ailleurs être réutilisés dans les parties B, C et D. Le chercheur Frédéric Bimbot discute également des bonnes pratiques en matière de labellisation de structures musicales exprimant des relations de similarité dans [9]. Il propose pour ce faire une approche alliant trois niveaux de raisonnement : morphologique (forme des labels), syntagmatique (relations locales entre parties voisines) et paradigmatiques (similarités et contrastes). Des conventions d'annotation symboliques sont également proposées. Cependant, ces dernières sont plutôt adaptées à des analyses musicologiques poussées et des traitements automatiques, et restent donc peu accessibles pour un musicien amateur (exemple donné par les auteurs : [I/A] [A1] [A2] [B] [C] [J/2] [A'1] [|A'2] [B'] [C] [X/C] [Y/2] [C\*]). Toutefois, l'intégration de cette notation dans notre modèle reste possible (voir Figure 64). L'ajout d'annotations sémiotiques permet ensuite d'illustrer la notation donnée avec des documents concrets (animation de la partition, interprétation vidéo). Pour résumer, la logique de similarité vient en complément de la logique de composition, afin d'identifier quelles sont les parties similaires, et en quoi elles le sont.

Dans le cas de la Fugue, nous avons mis en évidence un autre type de logique : la polyphonie, ou l'étude des voix.

- La **logique polyphonique** permet de décrire les différentes voix dans une œuvre. Ces voix ne correspondent pas nécessairement aux instruments, ces derniers pouvant être polyphoniques (exemple : piano, guitare, harpe) et donc jouer plusieurs voix à eux seuls. On identifiera les différentes voix par des indices (v1, v2, v3, etc.), des timbres (piano, violon, etc.) ou bien par des registres (soprano, alto, ténor, basse, etc.).

La logique polyphonique induit naturellement une autre logique descriptive de l'œuvre musicale : l'analyse harmonique.

- La **logique harmonique** permet de préciser le déroulement harmonique de la pièce. On précisera alors les suites d'accords en jeu, notamment sur les passages les plus remarquables tels que les cadences. Dans notre contexte, cette logique peut donc s'exprimer localement, sur des passages où elle est particulièrement intéressante à analyser, et a des retombées pratiques sur l'assimilation de la pièce. En effet, comprendre la logique harmonique de la pièce facilite son apprentissage.

On remarque également que le professeur souligne régulièrement les points difficiles de la pièce : on introduira donc également une *logique de difficulté* :

- La **logique de difficulté** permettra aux musiciens d'indiquer le niveau de difficulté d'une partie de la pièce. Là encore, cette logique vient compléter la logique de composition afin de caractériser, cette fois-ci en termes de complexité, un passage remarquable de la pièce. La logique de complexité sera naturellement soumise à la logique des points de vue, les musiciens pouvant avoir ressenti différent de la pièce suivant leur expérience et leurs prédispositions. Cependant, il n'est pas rare qu'un passage soit réputé difficile par tous les musiciens, parce qu'il requiert une position de main inhabituelle et peu confortable. Souligner ces passages et indiquer des techniques pour les travailler est essentiel : il s'agit de les assimiler le plus tôt possible afin que leur exécution reste souple et naturelle dans l'interprétation finale de l'œuvre.

Ces quatre nouvelles logiques impliquent quatre lectures de l'œuvres distinctes du traditionnel déroulement linéaire temporel : la **lecture par motifs itérés** (exemples : « *je cherche toutes les occurrences de la partie A2* » ou « *je ne joue pas les reprises* »), la **lecture par voix** (exemple : « *je suis la voix d'alto* », « *je ne m'intéresse qu'à la partie chantée de la pièce* »), la **lecture harmonique** (exemple : « *je repère les cadences de la pièce* ») et la **lecture technique** (exemple : « *je commence par travailler les passages compliqués avec des exercices avant de revenir au déchiffrage global* »). Il est en effet intéressant qu'un musicien puisse opérer des « branchements » entre les différentes parties d'une pièce afin d'exprimer sa propre lecture de cette dernière.

Enfin, afin de prendre en compte l'improvisation et l'arrangement d'un thème, il nous reste à définir le concept de Méta-description :

- La **Méta-description** d'une œuvre permet de relier différentes versions d'une même œuvre en résumant leurs points communs. En effet, si en musique classique, on suit une partition à la lettre, et que cette partition connaît peu de différences d'un éditeur à l'autre (hormis les adaptations pour divers groupes d'instruments), il n'en est pas de même dans d'autres genres tels que le jazz et la musique folklorique. Un air célèbre repris par différents groupes sera reconnu par les auditeurs malgré des différences d'arrangement et d'instrumentation entre ces différents groupes. La Méta-description permettra donc de regrouper les éléments communs entre toutes ces versions, du moins ceux qui permettent de « reconnaître » l'œuvre : la mélodie de base et les accords couramment employés. Ce concept permet d'intégrer l'improvisation sur un thème à notre modèle, chaque musicien pouvant décrire « sa » version de l'œuvre du point de vue structurel et ornemental, voire harmonique. Toute description peut elle-même servir de méta-description pour définir différentes versions d'une œuvre. Il convient toutefois de bien distinguer une version et une interprétation d'une œuvre : il peut y avoir plusieurs interprétations de la même version (par exemple, plusieurs ensembles ont interprété la version pour orchestre de la *Suite Bergamasque* de Debussy, à l'origine une pièce pour le piano).

Le cours met en évidence d'autres processus pédagogiques que pourront intégrer les annotations sémiotiques :

- **L'illustration** : afin d'interpréter et expliquer un passage.



- **L'exercice pratique** : afin de spécifier un exercice à répéter sur la base d'un passage difficile à jouer, dans l'objectif de l'assimiler.
- **L'interrelation entre technique et expression** : afin d'expliquer quel effet musical produit une technique ou une articulation particulière.
- **L'évaluation** : l'élève interprète la pièce devant le professeur afin d'obtenir des retours sur son propre jeu (erreurs, difficultés rencontrées, sonorité non adaptée, etc.).

#### 4.3.4.2 Modèle descriptif générique d'une œuvre musicale

L'objectif final de notre modèle est de pouvoir extraire des passages remarquables ou difficiles appelés à être discutés via des annotations sémiotiques. S'il existe peut-être d'autres logiques descriptives, celles précédemment citées restent les plus employées en pédagogie musicale et pourront être étendues si nécessaire. Afin de les mettre en pratique nous proposons dans ce qui suit un modèle descriptif générique et des exemples correspondants.

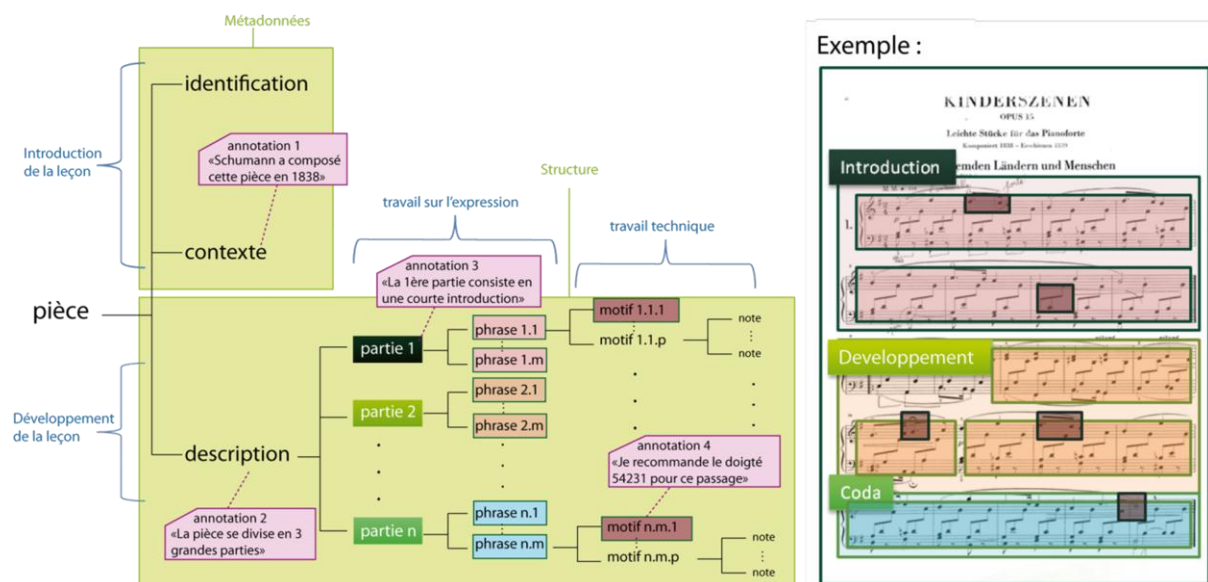


Figure 57 : Modèle descriptif générique d'une pièce de musique.

Le modèle descriptif générique présenté sur la Figure 57 repose essentiellement sur la logique de composition. Ce dernier a été présenté dans deux de nos publications [60] [53]. Après une phase d'identification et de présentation du contexte de la pièce, celle-ci est découpée en grandes **parties**, chacune composée de **phrases** musicales. Chaque phrase comporte des **motifs** remarquables destinés à être annotés afin d'être explicités et/ou discutés (voir exemples d'annotations sur la Figure 57). Comme montré sur l'exemple joint au schéma, chaque partie identifiée peut être expressément nommée (Introduction, Développement, Coda) et annotée. Le modèle proposé suit le déroulement approximatif d'une leçon de musique (introduction générale, développement, structure générale, difficultés particulières, recommandations, travail expressif/travail technique). Pour autant, l'utilisateur peut choisir de sauter une étape s'il considère qu'elle n'est pas pertinente dans le contexte de la pièce étudiée (adaptabilité du modèle). Une seule sous-partie « transparente » sera alors définie, permettant à l'utilisateur de poursuivre sa description en allant à l'essentiel, quitte à revenir plus tard sur ce point. Afin de démontrer la généralité de notre modèle et de bien cerner l'usage pratique des différentes logiques présentées, nous décrivons quatre exemples caractéristiques : une comptine

pour enfant, sa version en canon, une pièce pour piano (celle étudiée dans le cours précédent), et enfin une Fugue de Bach, forme réputée pour sa structure complexe à décrire. Les exemples choisis se concentrent sur le piano, dont l'écriture riche permet d'examiner la robustesse de notre modèle descriptif.

### 1 – Description de la comptine Frère Jacques (Anonyme) version simple

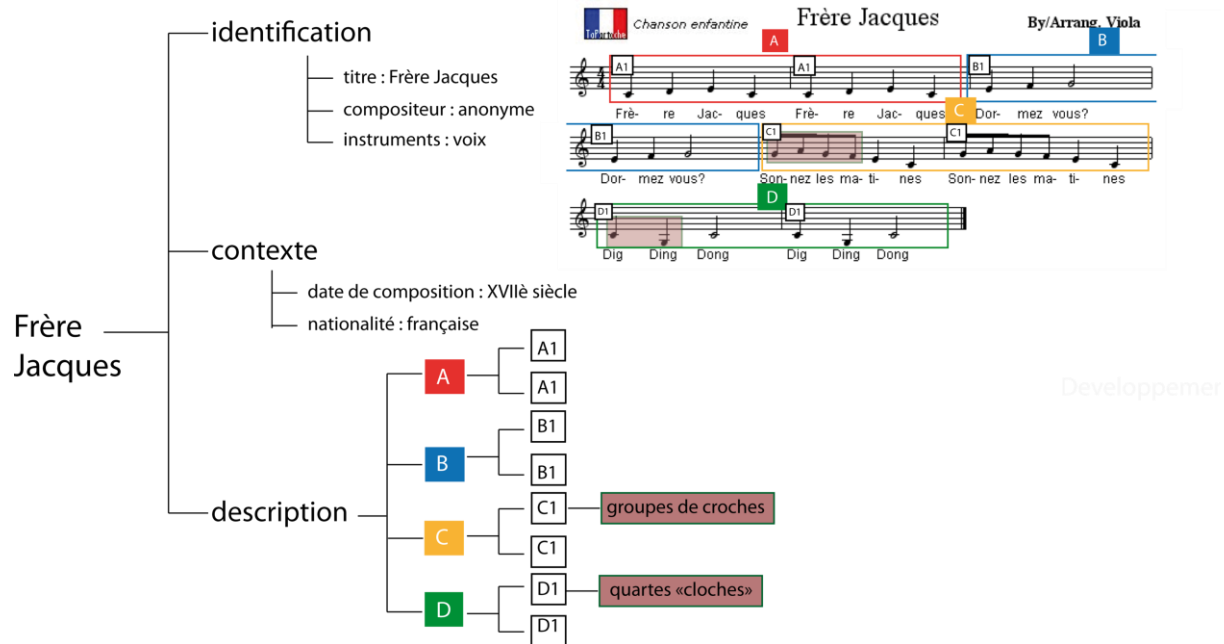


Figure 58 : Description de la comptine Frère Jacques.

Dans cette comptine très simple, on ne distingue par réellement de grandes parties avec des ambiances très distinctes (exposition d'un thème, développement, etc.). On va donc décrire directement les phrases de la pièce. Dans notre modèle, il suffira de ne définir qu'une seule partie, qui ne sera pas affichée en pratique puisque triviale. Cette simplification du modèle illustre l'usage de la logique de spécialisation définie précédemment (spécialisation « comptine »). Comme présenté sur la Figure 58, la chanson se divise en quatre phrases : A, B, C et D (logique de composition). Au sein de chaque phrase on répète deux fois le même motif : A1, B1, C1 puis D1 (logiques de composition et de similarités). Du point de vue de l'annotation de la partition, la logique de composition se traduit par l'imbrication des cadres de sélection des groupes de notes. On pourra également souligner certains aspects de la chanson, telles que les croches devant être chantées plus vite que le reste, les quartes imitant le tintement des cloches, ou encore expliquer ce que sont les matines (spécialisation « chanson »).

### 2 – Description de la comptine Frère Jacques (Anonyme) version en canon

Cette fois-ci, la description doit faire figurer les phrases reprises à chaque voix. L'identification de la forme en canon implique de proposer au descripteur de mettre en évidence les occurrences du thème (logique de spécialisation). Dans un cas simple comme celui-ci (quatre voix séparées, mélodie simple, thème repris exactement aux quatre voix), cette procédure peut être automatisée.

La représentation sous forme d'arbre de la double dimension harmonique et mélodique de la musique est délicate comme en atteste la difficulté de lecture d'un document MusicXML par un humain (exemple : les nœuds frères représentant des notes peuvent suggérer aussi bien des sons successifs que simultanés suivant la présence ou pas de l'élément <chord/>). Ici, nous avons choisi d'employer le symbole « + » pour suggérer la simultanéité des parties, l'axe du temps étant vertical (Figure 59). L'usage direct de partitions pour l'acquisition des descriptions se justifie donc, celles-ci permettant de visualiser aussi bien le déroulement musical que celui structural via les annotations. Dans l'environnement de lecture des annotations, des filtres pourront servir à masquer ou afficher les annotations suivant leur type, leur contenu, leur forme et leur sens. Dans les exemples suivant, on représentera donc la description issue du modèle directement sur la partition pour plus de lisibilité.

Cet exemple permet également d'illustrer le concept de méta-description d'une œuvre puisqu'on a étudié deux versions facilement reconnaissables de Frère Jacques. Ici, le premier arrangement proposé (une seule voix) est suffisamment simple et représentatif pour jouer le rôle de méta-description. En effet, tous ses motifs sont repris dans la version en canon.

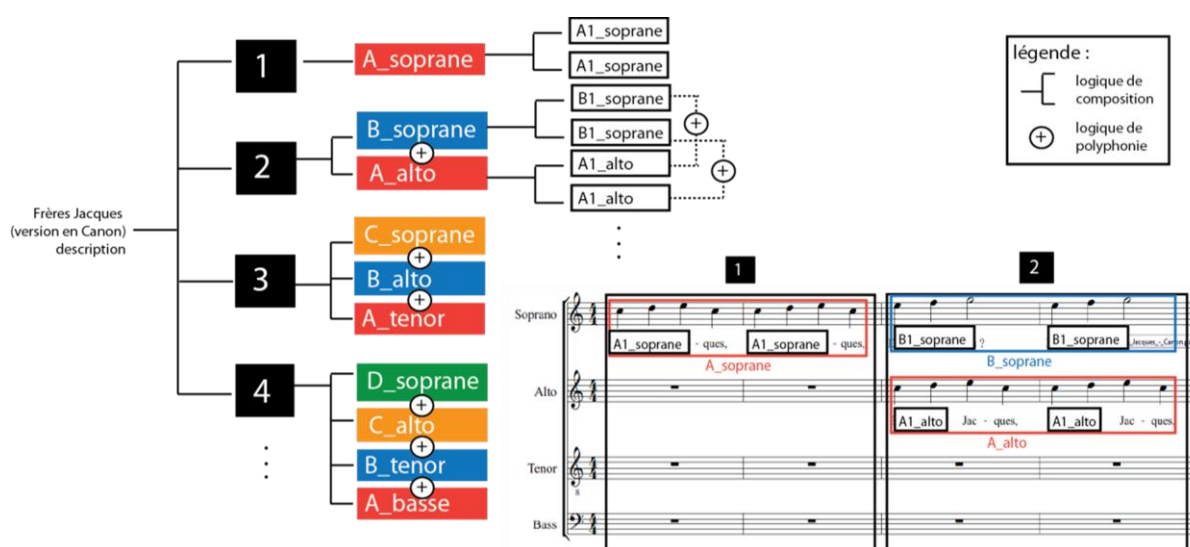


Figure 59 : Description de la comptine Frère Jacques en canon.

### 3 – Etude de la Petite Plaisanterie de Kabalevski.

Cet exemple reprend la démarche employée sur la pièce par le professeur dans la partie 4.3.2. Les étapes 1, 2, 3 et 4 correspondent à celles définies dans notre modèle descriptif mais sont ici représentées sous formes d'écrans d'interface afin de se rapprocher de l'expérience de l'utilisateur. Les grandes parties sont d'abord définies selon les logiques de compositions (quatre parties identifiées), de similarité (A' commence de la même manière que A) et sont nommées lorsque possible (C est une petite coda). Ensuite, le professeur peut choisir d'identifier les phrases ou pas. En effet, s'il n'y a pas de remarque particulière à leur sujet, il est possible de sauter cette étape, quitte à y revenir plus tard. De même on peut passer la phase d'identification des motifs s'il n'y en a pas, ou si l'observateur juge qu'ils n'ont pas d'intérêt pour l'apprentissage de la pièce. Ici, les quintes ont leur importance comme vu dans la leçon de la partie 4.3.2, elles sont donc entourées par le descripteur. Enfin, des conseils pédagogiques pratiques sont attachés à la pièce. L'ensemble de ces étapes est réalisé via l'annotation de la partition. Leur réalisation permet d'assurer la cohérence du contexte de chacune des annotations sémiotiques pédagogiques saisies par la suite. Elle permet également de dégager

une double lecture musicologique et interprétative pour les usagers qui consulteront la pièce. Là encore, des processus automatiques pourront être conçus pour assister l'utilisateur dans sa démarche. Ces derniers sont détaillés dans la partie 5.3.

## 1/ Identification des grandes parties

ШУТОЧКА

© igraj-poj.sarod.rs

## 2/ Identification des phrases (facultatif)

ШУТОЧКА

© igraj-poj.sarod.rs

## 3/ Identification des motifs remarquables

ШУТОЧКА

© igraj-poj.sarod.rs

## 4/ annotations diverses

ШУТОЧКА

© igraj-poj.sarod.rs

Figure 60 : Description de la Petite Plaisanterie de Kabalevski. Représentation sous forme d'écrans successifs et annotations.

#### 4- Etude partielle de la Fugue BWV846 de J.S. Bach (extrait de l'analyse de Pierre Couprie).

La Fugue est une des formes les plus élaborées et son étude est presque inévitable dans un parcours musical classique. Elle constitue un cas d'école intéressant dans notre contexte, car ses interprètes passent obligatoirement par une phase de repérage des sujets afin de les faire ressortir dans leur jeu. La Figure 61 résume l'analyse de Pierre Couprie réalisée à l'aide de son logiciel iAnalyse (présenté dans la partie 3.1.6). Ici, on a rassemblé les deux premières étapes vues précédemment (parties et phrases) en un seul écran. Une taxonomie adaptée à la forme « Fugue » permet de labéliser l'exposition du sujet et les différentes strettis. Les quatre voix (soprano, alto, ténor, basse) peuvent également être extraites et labélisées, même si elles sont plus simples à identifier. L'adaptation du

modèle à la forme « Fugue » a également des répercussions sur les formes et couleurs des annotations (exemple une couleur pour le sujet, une autre pour la réponse).

JOHANN SEBASTIAN BACH (1685–1750)  
BWV 846, Fuga à 4

Exposition

Strette 1

Figure 61 : Description de la Fugue BWV 846 de J.S. Bach (extrait de l'analyse de Pierre Couprie).

Ces exemples soulignent la nécessité de définir de nouveaux concepts musicaux en marge de la Music Ontology décrite dans la partie 2.3.2. :

- Une ontologie précise des *formes et structures musicales* : chansons, lied, sonates, concertos, fugues, symphonies, ballades, ainsi que leurs couplets, refrains, thèmes, expositions et autres parties caractéristiques. Ce travail nécessite de solides connaissances en musicologie, car les relations entre formes, genres et structures sont nombreuses et complexes en musique. Ainsi pour la forme Fugue par exemple, il faut définir au minimum ce qu'est un sujet, une réponse, une strette, et lier la Fugue au genre baroque. De plus, cette ontologie doit pouvoir décrire des phrases, motifs et structures rythmiques ou harmoniques indépendamment de toute forme. Cette ontologie permettra essentiellement de suggérer les termes appropriés dans la démarche de description de la pièce par le musicien.
- Une ontologie pour la description sémantique d'*interprétations musicales*. Plus proche de la pratique musicale que de la musicologie, cette ontologie doit permettre d'identifier les concepts courants en jeu dans l'interprétation, tant sur le plan technique qu'expressif. Les concepts et relations à définir ont été partiellement identifiés dans les parties précédentes. Ainsi, notre ontologie devra permettre d'adresser les différents types de Signes Musicaux (**Error! Reference source not found.** : Formes, Motifs, Harmonie, etc.), ainsi que les types de sens, contenus et formes transmis par les Signes Interprétatifs Musicaux (Tableau 3 : Doigtés, Gestes, Articulation, Partition, Clavier, Déplacement, Répétition, Exercice, etc.).

Nous détaillons une première proposition pour de telles ontologies dans la partie suivante.

#### 4.3.4.3 Ontologies pour la description d'œuvres et d'interprétations musicales

La Music Ontology (MO), présentée dans la partie 2.3.2, permet de décrire sémantiquement des productions et des événements musicaux. Mais dans un contexte d'étude musicologique ou d'apprentissage instrumental, les concepts et relations qu'elles proposent ne suffisent plus. En effet, il faut alors décrire des formes et des structures musicales, ainsi que les méthodes nécessaires pour les jouer, ce que ne permet pas la MO. On propose donc ici deux nouvelles ontologies pouvant se greffer sur la MO : la Musical Forms and Structures Ontology (MFSO) et la Musical Performance Ontology (MPO). La MPO a fait l'objet d'une première publication en 2010 [56], puis d'une deuxième en 2013 [57], où elle est intégrée au modèle d'Annotation Sémiotique et augmentée de la MFSO. Les différentes ontologies musicales s'articulent comme suit (voir Figure 62) :

- La MO permet de définir une œuvre musicale, ainsi que les ressources et événements qui lui sont liées. Elle est surtout appropriée pour les applications liées à **l'écoute** de titres musicaux (bases de titres, Web radio, système de recommandation).
- La MFSO permet de décrire la forme d'une œuvre, son organisation et ses structures importantes. Elle est donc surtout destinée à **l'analyse** musicale (écoute attentive, compréhension de l'œuvre, étude musicologique, préparation à l'interprétation)
- La MPO permet de décrire les techniques instrumentales, leurs effets et les méthodes nécessaires à leur assimilation. Elle est donc surtout destinée à la **pratique** instrumentale (partage d'astuces et de conseils, doigtés, mouvements, positions, expression d'émotions, effets musicaux). L'usage de cette ontologie étant fortement subjective (les musiciens produisant des interprétations et utilisant des techniques différentes selon leur expérience et leur sensibilité), elle s'effectue principalement au sein d'Annotations Sémiotiques (AS). Plus précisément, la MPO intervient au niveau de la composante « sens » de l'AS, comme préconisé dans le modèle conceptuel présenté dans la partie 4.2.3.

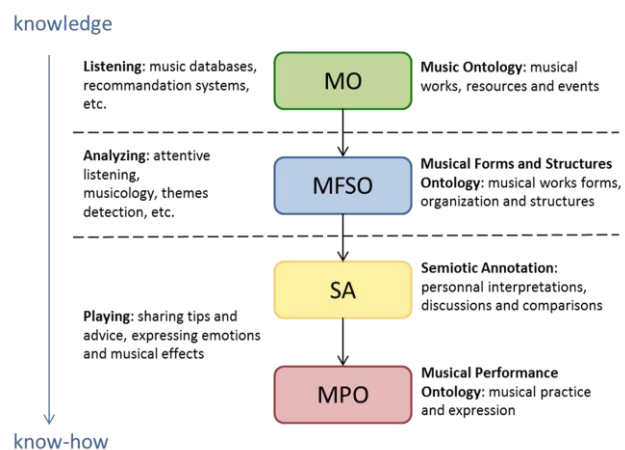


Figure 62 : Organisation et rôles des ontologies musicales MO, MFSO et MPO. (source : [57]).

Les schémas de classes de ces ontologies pour la musique s'intègrent donc à celui de l'AS. La Figure 63 détaille cette intégration. L'œuvre considérée est de type *mo:MusicalWork*, héritant du type *frbr:Work* désignant toute œuvre créative. L'usage de la MFSO permet de spécifier la forme de l'œuvre étudiée (Sonate, Concerto, Chanson, Fugue). La MO permet de lier une œuvre à ses différents mouvements dans le cas d'une Suite, Sonate, Concerto ou Symphonie. Cependant, elle ne permet pas de relier des œuvres appartenant à un même recueil (exemples : les *Préludes et Fugues* de Bach, Les *Etudes* de Chopin, etc.).

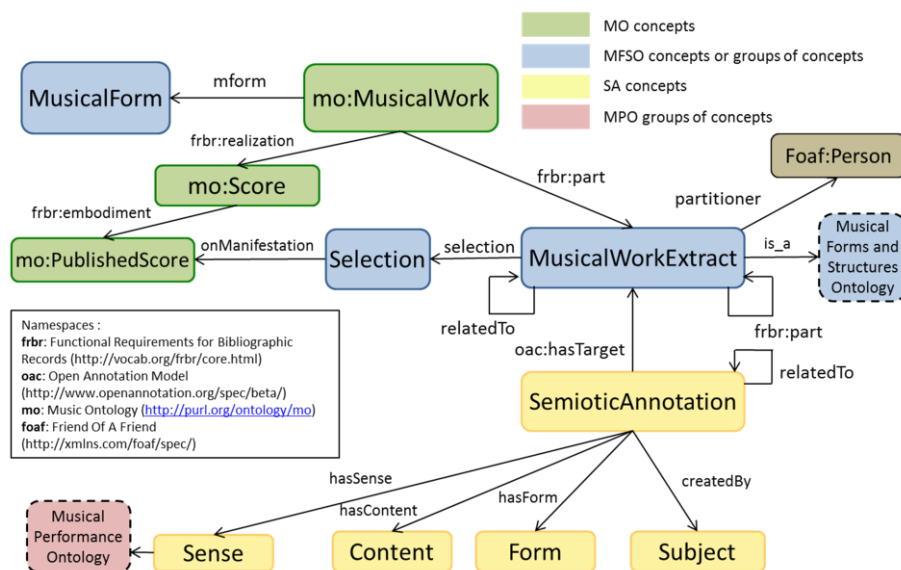


Figure 63 : Schéma de classes : annotation sémiotique d'œuvres musicales.

Dans notre modèle descriptif, l'utilisateur est ensuite appelé à sélectionner la partie qu'il va expliquer sur une ressource de référence représentant l'œuvre (sur la Figure 63, une partition de type *mo:PublishedScore*). La MFSO permet alors la génération d'une ressource de type *MusicalWorkExtract* afin d'apporter des précisions sur la structure annotée, indépendamment de son mode d'expression. En effet, le *refrain* d'une *chanson* existe indépendamment de ses enregistrements ou de ses transcriptions. La relation *partitioner* permet d'identifier la personne ayant isolé la partie considérée. En effet, comme vu précédemment dans les logiques descriptives pour la musique, une même structure peut être identifiée différemment suivant l'observateur, et revêtira une signification différente selon son expérience. De plus, l'annotateur d'un extrait n'est pas nécessairement celui qui a identifié et nommé cet extrait. Il peut s'agir par exemple d'un élève posant une question sur l'extrait identifié et nommé par son professeur. Il nous faut également un moyen de relier une partie identifiée à ses manifestations concrètes sur des enregistrements, des textes de paroles ou des partitions. La propriété *tl:timeline* prévue par la Music Ontology n'est toutefois pas adaptée à notre contexte, cette *timeline* devant être rattachée à un signal audio [45]. C'est pourquoi nous proposons de délimiter l'extrait musical à décrire par une sélection plus flexible (voir concept *Selection* sur la Figure 63). Cette sélection consiste simplement en un ensemble *S* d'éléments de nature différente suivant le format choisi :

- Une partition au format MusicXML :  $[n_1, n_2, \dots, n_n]$ , avec  $n_i$  des éléments `<note>` du fichier MusicXML définis par leur numéro de mesure et leur ordre d'apparition dans le fichier ( $m_i, k_i$ ). (N.B. : cet ordre correspond normalement à l'ordre de lecture des notes d'une partition, c'est-à-dire de gauche à droite et du plus grave au plus aigu).
- Une partition au format PDF :  $[(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)]$ , où chaque  $(x_i, y_i)$  définit un sommet d'un polygone de sélection dans l'espace de la partition. Dans des cas simples, il s'agira d'un rectangle de sélection (quatre coordonnées).
- Un enregistrement audiovisuel :  $[t_1, t_2]$  avec  $t_i$  un timecode appartenant à la ligne de temps de l'enregistrement et  $t_1 < t_2$ .

Naturellement, une entité *MusicalWorkExtract* pourra être associée à plusieurs entités *Selection* permettant d'identifier la partie en question sur différents supports. Si ces supports sont finement

synchronisés, seule une sélection sur un des média est nécessaire, la synchronisation devant permettre de retrouver cette sélection sur tous les autres média. Des sélections multiples peuvent également être considérées dans des cas particuliers. Ainsi, par exemple, la sélection d'une voix se développant sur plusieurs portées d'une partition au format PDF requerra sans doute plusieurs polygones de sélections.

L'ontologie MFSO (Figure 64) permet d'apporter des précisions sur les structures importantes de la pièce étudiée. Pour ce faire, elle spécialise le concept d'extrait musical en différentes structures. Un musicien peut donc décrire un thème, un leitmotiv, une exposition ou un développement d'une sonate, une cadence, etc. Si l'œuvre respecte une forme particulière, la présence de structures caractéristiques de cette forme peut être suggérée grâce à la relation *hasStructure*. De façon similaire, une forme musicale peut être *typique* d'un genre musical (exemple : la Fugue pour la musique baroque, le Reel pour la musique Irlandaise, etc.). L'idée n'est pas tant de restreindre les possibilités d'annotation que de suggérer des termes appropriés afin d'accompagner l'utilisateur dans l'analyse musicale de la pièce. Les extraits musicaux ainsi identifiés ne sont pas nécessairement nommés. Quoiqu'il en soit, la relation *contains* permet de préciser l'écriture musicale de l'extrait sélectionné : est-ce une phrase, un motif, une séquence de notes quelconques, une séquence d'accords, un arpège, ou une gamme ? Cette connaissance peut être extraite automatiquement si l'on dispose d'un format de description de la pièce approprié (exemple : format MusicXML).

Si l'on souhaite décrire plusieurs occurrences d'un même motif, on définira autant de ressources de type *MusicalWorkExtract* que d'occurrences, que l'on reliera par la propriété *similarTo* héritant de *relatedTo*. L'usage de cette propriété a d'importantes répercussions dans la pratique musicale : elle signifie notamment que les techniques instrumentales à employer (doigtés, articulation, etc.) pourront être les mêmes pour les deux parties. Dans le cas de parties ressemblantes mais non identiques, il est intéressant de préciser quelles sont les caractéristiques partagées. Pour ce faire, on propose de spécialiser la propriété *similarTo* en *equalTo*, *similarRhythm*, *similarIntervals*, *similarHarmony*, *transposition*, *variation*, etc. Le travail à effectuer sur l'un pourra ainsi être adapté à la réalisation de l'autre, suivant les traits qui les distinguent. Cette recherche de structures identiques

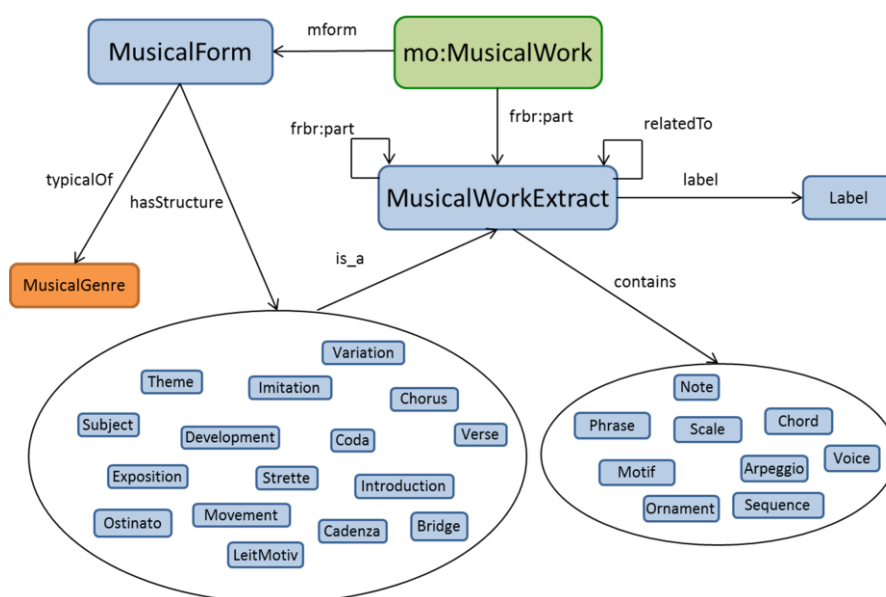


Figure 64 : Schéma de Classes de l'Ontologie des Formes et Structures Musicales (MFSO).



peut éventuellement être automatisée (voir les travaux présentés dans la partie 2.3.3). Cependant, les relations pouvant exister entre deux parties d'un morceau ne se réduisent pas à des similarités. On peut ainsi imaginer qu'une partie A *introduise, précède, succède, soit incluse* dans (exprimé par la relation *frbr:part*), *conclue* une partie B (intervalles d'Allen).

Enfin, la relation *label* permet d'associer un label à l'extrait afin de codifier la structure globale de l'œuvre. C'est à ce niveau que l'on peut intégrer la notation alphabétique utilisée en formation musicale et formalisée par [9]. La Figure 64 résume la modélisation proposée. Comme pour la MPO, ce modèle a été conçu sur la base du Tableau des Signes Musicaux exposé dans la partie 4.3.1. Des concepts et relations plus précis restent à définir avec des musicologues et interprètes en se fondant sur ce premier travail.

Une fois la partie sélectionnée et nommée, il s'agit de l'expliquer avec des annotations sémiotiques : comment jouer cette partie ? Quelles émotions transmettre ? Par quels gestes ?

La conception de la MPO s'inspire de la méthodologie Archonte mise au point par Bachimont [4]. L'identification des concepts et relations est en effet une tâche complexe dans notre contexte car elle nécessite de définir et d'organiser des concepts musicaux complexes (exemple : l'harmonie, le rythme, l'émotion). Pour ce faire, les unités linguistiques récurrentes ont d'abord été extraites de cours de piano enregistrés (partie 4.3.2) et de traités sur la pratique instrumentale [19]. Ces unités ont ensuite été regroupées par identités et différences, puis chaque groupe a été labélisé (exemple Figure 65). On a ensuite remarqué que chaque label pouvait être classé selon une des trois activités principales de la musique : **écouter**, **jouer** (faire, bouger), **apprendre** (retenir, répéter).

« Nous allons étudier *Espièglerie de Kabalevski*. On essaiera, même dans le travail d'apprentissage(6), d'y mettre l'esprit amusant et enjoué(1) de cette petite œuvre. Tout le long du morceau, on va trouver des enchaînements de quintes(5). Il y a plusieurs parties(5) dans le morceau au niveau de l'apprentissage du texte(6), la première partie(5) où la main gauche (MG) et la main droite (MD)(7) ont les mêmes notes, à savoir deux quintes(5) (joue(9)). Pour la MD(7) on développera(9) toutes les notes, mais pour apprendre(6) les notes rapidement, on va d'abord jouer ces quintes enchaînées(5) comme ça (joue(9)). On prendra garde de bien mettre le doigté 2-5 à la MG(7) qui permettra d'avoir un détaché beaucoup plus léger, beaucoup plus vivant(1). Voilà ce que ça donne (joue)...ici c'est ensemble(7)(5) (joue toujours). Voilà, c'est la 1ère partie(5). Il faut savoir jouer ça assez rapidement(6), tout de suite avec les nuances(4)(1). Là j'ai montré lentement(3). Ça ne doit pas être un problème en répétant 3-4 fois(6) d'obtenir ça (joue au tempo et avec les nuances). Il faut que ça passe tout à fait naturellement(6), voire le plus vite possible par cœur(6), car c'est assez difficile(6) de se déplacer(7) sur le clavier(8) et regarder(7) la partition(8) en même temps. »

1 Sonorité 2 Harmonie 3 Rythme/Tempo 4 Dynamique 5 Structure/Écriture 6 Assimilation 7 Gestuelle 8 Support 9 Relation

Figure 65 : Analyse d'un cours de piano : extraction et classification des unités linguistiques significatives.

Naturellement, la composante « écouter » domine le discours musical et regroupe le plus de concepts, puisqu'elle constitue l'objectif final du musicien : produire un beau son. Si certains termes restent difficiles à classer, la structure d'arbre des concepts (ontologie différentielle) est assez aisément modélisée lorsque l'on considère ces trois activités essentielles à la pratique musicale.

Dans un contexte d'apprentissage de la musique, l'annotation peut traiter de trois grands thèmes complémentaires : l'expression musicale (concept **MusicalExpression**) lié à l'activité d'écoute, la technique instrumentale (concept **InstrumentalTechnique**), liée à l'activité de jeu et l'assimilation de la pièce (concept **Assimilation**), liée à l'activité d'apprentissage. Les deux premiers sont évoqués dans les travaux de Megan Winget sur l'annotation de partitions musicales [69]. Ces trois concepts sont en étroite relation : la technique instrumentale est au service de l'expression musicale (relation *produces*) mais nécessite souvent des méthodes d'assimilation particulières (relation *requires*) pour

être appréhendée. Plus précisément, on peut expliquer chacun de ces trois concepts comme suit (voir Figure 66) :

- L'expression musicale (*MusicalExpression*) permet de caractériser ce qui doit être entendu sur la partie considérée : c'est la composante « **écoute** » du sens. Elle constitue le « résultat final » à obtenir. On y regroupe donc toutes les considérations sur les sonorités (concept *Sound* et ses caractéristiques), les mélodies (concept *Structure* et ses enfants) et les rythmes produits (concept *Rhythm*). Les concepts abordés via *MusicalExpression* correspondent donc aux types de Signes Musicaux propres à l'écoute relevés dans la partie 4.3.1. Ces concepts entretiennent de nombreuses relations non représentées sur la Figure 66. Par exemple les sonorités (*Sound*), harmonies (*Harmony*), dynamiques (*Dynamic*) et rythmes (*Rhythms*) caractéristiques des *Structures* discutées peuvent être soulignées via les relations correspondantes *hasSound*, *hasHarmony*, *hasDynamic*, et *hasRhythm*. A ce titre, on souligne la possibilité d'utiliser des concepts issus de la MFSO à ce niveau. En effet, le sujet peut souligner des structures plus élémentaires au sein de la partie qu'il annote. Il peut ainsi pointer une note, un accord, une ligne mélodique significative de son point de vue, mais ne nécessitant pas nécessairement de définir une nouvelle partie de l'œuvre. Cette organisation permet entre autres de laisser plus de liberté à l'annotateur quant au niveau de granularité de sa démarche d'annotation ((multiples structures très élémentaires + annotations simples) ou (quelques structures importantes + annotations détaillées), ou encore une association des deux). Certaines relations dépendent du contexte : par exemple, une sonorité grave (concept *Pitch*) pourra être reliée au registre vocal correspondant (concept *Register*) s'il s'agit d'une pièce chantée.
- La technique instrumentale (*InstrumentalTechnique*) constitue la composante « **jeu** » du sens. Elle permet de détailler les gestes, mouvements, doigtés, positions à mettre en œuvre pour produire les sonorités souhaitées. La relation entre jeu et écoute est essentielle pour l'interprète. Elle peut être perçue comme un système à rétroaction puisqu'un interprète de bon niveau corrige son touché en temps réel en fonction de sa propre perception de son interprétation. Comme représenté sur la Figure 66, une technique instrumentale implique un membre ou une articulation du musicien (souvent la main, mais cela peut également être le dos ou les épaules dans le cadre d'une posture à adopter) ainsi qu'un constituant de l'instrument (exemple en piano : le clavier, les touches blanches, noires, les pédales, en chant : les cordes vocales, les poumons, le ventre, la bouche). Bien sûr ces concepts dépendent de l'instrument joué et ne sont donc pas détaillés sur la Figure 66. Via l'héritage de la propriété *produces*, chaque technique décrite pourra être liée au type d'effet musical ou d'expression recherché. En pratique, l'aspect technique le plus souvent décrit sera sans doute le doigté (*Fingering*), qui consiste à associer un doigt à chaque note de façon à optimiser l'enchaînement des positions de mains. Les versions récentes du format MusicXML supportent la saisie de doigté. Un extrait de notation MusicXML doigtée permettra donc d'encoder cette information. L'usage de copies (partielles ou non) de la ressource de référence offre la possibilité de superposer plusieurs solutions de doigté pour un seul passage.
- L'assimilation (*Assimilation*) constitue la partie « **pédagogie** » et cognition du sens. Elle permet notamment de décomposer une technique en fragments simples à répéter sur des motifs rythmiques (exercice technique) afin de mieux assimiler la partie à jouer. La relation

*requires* sert à relier une technique au processus d'assimilation à mettre en œuvre pour la travailler (décomposition, comptage des temps, calendrier, apprentissage par cœur, etc.). Elle peut également indiquer le niveau d'instrument requis pour l'implémenter : débutant, intermédiaire, avancé ou virtuose. On étudie la notion de difficulté d'une œuvre plus en détail dans la partie 5.5.4.

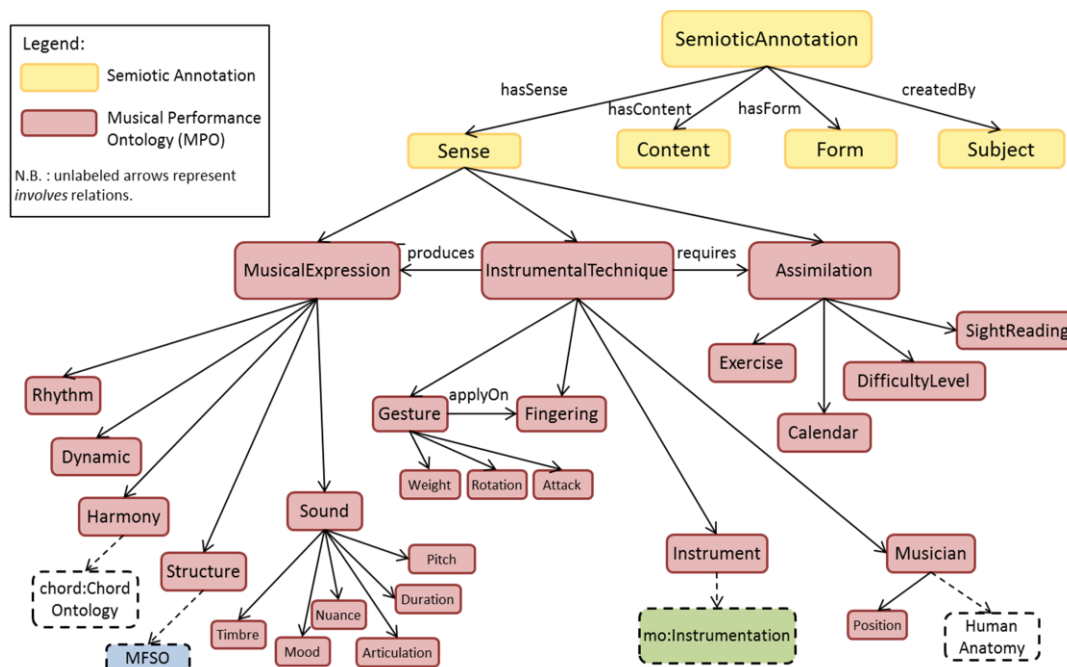


Figure 66 : Schéma de classes : Music Performance Ontology (MPO).

Afin de mieux comprendre le fonctionnement de la MPO, on propose un cas d'utilisation fictif très simple. Un musicien souhaite annoter une partition avec les assertions suivantes :

- "Voici une occurrence du leitmotiv : A1"
- "Voici une autre occurrence du leitmotiv : A2"
- "A1 et A2 sont similaires, sauf que A2 est transposé"
- "A1 (et donc A2 aussi) est basé sur le rythme suivant : croche - triolet doubles croches - noire"
- "Sur A1, bien faire attention à l'articulation : la première note est détachée. Il faut le faire avec tout l'avant-bras pour éviter une attaque trop sèche. On peut également monter légèrement en volume sur l'arpège ascendant. Mais toujours bien garder l'esprit solennel"

On identifie alors les triplets RDF<sup>46</sup> présents sur la Figure 67.

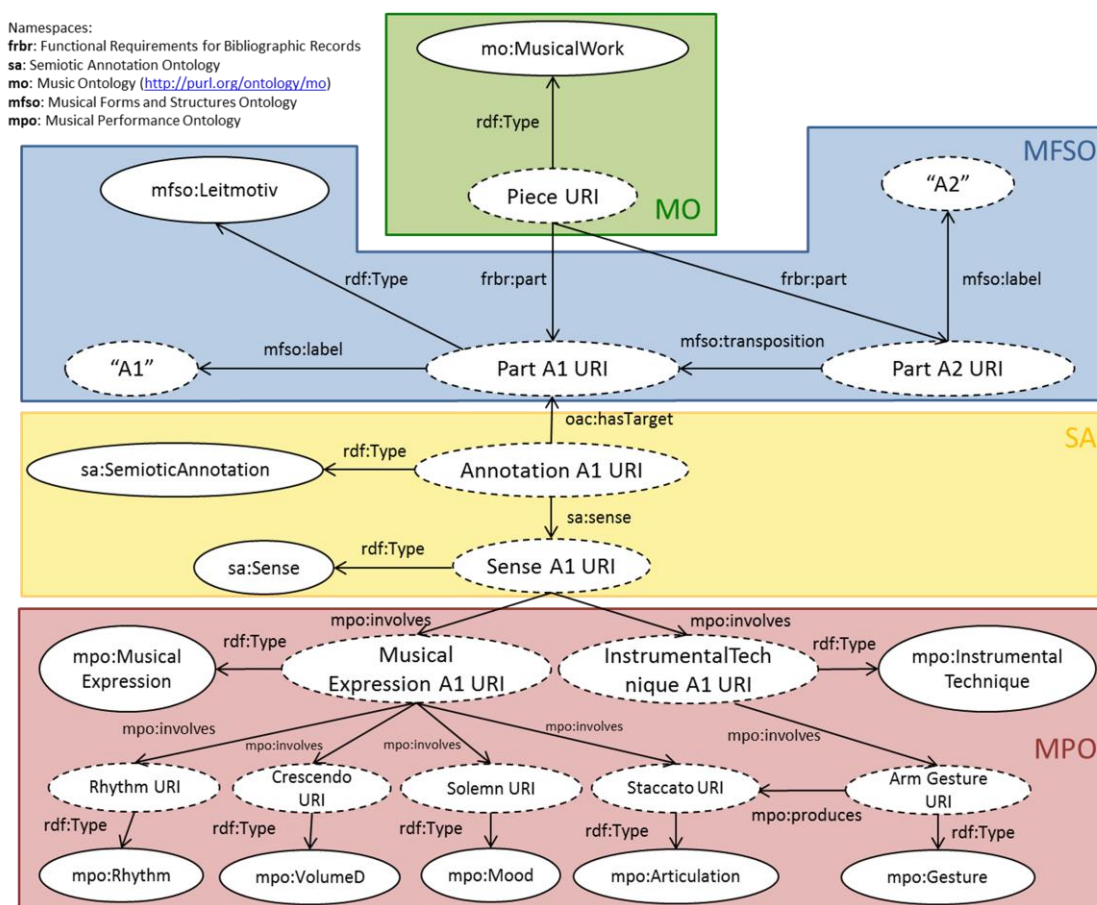


Figure 67 : Exemple d'utilisation de la MPO via l'annotation sémiotique d'une pièce.

On note la distinction fondamentale entre les objets à interpréter (pièce, extraits de la pièce) et leur interprétation (annotation sémiotique). La mise en relation des occurrences du leitmotiv (relation transposition) permet de déduire le type de A2. Elle permettra également de générer automatiquement une annotation sémiotique sur l'extrait A2 à partir des interprétations de A1 disponibles. Plus généralement, toute discussion portant sur le leitmotiv pourra être reportée sur chacune de ses occurrences identifiées (manuellement ou automatiquement). La ressource « URI rythme A1 » pourra être reliée à une notation appropriée expliquant le rythme correspondant en détail (exemple : fragment de MusicXML). Les types d'articulations, de dynamiques et de caractères les plus courants pourront être proposés dans une liste déroulante pour faciliter la saisie de la description sémantique. La description du geste de l'avant-bras reste pour l'instant sommaire : l'essentiel est de signaler que cette annotation décrit une technique permettant d'effectuer une articulation staccato (relation *mpo:produces*). Par la suite, des requêtes portant sur la réalisation de staccato ou de détachés renverront préférablement cette annotation, plutôt que des annotations ne traitant que de l'aspect expressif du détaché sans évoquer la gestuelle nécessaire à sa réalisation.

Si la décomposition en triplets semble complexe, il ne faut pas perdre à l'esprit que celle-ci reste transparente pour le musicien non informaticien. Le processus d'annotation du point de vue de l'utilisateur est analysé dans le chapitre 6. En effet, outre la modélisation délicate de l'interprétation

<sup>46</sup> RDF : Resource Description Framework.

musicale, il s'agit également de fournir une interface à même de minimiser les opérations de « tagging » pour l'utilisateur, qui privilégiera la saisie et la consultation de contenus pédagogiques.

Outre les possibilités de classification et de recherche avancée que de telles descriptions sémantiques peuvent offrir, elles fournissent également la matière première pour la mise en place d'un agent d'aide à l'annotation sémiotique. Ce programme pourra utiliser ces connaissances pour divers objectifs : proposer des termes appropriés en fonction du contexte d'étude, suggérer de nouvelles annotations sur des partitions non renseignées, comparer des techniques ou des doigtés.

Pour conclure cette partie sur l'étude et la description de Signes Musicaux, il nous reste à discuter de la qualité des descriptions produites à l'aide du modèle proposé.

### 4.3.5 Discussion : qualité de la description

Dans [32], les auteurs définissent des critères caractérisant la qualité d'une description d'un objet naturel :

- La vérité : les informations saisies sont-elles avérées ?
- La complétude : la description est-elle la plus complète possible ? Permet-elle une bonne estimation de l'objet, surtout de ses caractères spécifiques ? Les liens entre les caractères sont aussi une information importante.
- La clarté et la concision : évite-t-on les informations inutiles, des redondances ?
- La compréhension : moins souvent envisagée mais importante dans notre contexte pédagogique : les descriptions sont-elles compréhensibles par un non expert (adaptations, définitions) ?
- L'homologie : les descriptions suivent-elles le même « plan », afin de pouvoir être comparées par la suite ?

Cependant, l'application au pied de la lettre de ces critères est délicate dans notre contexte. En effet, comment juger de la qualité de la description d'une œuvre artistique, alors que celle-ci finalement n'a pas de forme tangible objective : elle est juste perçue par des individus. Or une perception varie suivant le sujet qui l'opère. Quand en biologie, on observe un objet réel, existant en dehors de toute observation (positivisme), l'œuvre d'art est nécessairement sous une forme « interprétée », quand bien même il s'agit d'une partition autographe. On ne décrit donc pas directement l'objet lui-même mais une de ses formes. Seul le compositeur pourrait juger de l'œuvre le plus objectivement possible, dans la mesure où il en est le créateur. Il peut donc estimer si son intention est bien respectée dans les interprétations (ce que faisait par exemple Ravel lors des créations<sup>47</sup> de ses œuvres par des interprètes). Toutefois, ce sujet partage réellement les interprètes (approche du pianiste Sviatoslav Richter : « on respecte à la lettre l'intention du compositeur », approche du pianiste Glenn Gould : « on fait ce que l'on veut du moment que l'on se fait plaisir »).

Notre approche sera donc de proposer des descriptions contextuelles (objectif principal, genre de la pièce travaillée, expérience de l'observateur). Il ne s'agira pas tant de déterminer si une connaissance (ou plutôt une interprétation) est vraie que si elle est utile aux musiciens, tant sur le plan technique qu'expressif. L'objectif étant d'apprendre à jouer la pièce décrite, la qualité de la description reposera donc sur la pertinence des structures identifiées et des conseils donnés pour un

---

<sup>47</sup> Le terme « création » est ici employé dans le sens de « première représentation ».

---

apprenant. Ce dernier pourra puiser dans les annotations sémiotiques disponibles (et à créer) afin de construire sa propre interprétation de l'œuvre. Dans le cadre d'une plateforme collaborative, on pourra ainsi attribuer une note d'appréciation à chaque annotation. La note pourra être pondérée par le niveau d'expertise de l'évaluateur : l'évaluation d'un professeur de musique aura bien sûr plus de valeur que celle d'un débutant (voir partie 5.4).

#### **4.4 Synthèse**

Ce chapitre a présenté la première partie de notre contribution : les fondements de la gestion des Signes pour le partage de savoir-faire. Plus précisément, on s'est intéressé aux définitions, modélisations et méthodologies d'acquisition nécessaires à la gestion de Signes dans un environnement informatique.

Dans un premier temps, les Signes ont été abordés sous l'angle théorique, du simple objet communicationnel à la manifestation d'une interprétation d'un individu. Nous avons donc introduit une nouvelle définition du Signe, dénommée Signe Interprétatif, et permettant de décrire l'interprétation d'un objet par un sujet. À l'issue d'un processus de signification, le sujet construit ce Signe Interprétatif en reliant trois composants : un contenu (ce qui est montré), une forme (ce qui supporte la démonstration) et un sens (ce que signifie la démonstration). Après avoir étudié des théories proches de la sémiotique interprétative, les apports pressentis de la gestion des Signes plutôt que des Connaissances ont été mis en évidence sur des exemples concrets de comparaison d'interprétations d'œuvres artistiques.

Dans un second temps, le concept de Signe Interprétatif a été modélisé dans un environnement informatique. Pour ce faire, on s'est fondé sur les structures manipulées en informatique : des données, des informations et des connaissances. Ces structures ont été intégrées à un modèle d'annotation sémiotique permettant de saisir, consulter et discuter des Signes Interprétatifs sur des plateformes de travail collaboratif. Afin d'intégrer ce modèle aux ontologies de haut niveau du Web Sémantique, on a proposé un schéma de classe de l'annotation sémiotique. Ce travail permet de relier le Web Sémiotique (Web des Signes, des interprétations d'individus) au Web Sémantique (Web des Connaissances, celles des machines). Par la suite, une méthodologie de saisie d'interprétations via l'annotation sémiotique a été proposée : la logique descriptive. Celle-ci s'appuie sur les processus en jeu dans l'activité pratiquée afin de proposer une démarche adaptée à la saisie d'annotations sémiotiques d'œuvres. L'objectif est de disposer d'un cadre de référence simple pour la description d'interprétations afin de faciliter les traitements futurs : requêtes, comparaisons, classifications, identifications, ou génération automatique d'annotations.

Enfin, les modèles et méthodologies proposés ont été appliqués au domaine de l'apprentissage de la musique. On a d'abord proposé une typologie générale des Signes Musicaux afin d'étudier les mécanismes de l'expression musicale, au cœur de l'apprentissage instrumental. Ces Signes Musicaux ont ensuite été liés aux techniques à mettre en œuvre pour les produire, à travers l'analyse d'un cas réel : le cours de piano. Ce dernier a permis de mettre en évidence les Signes Interprétatifs manipulés par le professeur pour transmettre son savoir-faire à l'élève musicien, afin que ce dernier construise sa propre interprétation. On a ensuite proposé de capturer ces interprétations par des annotations sémiotiques adaptées au domaine musical. Pour ce faire, on a mis au point des logiques descriptives, un modèle descriptif et des ontologies inspirées des concepts et relations en jeu dans la

pratique musicale. Pour conclure cette partie applicative, une brève discussion de la pertinence et de la qualité d'une description d'une œuvre musicale a été présentée.

---

## 5 Gérer des Signes : structure, peuplement et validation d'une Base de Signes

Dans ce chapitre, on définit une Base de Signes afin d'organiser ces derniers selon des notions de savoir-faire de plus haut niveau. Les interprétations d'objets ainsi capturées doivent en effet constituer la matière nécessaire à l'identification d'éléments de savoir-faire pratiques utilisables dans différentes situations. Pour ce faire, des traitements, automatiques ou non, peuvent-être réalisés. Notamment, il faut être sûr des méthodes décrites et de leur adaptation au contexte du problème posé, ce qui pose la question de la validation des annotations sémiotiques et des interprétations qu'elles véhiculent.

Pour ce faire, on définit d'abord les principes fondamentaux de la construction d'une Base de Signes, puis l'on décrit son organisation. La construction itérative de cette base repose sur une architecture dynamique, s'adaptant aux besoins des utilisateurs et distinguant les objets étudiés de leurs interprétations et des notions abordées. L'identification de relations entre ces éléments permet de voir la Base de Signes comme un ensemble de graphes. Une méthodologie générale de constitution de ces graphes est proposée afin de cerner au mieux les outils nécessaires et les rôles des différents acteurs. Notamment, des processus automatisables sont identifiés afin d'accompagner les usagers dans la création d'annotations sémiotiques.

On propose donc dans une seconde partie une stratégie de peuplement semi-automatique d'une Base de Signes à l'aide d'un Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique (AAAS). Cet agent exploite les modèles descriptifs et logiques descriptives définies dans le chapitre précédent afin de guider l'annotateur. Il peut également annoter un nouvel objet en recherchant ses points d'intérêt et en raisonnant sur des cas similaires.

Les annotations sémiotiques doivent ensuite être validées le plus rigoureusement possible, qu'elles soient créées par des humains ou composées par des programmes à partir de ressources existantes. Un système d'inter-validation des annotations fondé sur l'attribution de crédits et pondéré selon l'expertise des usagers est donc proposé.

Enfin, on applique les propositions décrites à la construction d'une Base de Signes Musicaux.

### **5.1 Définition et structure d'une Base de Signes**

#### 5.1.1 Principes méthodologiques : co-construction et itération

Comme vu dans le chapitre 2, l'assimilation d'un savoir-faire requiert de confronter ses productions à celles d'autres personnes, quelques soient leurs niveaux. Ce constat implique une démarche de co-construction du savoir-faire, à la rencontre entre le constructivisme de Piaget [43] et la collaboration d'individus au sein d'une communauté (socioconstructivisme). Les interactions entre ces derniers donnent lieu à la création d'annotations sémiotiques (AS) participant à la construction du savoir-faire de chaque sujet via la comparaison d'interprétations. L'annotation sémiotique est donc un support de comparaison d'approches personnelles de sujets. La co-construction n'intervient donc pas directement au sein de l'annotation, mais plutôt dans l'établissement de liens entre des annotations de sujets différents, par exemple sous la forme d'une discussion sur un aspect de l'objet étudié. Pour une notion de savoir-faire donnée, la comparaison d'annotations permet de constituer un groupe d'interprétations illustrant et explicitant cette notion suivant des approches similaires ou différentes.



Une étape de validation permet d'identifier celles qui fonctionnent et sont correctement expliquées et illustrées. On collecte ainsi des solutions plausibles, contextuelles et réutilisables sur des problèmes donnés.

Une discussion peut également amener un sujet à modifier son approche, et donc son annotation. Afin de ne pas effacer les traces des réflexions passées, l'annotation sémiotique est donc dupliquée et identifiée comme une deuxième version de la précédente, plus aboutie. L'interprétation du sujet peut donc se construire itérativement, suivant le processus de signification décrit dans la partie 4.1.4.

Co-construction et itération peuvent également intervenir en amont de l'interprétation des objets, dès la conception d'un modèle descriptif de ces derniers. En effet, la conception d'un modèle implique un consensus a priori sur l'observable. Une discussion peut mettre en évidence des lacunes dans le modèle, appelant à le modifier. Cependant, il faut prendre garde à ne pas aboutir à un modèle distinct par sujet, car on perdrait alors la possibilité d'établir des comparaisons entre les différentes interprétations. Chaque modification doit donc être justifiée grâce à un processus adapté.

L'approche « Base de Signes » privilégie donc l'étude de cas concrets illustrant des notions abstraites (approche ascendante) à l'inverse, c'est-à-dire l'apprentissage de notions théoriques explicitées ensuite par des exemples (approche descendante). Cette conception est particulièrement adaptée aux études artistiques où l'apprentissage s'effectue principalement par la pratique, c'est-à-dire l'interprétation ou la reproduction d'œuvres. Les notions importantes peuvent être articulées par la suite, afin par exemple de proposer des parcours d'exploration originaux fondés sur des corpus illustrés.

### 5.1.2 Définition d'une Base de Signes

Une Base de Signes désigne un ensemble de Signes Interprétatifs explicitant des objets selon les points de vue de sujets. Ces Signes peuvent être utilisés pour résoudre des situations problématiques et expliciter des notions de savoir-faire par des exemples concrets. Dans le cadre d'une plateforme d'annotation sémiotique collaborative, la Base de Signes est composée de l'ensemble des

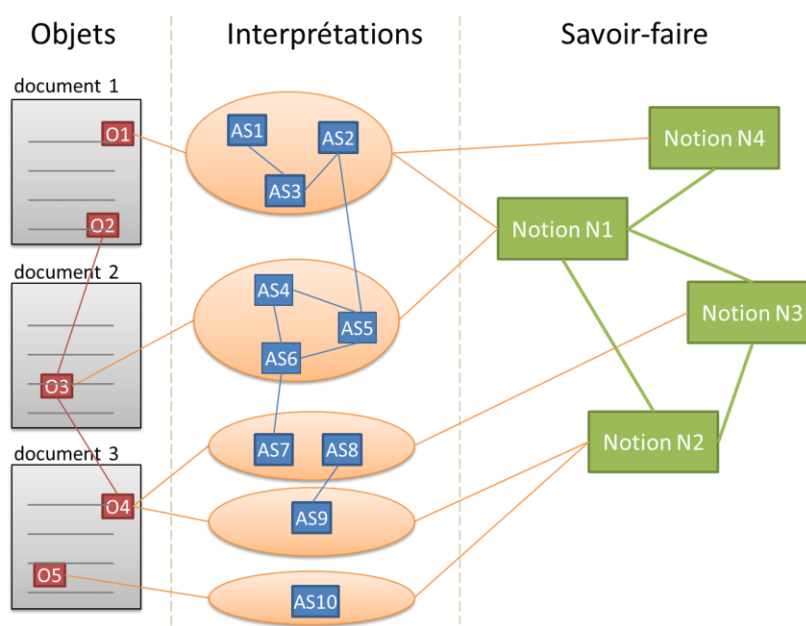


Figure 68: architecture générale d'une Base de Signes.

annotations sémiotiques et des relations qu'elles entretiennent dans un contexte d'identification et de description d'éléments de savoir-faire pratiques essentiels au domaine considéré. On nomme ces éléments des notions de savoir-faire.

La Figure 68 présente l'architecture générale d'une Base de Signes. Plus précisément, la base comprend :

- **Des objets d'étude.** Les objets peuvent être des situations, des œuvres ou leurs éléments constitutifs. Le mot « objet » est ici employé dans le sens général de « ce qui est observé », par opposition au « sujet » qui est « celui qui observe ». Dans la Base de Signes, les objets étudiés sont représentés par des documents de références et leurs parties. Ces parties peuvent être extraites lors d'une phase de structuration du document, et donc indirectement de l'œuvre ou de la situation représentée. Cette phase peut être réalisée via un modèle descriptif adapté à l'objet étudié (description des différents éléments d'une œuvre musicale, picturale, d'une situation type, voir partie 4.3.4.2 pour un exemple en musique). Elle permet d'adresser les parties significatives de l'objet et leur représentation concrète dans le document de référence. A titre d'exemple, l'étude de la pièce Frère Jacques en musique pourra donner lieu à l'explication de plusieurs documents de référence : la partition pour une voix, la partition pour quatre voix et l'enregistrement audio de Chantal Goya en 1986. Les structures identifiées et/ou annotées sur chaque document peuvent être liées suivant les caractères qu'elles partagent. On pourra par exemple identifier le premier couplet de la comptine sur chacun des documents. On obtiendra alors trois objets distincts, mais liés par une relation exprimant le fait qu'ils représentent le même couplet de l'œuvre. Des éléments d'œuvres distinctes peuvent également être mis en relation suivant les caractères qui les lient. On forme ainsi un ensemble de graphes d'objets  $G_O = \{G_{O1}, G_{O2}, \dots, G_{On}\}$  où chaque  $G_{O_i}$  est un graphe orienté à arrêtes multiples d'objets et  $n$  est le nombre total de graphes identifiés.  $n$  varie en fonction des relations identifiées entre les objets étudiés.  $G_{O_i}$  est orienté dans la mesure où les relations entre les objets ne sont pas nécessairement symétriques. Plusieurs relations distinctes peuvent être établies entre deux objets, afin d'exprimer avec précision les caractères qui les lient.
- **Des interprétations :** saisies sous la forme d'Annotations Sémiotiques (AS) d'objets. Tout comme ces derniers, les AS peuvent être reliées entre elles (voir partie 4.2.3 pour des exemples de relations). On identifie ainsi un ensemble de graphes d'AS noté  $G_{AS} = \{G_{AS1}, G_{AS2}, \dots, G_{ASn}\}$  où chaque  $G_{AS_i}$  est un graphe orienté à arrêtes multiples d'AS et  $n$  est le nombre total de graphes d'AS.
- **Des notions de savoir-faire :** ces entités permettent de rassembler les AS selon les thèmes traités et les notions qu'elles aident à assimiler. Les notions se distinguent des descriptions sémantiques des AS et peuvent être identifiées suite au peuplement de la Base (approche ascendante). Par rapport aux descriptions sémantiques de l'AS, la notion décrit une compétence à acquérir ou un élément à comprendre. En musique par exemple, différentes AS pourront être rattachées à la notion « savoir lire la clé de fa » ou « effectuer une rotation du poignet » ou encore « découvrir les compositeurs contemporains ». Les notions permettent d'identifier explicitement les savoir-faire en jeu dans le domaine étudié, et de les articuler. Ainsi, certaines notions nécessitent des prérequis, d'autres sont abordées via des exercices particuliers, sont facultatives ou obligatoires. Les liens entre notions permettent ensuite de tracer un parcours pédagogique global dans un contexte d'assimilation de savoir-

faire par l'étude d'objets et de leurs interprétations. Ce parcours pourra être personnalisé selon le profil d'un utilisateur. On définit ainsi un ensemble de graphes de notions noté  $G_N = \{G_{N1}, G_{N2}, \dots, G_{Nn}\}$  où chaque  $G_{Ni}$  est un graphe orienté à arêtes multiples de notions et  $n$  est le nombre total de graphes de notions.

Une Base de Signes  $B_{Sn}$  est ainsi définie comme suit :

$$B_{Sn} = G_O \cup G_{AS} \cup G_N$$

Avec  $G_{AS} \neq \{\emptyset\}$ .

On a de plus les propriétés suivantes :

- Si  $G_{AS} = \{\emptyset\}$  et  $G_O \neq \{\emptyset\}$ , on a une base d'objets non interprétés et non une base de Signes.
- Si  $G_O = \{\emptyset\}$ , alors  $G_{AS} = \{\emptyset\}$  (une annotation sémiotique se rapporte nécessairement à un objet précis).
- $G_N$  peut être vide (les graphes de notions sont facultatifs).

### 5.1.3 Modélisation des Graphes

La modélisation effective des graphes précédemment définis peut s'effectuer avec les modèles de description de connaissances usuels, en prenant garde à distinguer les connaissances objectives (ou du moins conventionnellement perçues comme telles) des interprétations subjectives. Pour ce faire, on emploie l'ontologie d'Annotation Sémiotique dont le schéma de classe a été donné dans la partie 4.2.3 du chapitre précédent. Cette modélisation permet aussi bien de décrire les AS, que de les relier entre elles afin de constituer des Graphes d'AS. La modélisation des Graphes d'Objets dépendra bien sûr de la nature de ces objets. L'approche décrite dans la partie 4.2.3 s'appliquait aux œuvres, toutefois, on peut également construire une Base de Signe sur des situations ou des phénomènes naturels à interpréter. Ces derniers doivent cependant disposer de représentations documentaires susceptibles d'être annotées. Plus grande sera la qualité de ces représentations (standardisées, structurées), plus simple sera le processus d'annotation sémiotique. Enfin, les Graphes de Notions peuvent être modélisés d'une part à l'aide des descriptions sémantiques des AS pour les notions elles-mêmes, et d'autres parts via des ontologies spécialisées dans la description de concepts pédagogiques pour les liens entre les notions (voir partie 5.2.3).

Un exemple de Base de Signes Musicaux est donné dans la partie 5.5.

Dans la partie suivante, on détaille le processus de co-construction de cette dernière, aboutissant aux graphes précédemment définis. Cette démarche nous permet d'identifier les points pouvant bénéficier de traitements automatiques afin d'assister les utilisateurs dans la saisie de leurs interprétations.

## **5.2 Peuplement d'une Base de Signes**

Une Base de Signe ne repose pas sur une architecture et des contenus fixes prévus par ses concepteurs, mais sur un assemblage cohérent de Signes saisis par des utilisateurs en fonction de leurs besoins et centres d'intérêt. Ces Signes peuvent être construits à partir des nombreuses ressources en accès libre sur le Web ou à partir de captations réalisées par l'utilisateur lui-même. Cette activité permet de construire pas à pas la Base de Signes, et plus précisément les graphes

d'objets, d'AS et de notions présentés précédemment. On décrit ci-dessous les différentes phases de cette construction.

### 5.2.1 Constitution des graphes d'objets

La constitution de graphes d'objets s'effectue en deux phases principales. La première, obligatoire, consiste à alimenter la plateforme en objets à étudier : des œuvres, des situations, des spécimens. Ces objets sont représentés par des ressources de références (au minimum une par objet). La seconde, facultative, car pouvant également être réalisée « au fil de l'eau » au gré des AS saisies par les usagers, consiste à identifier des structures particulières (sous-objets ou parties) sur chaque objet. Ces « sous-objets » constituent autant de points d'intérêt pour les utilisateurs, et sont potentiellement sources d'interprétations distinctes. Chaque sous-objet est un nouvel objet d'étude à part entière. L'utilisation d'un modèle descriptif adapté permet d'accompagner l'utilisateur dans l'identification de ces sous-objets (voir partie 4.2.4). Une description détaillée de la structure d'un objet fournit un canevas d'étude et d'illustration de ce dernier, exploitable par exemple dans un cadre de création de leçons interactives. Ils peuvent être mis en relation, indépendamment des objets de plus haut niveau auxquels ils appartiennent, afin de constituer des graphes d'objets.

Plus précisément, la démarche de constitution des graphes d'objets d'une Base de Signes est la suivante :

- **Phase 1 (obligatoire) : identification et documentation d'un nouvel objet**
  - Saisie d'un nouvel objet : les descriptions d'objets sont entrées sur la plateforme par les utilisateurs en fonction de leurs besoins. La Base de Signe peut se superposer à une plateforme de partage de ressources déjà en place afin d'annoter des objets existants. L'utilisateur effectue alors une recherche sur la plateforme : s'il ne trouve pas l'objet qu'il souhaite étudier, l'interface lui propose de saisir une description de ce dernier via un formulaire. Assistance automatique possible : Une base de Connaissances appropriée au domaine considéré peut être exploitée afin de renseigner automatiquement certains champs décrivant l'objet à étudier.
  - Saisie d'une ressource de référence : la ressource de référence permet de rattacher les AS à une représentation concrète de l'objet étudiée (exemple : extrait de partition, de vidéo, de texte, etc.). Assistance automatique possible : Si l'utilisateur ne dispose pas d'un document de référence pour l'étude de l'œuvre, des suggestions peuvent lui être faites via des requêtes à des services tiers (exemple : recherche de partitions du domaine public).
- **Phase 2 (facultative) : identification de sous-objets et mise en relation des objets**
  - Description avancée de l'objet / Identification des parties importantes (facultatif) : l'utilisateur est incité à identifier les éléments constitutifs caractéristiques de l'objet étudié afin de disposer d'une vue détaillée de ce dernier et de faciliter l'identification de sous-objets intéressants à interpréter par des annotations. Pour ce faire, des outils de sélection adaptés à la ressource de référence choisie lui sont proposés. L'utilisateur peut soit identifier d'abord tous les sous-objets, soit annoter chaque sous-objet au fur et à mesure de leur identification. Chaque sous-objet constitue un nouvel objet d'étude en soi : les objets peuvent donc être imbriqués selon une logique de composition. Assistance automatique possible : Démarche de structuration guidée par un modèle descriptif adapté à l'objet d'étude dans son

contexte. Recherche automatique de structures remarquables (analyse automatique de l'objet étudié : forme, style, structures, difficultés).

- Mise en relation des objets : l'utilisateur peut ensuite établir des liens entre les objets (similarités, contrastes, hommages, ordre de lecture, etc.), qu'il s'agisse de relations internes (entre objets du même document de référence) ou de relations externes (entre objets appartenant à des documents de référence distincts). Cette dernière étape de construction du graphe des objets permet d'identifier les arêtes de ce dernier. Assistance automatique possible : Reconnaissance automatique de similarités entre les structures (occurrences, variations, motifs inversés, etc.).
- **Identification de sous-objets « au fil de l'eau » :**
  - Chaque AS s'appuyant sur un objet ou un sous-objet, l'identification précise du contexte d'une AS peut générer un nouveau sous-objet si celui-ci n'a pas déjà été identifié par un autre sujet. Une fois les ressources de référence disponibles, la génération de graphes d'objets s'effectue donc généralement de façon transparente lors du processus d'annotation de ces ressources. Cependant, il est toujours possible de dissocier les deux (identification des objets en amont, annotation sémiotique de ces objets en aval).

### 5.2.2 Constitution des graphes d'AS

Une fois les objets d'étude renseignés et les ressources de références disponibles, les utilisateurs peuvent procéder à leur annotation. La démarche de constitution du graphe des AS d'une Base de Signes est la suivante :

- **Phase 3 : Sélection de l'objet à annoter** : deux situations peuvent se présenter selon la nature de cet objet :
  - L'utilisateur souhaite créer une AS portant sur la totalité de l'objet (exemple : interprétation de la totalité d'une œuvre musicale) : l'objet étant normalement déjà renseigné suite à la phase 1, il peut passer à l'étape suivante.
  - L'utilisateur souhaite créer une AS portant sur une partie d'un objet (sous-objet) :
    - si cette partie n'est pas déjà identifiée, il doit se reporter à la phase 2 afin de la définir par une sélection.
    - sinon, il peut choisir cette partie et passer à l'étape suivante
- **Phase 4 : Saisie et mise en relation des AS**
  - Saisie de l'AS : l'utilisateur ajoute du contenu et décrit son annotation (composants contenu, sens et forme de l'AS). Il peut utiliser des ressources existantes ou procéder à une captation multimédia. Assistance automatique possible : Suggestion de contenus annexes adaptés au thème de l'AS. Suggestions de mots-clés en fonction du contexte de l'AS.
  - Mise en relation des AS (facultatif) : l'utilisateur peut lier son AS à d'autres AS précédemment créées. Assistance automatique possible : Suggestion automatique d'annotations similaires.

La Base de Signe peut très bien fonctionner avec des ensembles d'objets et d'AS interconnectés. Mais l'identification des notions traitées à travers ces objets interprétés permettrait de mieux appréhender les savoir-faire en jeu et les meilleures façons de les aborder.

### 5.2.3 Emergence et constitution des graphes de notions

L'objectif d'une Base de Signes peut également être la réalisation d'une « carte » des notions liées à un domaine particulier à travers l'illustration de situations concrètes. En effet, une notion de savoir-faire peut être identifiée suite au regroupement de plusieurs AS traitant de thèmes similaires. Les notions peuvent être extraites de combinaisons de tags ou de descriptions sémantiques récurrentes. Elles peuvent donc être issues d'un processus de classification des AS : elles sont les labels des classes obtenues.

- **Phase 5 : identification de notions**

- Groupement d'AS : des annotations sémiotiques traitant de thèmes proches sont regroupées et présentées à des utilisateurs experts afin d'identifier les différentes notions abordées par ces AS. La dénomination d'une notion doit être effectuée par des spécialistes afin d'être respectueuse des standards de plus haut niveau du domaine considéré et rester relativement stable dans le temps (contrairement aux AS, représentant des interprétations à des moments donnés et sur des objets particuliers), sans pour autant restreindre la définition de nouvelles notions, les pratiques pouvant évoluer au cours du temps. Chaque notion doit comporter une description synthétique et l'ensemble des AS validées qui s'y rapportent. Cette procédure permet de s'assurer que chaque notion est illustrée par des objets et AS pertinents, dont le contenu et le sens ont été validés par des experts. Assistance automatique possible : classification hiérarchique ascendante des AS. Une notion peut alors être vue comme un label résumant les AS peuplant une classe.

- **Phase 6 : classification, mise en relation et caractérisation des notions**

- Des liens peuvent être établis entre différentes notions. Si une classification ascendante hiérarchique a été opérée, ces liens peuvent simplement être les relations de spécialisation/héritage en résultant. Il convient alors de bien caractériser le lien existant entre différentes notions rassemblées au sein d'une même classe. Ainsi, en musique par exemple, la notion « aborder la musique romantique » inclut les notions « jouer Chopin », « découvrir le rubato », « virtuosité et romantisme », « ornements dans la musique romantique », etc. Les notions peuvent également être caractérisées par leur type de contenu (technique/expression ou exercice/master classe/interprétation), par leur importance (obligatoire/facultatif), leur niveau de complexité (facile/moyen/difficile ou 1<sup>er</sup>/2<sup>ème</sup>/3<sup>ème</sup> cycle), ou être ordonnées par séquences (prérequis, parcours découverte). Assistance automatique possible : suggestion de liens entre deux notions à partir d'une caractérisation des AS illustrant respectivement ces deux notions.

La Figure 69 illustre ces deux dernières étapes : les notions N1 et N2 sont créées suite à l'identification d'AS partageant des tags et niveaux de difficultés communs. Cette classification des AS fournit de plus une description de chaque notion. N1 est caractérisée par la présence des tags t1, t2 et t3 et par un niveau de difficulté de débutant à intermédiaire. N2 est caractérisée par la présence des tags t4, t5 et t3 et par un niveau de difficulté avancé. On en déduit donc la relation « N2 est plus difficile à aborder que N1 », labellisée « harderThan ».

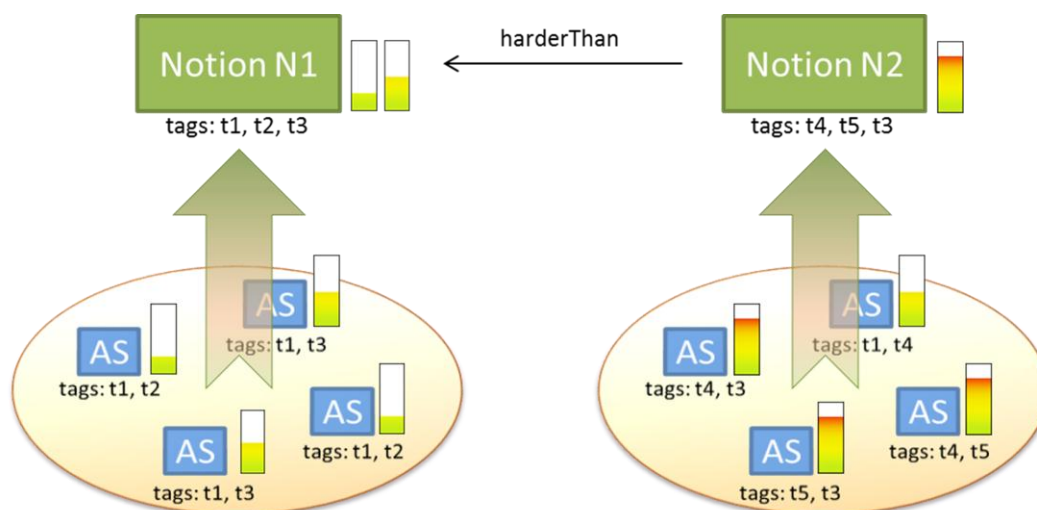


Figure 69 : Emergence et comparaison de notions de savoir-faire.

On peut affecter un ou plusieurs spécialistes à chaque notion afin d'en assurer le suivi. Cet usager expérimenté assure alors l'identification ou la création d'AS de qualité pour illustrer la notion dont il est responsable. Identifier les notions essentiellement à posteriori de la création d'AS permet notamment de repérer des difficultés tacites, non nécessairement formulées dans une approche d'apprentissage à distance calqué sur un programme préétabli. Cette approche ascendante privilégie « le terrain », c'est-à-dire les problèmes rencontrés par les usagers sur les objets qu'ils étudient véritablement, à une approche plus théorique anticipant les objets et notions à aborder.

Les différentes phases de ce processus de constitution d'une Base de Signes font apparaître de nombreuses possibilités d'automatisation. Nous décrivons donc dans ce qui suit un Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique.

### 5.3 Automatisations : aide à l'annotation sémiotique

#### 5.3.1 Besoins et objectifs

Une Base de Signes repose sur l'activité d'utilisateurs motivés à créer des contenus de qualité pour partager leur expérience dans un domaine de savoir-faire. Dans ce contexte, les tâches à réaliser sont nombreuses : rechercher des informations (sur la plateforme, ou sur des sites externes), les mettre en forme, faire des sélections, relier des informations, capturer des contenus audiovisuels, classer et tagger des annotations. Ces activités requièrent une interaction continue avec le service d'annotation. Ce dernier doit donc présenter une interface adaptée à la captation de contenus audiovisuels et à la saisie de connaissances sur le lieu même de pratique du savoir-faire étudié (un atelier, une salle de musique, le domicile d'un professeur ou d'un élève, en pleine nature). Les contraintes d'interface et de connectivité qui en découlent sont abordées dans le chapitre suivant au travers d'un prototype de plateforme d'annotation sémiotique de partitions musicales. Dans cette partie, nous proposons de concevoir un agent logiciel d'aide à l'annotation sémiotique de documents. En effet, comme souligné dans la partie 5.2, de nombreuses étapes du processus de peuplement de la Base de Signes peuvent faire l'objet d'automatisations. Il s'agit essentiellement de faciliter les interactions entre l'usager et le service, afin que le premier puisse se concentrer sur son interprétation en se préoccupant le moins possible du fonctionnement du second. Il s'agit également de proposer des parcours adaptés aux objectifs et besoins des usagers en termes de choix, d'analyse

et d'interprétation de nouveaux objets. Ces objectifs varient selon que ces derniers se positionnent comme formateur ou formé. Ce dernier point nous amène notamment à approfondir la notion de complexité d'un objet : quels sont les points difficiles à aborder pour un débutant ? Pourquoi est-ce difficile ? Est-ce lié à la nature même de l'objet étudié, à la notion abordée via cet objet, ou encore à l'approche employée ? Comment surmonter ces difficultés ? Existe-t-il des cas similaires déjà traités ? Peut-on les réutiliser ? Si oui, comment ? Le rôle de l'Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique est d'anticiper ces questions et d'y fournir des éléments de réponses ultérieurement validées par des usagers expérimentés.

### 5.3.2 Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique (AAAS)

#### 5.3.2.1 Définition et fonctionnalités d'un AAAS

Un Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique (AAAS) est un module d'une Base de Signe dédié à l'assistance des usagers d'une plateforme d'annotation sémiotique. Ce programme a deux principaux objectifs : aider l'utilisateur à créer des annotations, et générer automatiquement de nouvelles annotations afin de peupler la Base. Pour ce faire, l'AAAS raisonne sur les objets déjà interprétés dans la base afin de résoudre des problèmes. Il exploite également les modèles et logiques descriptives implémentés sur la plateforme. Les résultats obtenus peuvent être suggérés aux usagers et soumis à leur appréciation avant d'être injectés dans la Base sous forme de nouvelles annotations sémiotiques ou de liens entre ces dernières.

L'AAAS peut se spécialiser en Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique pour l'Enseignant (AAASE) ou en Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique pour l'Apprenant (AAASA). On identifie alors les fonctionnalités suivantes :

Fonctionnalités communes :

- Saisie guidée d'annotations : indication de structures remarquables (signifiantes, redondantes, complexes, etc.).
- Requêtes complexes (question technique, recherche de structures, d'expressions sur un corpus).
- Suggestions de tags pour un contenu (texte, vidéo, audio).
- Suggestions de contenus (objets, annotations) selon les intérêts et besoins de l'utilisateur.
- Génération automatique de nouvelles annotations sémiotiques à partir des cas existants.
- Aide à la saisie d'interprétation : dispositif de capture adapté aux préférences de l'utilisateur.
- Génération automatique de liens entre annotations, entre objets.
- Détection de l'émergence de techniques ou de notions nouvelles.
- Détection d'inconsistances (interprétation peu crédible, usage erroné de tags).

Fonctionnalités AAASA :

- Recommandation de nouveaux objets à étudier selon les goûts et le niveau de l'apprenant.
- Détection des difficultés sur un nouvel objet à étudier.
- Recommandation d'annotations sémiotiques (exercices, leçons, master classes).
- Analyse automatique d'interprétations : qualité technique, qualité expressive, originalité, comparaison d'interprétations.
- Statistiques, tableau de bord (contributions, progrès réalisés, notes, groupes, favoris).



- Réalisation de parcours personnalisés : par objets annotés ou par notions, selon les goûts et les besoins de l'apprenant.

Fonctionnalités AAASE :

- Création de leçons sur un nouvel objet ou sur une notion : saisie guidée d'AS selon un modèle descriptif adapté à l'objet, suggestions de termes à partir d'un vocabulaire contrôlé.
- Notification de questions, d'annotations à valider.
- Gestion de groupes d'apprenants (« push » de messages, de ressources ou d'annotations, gestion de rendus d'exercices, notification de questions, tableaux de bord).
- Communication entre professeurs (comparaison d'approches pédagogiques, organisation de master classes).

Certaines de ces fonctionnalités supposent un profil détaillé et à jour de l'utilisateur afin de cerner au mieux ses motivations, son niveau et son expérience dans le domaine. L'implémentation de ces fonctionnalités dépend du domaine considéré. On propose donc une application au domaine musical dans la partie 5.5.4. Cependant, la démarche générale d'annotation automatique d'objet est sensiblement la même dans tous les domaines. On propose donc de construire un algorithme de génération d'annotations sémiotiques sur un nouvel objet. Cet algorithme se divise en deux étapes : identifier les problèmes et points d'intérêts de l'objet, puis y proposer des solutions ou interprétations pertinentes en réutilisant des cas existants. Chacune de ces étapes doit être validée par l'utilisateur qui reste l'opérateur principal de cette démarche d'annotation sémiotique guidée.

Cet algorithme se fondant sur une méthode de raisonnement à partir de cas, il convient d'abord de définir avec précision ce qu'est un cas dans un contexte de gestion de savoir-faire par le partage d'interprétations.

### 5.3.2.2 Définition et identification de cas en gestion de savoir-faire

On entend ici par « cas » l'association d'un objet d'étude, d'un problème posé par cet objet, et d'un ensemble d'approches susceptibles de résoudre ce problème. Compte-tenu du contexte de notre travail, ce problème consiste essentiellement en l'interprétation ou la description d'un aspect de l'objet donné. Formellement, on peut donner la définition suivante.

Soient  $O$  un ensemble d'objets,  $S$  un ensemble de sujets et  $T$  une ligne temporelle. Soit  $a$  une fonction d'annotation sémiotique sur  $O \times S \times T$ . On définit un cas  $c$  comme l'association d'un objet  $o$  de  $O$  et d'un ensemble d'Annotations Sémiotiques sur  $o$  noté  $A_c = \{ a(o, s, t) | t \in T, s \in S \}$  et vérifiant les conditions suivantes :

- Les AS de  $A_c$  sont « de qualité » : si  $c(a(o, s, t))$  représente le taux de crédibilité d'une AS, alors on a  $c(a(o, s, t)) > T$  où  $T$  représente un seuil de validité de l'AS à préciser. (voir partie 5.4 sur la validation des AS).
- Les AS de  $A_c$  traitent de thèmes communs (relations question/réponse ou de similarité), même si elles proposent des approches distinctes.

Ainsi défini, le cas est bien composé à la fois de l'exposé d'une situation (l'objet étudié), du problème posé par cette situation (le thème commun des AS) et d'un ensemble de solutions éprouvées (crédibilité élevée des AS).

Cependant, les AS modélisent des interprétations plus que des solutions définitives. La construction d'un cas requiert donc de bien identifier les AS exploitables. Ainsi, une AS contenant une question d'un élève peut recueillir un taux de crédibilité important si la question posée est pertinente. Si elle n'apporte pas nécessairement une réponse au problème posé, elle peut constituer un cas d'étude intéressant dans la mesure où elle révèle peut-être un problème courant. Par ailleurs, un objet peut être interprété par un fil d'AS connectées représentant une discussion entre différents utilisateurs. Les AS de type « réponse » ne sont donc pas nécessairement complètes en terme de sens, contenus et formes. Cependant, l'association de ces différentes AS peut constituer une approche intéressante du problème posé. Enfin, l'identification de problèmes et de solutions associées reste subjective dans certaines situations. Certains utilisateurs sont plus sensibles à certains types de problèmes ou d'approches qu'à d'autres selon leurs dispositions et leur expérience dans le domaine considéré. A un haut niveau de personnalisation, l'AAAS peut donc prendre en compte le profil de l'utilisateur afin d'adapter les annotations proposées à ce dernier.

### 5.3.2.3 Annotation sémiotique automatique d'objets à partir de cas

L'AAAS propose une fonctionnalité d'annotation automatique de nouveaux objets. La démarche globale de génération de telles annotations est détaillée en pseudo-langage sur la Figure 70. La fonction *annotationAuto* s'applique à un document de référence d'un objet donné. Naturellement, l'extraction d'objets d'étude pertinents dépend du type de document analysé (image, fichier XML, etc.). L'AAAS peut assister l'utilisateur dès la mise en ligne d'un nouveau document de référence sur la plateforme. La première étape est donc de vérifier les métadonnées du document pour éventuellement les corriger ou les compléter. La seconde étape est de proposer à l'utilisateur d'illustrer l'ensemble du document à l'aide de ressources multimédia. Dans le domaine musical, il s'agira par exemple de saisir une interprétation de la pièce étudiée, une courte biographie du compositeur, quelques informations sur le style de la pièce, son atmosphère générale, etc. Chaque suggestion réalisée par l'AAAS doit être validée par l'utilisateur avant d'être définitivement intégrée à la Base de Signes. La troisième étape consiste en la recherche de points d'intérêt dans le cadre de l'étude de l'objet donné. Une fois validés, ces points génèrent de nouveaux sous-objets à illustrer. La dernière étape de l'algorithme est donc de trouver des AS susceptibles d'illustrer ces nouveaux objets. Ces deux dernières étapes sont détaillées dans ce qui suit.

#### **Recherche d'objets d'étude pertinents sur un document : structures significatives et critères de difficulté d'un domaine de savoir-faire**

Soit un document de référence pour un objet donné. Comment trouver les éléments intéressants à étudier dans ce document ? Il convient tout d'abord de préciser ce qui est entendu par « intéressant ». Dans notre contexte pédagogique, on considère qu'on extrait une partie d'un document pour deux raisons principales : cette partie présente une structure significative de l'objet d'étude (elle a de l'importance, du sens, par rapport aux autres éléments), ou bien cette partie est complexe à interpréter ou reproduire (elle requiert un niveau élevé dans le domaine considéré).

Ces deux critères étant assez subjectifs, ils doivent être identifiés en priorité par des usagers expérimentés de la plateforme d'annotation. Cependant, en l'absence de telles informations, l'AAAS peut tenter d'extraire ces objets importants en se fondant sur une analyse détaillée du document de référence. Cela suppose que ce document propose une description logique des composants de

```

annotationAuto (doc) :
  Entrée : doc, un document de référence à annoter
  Sortie : as, un tableau d'annotations sémiotiques attachées aux objets de doc
           obj, un tableau des objets importants de doc.
//Vérification des métadonnées
  Identification des métadonnées essentielles au domaine
  Remplissage des champs manquants à l'aide de Bases de Connaissances externes
  Validation nouveaux champs √ x
//Illustration du contexte
  Capture ou recherche de ressources contextuelles de qualité
  Validation des ressources √ x
//Recherche d'objets d'étude pertinents
  obj = [] // tableau des objets importants de doc
  as = [] // tableau des annotations sémiotiques générées sur les objets de doc
  //recherche d'objets caractéristiques de doc sur la base d'un modèle descriptif
  Si ∃ Modèle descriptif(doc)
    n=nombre d'étapes du modèle
    Pour k allant de 1 à n faire :
      Si étape k = 'rechercher d'objets de type K' :
        objK = rechercheObjK(doc)
        obj[] = objK
  //recherche d'objets remarquables divers
  objDiv = rechercheObj(doc)
  obj[] = objDiv
  //recherche d'objets complexes, difficiles à interpréter (nature de la complexité à définir)
  objDiff = rechercheObjDiff(doc)
  obj[] = objDiff
  //Validation des objets extraits
  Pour chaque o dans obj faire :
    Afficher o sur doc
    Validation existence, position et nommage de o √ x
    Si o non validé :
      supprimer o de obj
  //Annotation des objets extraits
  Pour chaque o dans obj faire :
    ao = []
    ao = annotationAuto(o) //recherche d'annotations sémiotiques pouvant illustrer o
    validation de ao √ x
    Si ao validé :
      as[] = ao
  Retourner obj, as

```

Figure 70 : Algorithme d'annotation semi-automatique d'objets.

l'objet d'étude (format XML par exemple), sinon, une étape supplémentaire d'analyse est nécessaire (exemple : reconnaissance automatique de formes ou de caractères pour une image).

Comme énoncé par l'algorithme de la Figure 70, l'existence d'un modèle descriptif de l'objet à analyser facilite la recherche de structures significatives. En effet, le modèle permet de disposer d'une description précise des structures caractéristiques que devraient comporter l'objet. La recherche de structures est donc guidée par ce modèle. En musique par exemple, l'AAAS recherchera les sujets, réponses et strettis d'une pièce correspondant au modèle « Fugue ». Si aucun modèle ne correspond à l'objet analysé, la recherche doit s'effectuer sur des critères plus généraux du domaine considéré. En musique, on cherchera donc plus généralement les thèmes ou les motifs répétés.

La recherche d'éléments complexes est caractéristique de notre approche pédagogique. Les éléments réputés difficiles à interpréter ne correspondent pas nécessairement à des structures significatives mais plutôt à des expériences « de terrain » faites par les apprenants. La conception de l'AAAS s'accompagne donc d'une analyse précise des difficultés couramment rencontrées dans le domaine considéré : qu'est-ce qu'un cas difficile ? Quelles sont les raisons de sa difficulté ? Comment

ces différentes causes s'influencent-elles ? Cette analyse permet d'obtenir une liste de critères caractérisant le niveau de difficulté d'interprétation ou de compréhension d'un objet donné. L'usage d'une grille appropriée permet ensuite de mieux cibler les éléments difficiles. L'intérêt de cette méthode est également de fournir les causes probables de difficulté d'un élément. Pour un objet reconnu comme étant difficile à interpréter, la recherche de cas ne se fonde donc pas uniquement sur l'identification de similarités entre les objets étudiés, mais également sur la pertinence des cas proposés par rapport aux problèmes identifiés sur l'objet d'étude.

Dans notre cadre, on définit un critère de difficulté comme une variable dont la valeur permet d'estimer le degré de difficulté d'interprétation d'un objet. Ce critère se calcule à partir des propriétés de l'objet étudié et éventuellement du profil d'un sujet. Il permet donc de déduire le niveau requis pour produire des interprétations de qualité de l'objet considéré. La Figure 71 décrit une méthodologie itérative d'identification et de modélisation d'un critère de difficulté dans un domaine donné :

- Identification d'un critère de difficulté : Cette étape consiste à déterminer les conditions d'apparition d'une difficulté. L'analyse de cas d'occurrence réels de la difficulté permet de cerner son contexte de survenue, ses conditions propices, ses facteurs d'accentuation ou d'atténuation, etc.
- Formalisation du critère : on tente ici de formaliser le critère identifié à l'aide de mesures, de moyennes, par la conception de fonctions de coûts ou l'identification de seuils à partir de questionnaires ou autres types d'expérimentations. On cherche notamment à échelonner les différents niveaux de difficulté ressentis pour le critère identifié.
- Conception d'une méthode de mesure : l'étape précédente est capitalisée sous la forme d'une méthode de mesure du degré de difficulté du critère reposant sur les coûts et seuils estimés.
- Adaptation au type de document analysé : la méthode est implémentée en fonction du format du document à analyser. Des traitements supplémentaires peuvent être appliqués au document afin de disposer des informations nécessaires au calcul du critère.
- Validation expérimentale : Le critère identifié est estimé sur un corpus de documents selon la méthode automatique construite d'une part, et d'autres parts selon l'expertise et le ressenti d'humains via un questionnaire. Le niveau des sondés doit être pris en compte afin de disposer de résultats significatifs, les connaisseurs ne ressentant pas la difficulté comme les débutants. Les professeurs constituent un bon échantillon témoin, leurs qualités pédagogiques leur permettant d'anticiper les difficultés que peuvent rencontrer des débutants. Les résultats sont comparés afin d'estimer les performances de la méthode automatique.
- Ajustements : les paramètres de la méthode de calcul sont ajustés selon les résultats expérimentaux. Des paramètres et contraintes supplémentaires peuvent être ajoutés pour affiner les analyses et coller au mieux à la pratique réelle du savoir-faire.

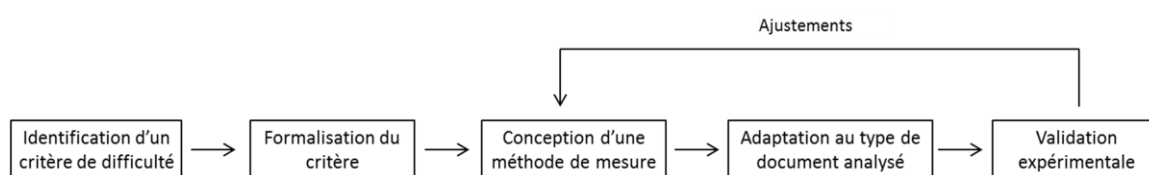


Figure 71 : Méthodologie de modélisation d'un critère de difficulté pour l'analyse automatique de documents.

Ces critères peuvent ensuite être utilisés afin de rechercher les éléments difficiles d'un document. La Figure 72 décrit la méthode employée. L'ensemble des critères est d'abord calculé afin de déterminer le niveau de difficulté global de l'objet. Une grille d'observation est ensuite appliquée afin de réaliser des analyses locales des difficultés. Cette grille peut consister en une fenêtre statique appliquée de façon uniforme sur tout le document de référence (exemple : une mesure d'une partition, une période de 5 secondes sur une vidéo, un carré de 5x5 cm sur une image, etc.), ou bien en l'ensemble des structures significatives précédemment extraites (exemple : introduction, exposition, conclusion, etc.). Chaque sous-objet ainsi isolé est ensuite analysé suivant les critères précédents. Si un critère obtient un score particulièrement élevé, il est reconnu comme étant une cause de difficulté potentielle. Un ensemble d'AS traitant de cette cause sont alors présentés à l'utilisateur.

Cependant, la notion de complexité peut être à double sens, en musique notamment : un objet présente une structure complexe, ou bien il est complexe à interpréter (malgré une structure éventuellement simple). Bien sûr, l'un et l'autre sont liés : un objet présentant des structures complexes sera certainement difficile à interpréter, mais réciproquement, une difficulté d'interprétation ne provient pas nécessairement de la complexité de la structure interprétée. En musique, on pourra citer par exemple la régularité nécessaire à l'exécution d'un ostinato rigoureux : aussi simple soit la formule répétée, le maintien d'un pas régulier sur une longue durée reste difficile à réaliser dans les faits. On propose dans la partie 5.5.4 une réflexion plus poussée sur les critères de difficulté dans l'apprentissage d'une nouvelle pièce de musique, ainsi qu'un prototype déterminant automatiquement le niveau de difficulté d'une partition musicale dans la partie 6.3.

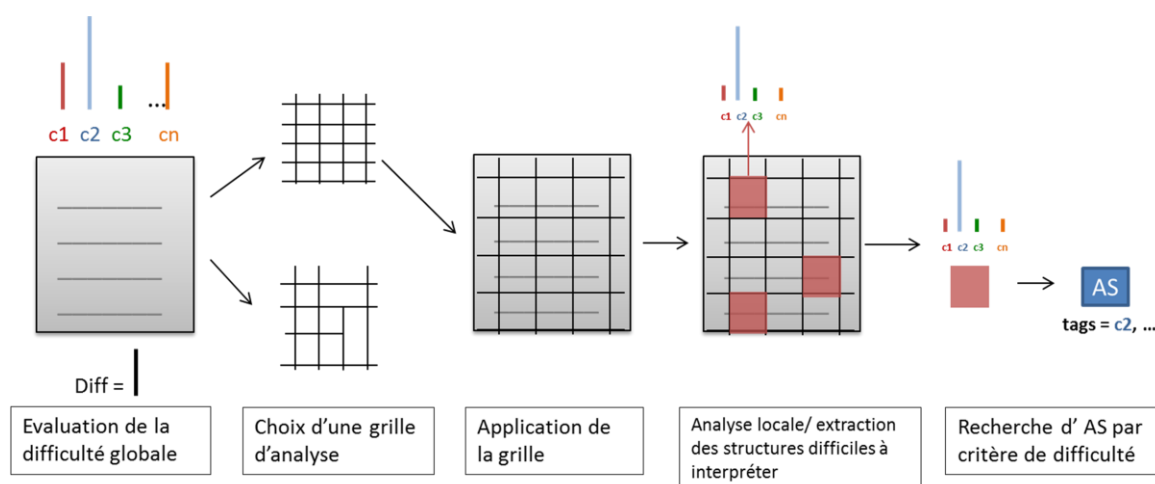


Figure 72 : Recherche de difficultés sur un document de référence.

### Annotation automatique des objets isolés

Une fois les objets intéressants isolés, le processus d'annotation automatique se poursuit par la recherche de cas similaires. Ces cas peuvent être sélectionnés pour deux raisons : ils concernent des objets proches de l'objet étudié, ou leurs AS traitent de problèmes détectés sur cet objet (voir Figure 72). On exploite donc dans cette phase à la fois les propriétés des objets et les descriptions sémantiques des AS qui y sont rattachés.

Si un cas correspondant à l'objet d'étude est trouvé, celui-ci est dupliqué puis adapté au contexte du nouvel objet. Cette adaptation peut se traduire par des transpositions, translations, sélections, redimensionnements des contenus, formes et sens des AS.

Il faut cependant prendre garde au degré de généralisation de l'AS dupliquée. En effet, les contenus enregistrés ont été créés pour un objet particulier, avec certaines spécificités uniques. On réutilisera donc en priorité les AS décrivant des techniques fondamentales du domaine, utilisables sur plusieurs objets possédant des caractéristiques communes. Si des exercices sont donnés, ces derniers peuvent également faire l'objet d'adaptations. Un exemple est donné dans le domaine musical avec la génération automatique d'exercices sur les arpèges au piano (voir partie 5.5.4).

L'annotation dupliquée et adaptée à son nouveau contexte est ensuite mise en forme pour être affichée sur le document avant d'être soumise à la validation de l'utilisateur. En effet, la coexistence d'annotations sémiotiques créées par des humains avec des annotations composées par un agent informatique ne doit aucunement induire l'usager en erreur. Les ressources exploitées doivent être liées à leurs créateurs respectifs et les modifications apportées par le programme doivent être signalées. La représentation de l'annotation doit exprimer clairement si celle-ci a été générée automatiquement ou pas. Ce marquage permet également de signaler aux usagers une annotation à valider : comme toutes les autres annotations sémiotiques, une annotation créée par un AAAS est appelée à être vérifiée par des spécialistes avant d'être intégrée à une leçon. On décrit donc dans ce qui suit un système de validation d'AS reposant sur le calcul d'un taux de crédibilité.

#### **5.4 Validation des annotations sémiotiques**

Dans les domaines artistiques considérés, il n'y a pas de déterminisme permettant d'affirmer avec assurance qu'une interprétation est juste ou non. Cependant, il existe des facteurs augmentant ou diminuant la probabilité qu'une interprétation décrite soit pertinente, intéressante et esthétique.

On introduit donc une pondération de chaque sommet et de chaque arête de chacun des graphes constituant la Base de Signe. Cette pondération correspond à un taux de crédibilité de l'élément ou du lien existant entre deux éléments. Ce taux est calculé en prenant en compte différents paramètres :

- la source de l'information décrite : le sujet est-il connaisseur ? A-t-il de l'expérience dans le domaine ? Est-il plutôt actif ou passif sur la plateforme ?
- le mode de génération de l'information : automatique, semi-automatique ou manuel. Cela revient au point précédent, en considérant qu'un programme informatique peut également être source d'information (à charge de ce dernier d'estimer la crédibilité des résultats qu'il renvoie).
- La perception de cette information par les autres utilisateurs : celle-ci leur a-t-elle été utile ? comment l'évaluent-ils ? Ils convient cependant de prendre des précautions avec les évaluations réalisées par des utilisateurs, celles-ci étant elles-mêmes subjectives.

A cet effet, on propose d'affecter un score global à chaque utilisateur indiquant son degré d'expertise dans le domaine considéré, noté *Exp* et compris entre 0 et 1. On aura par exemple pour les profils suivant :

- un professionnel juste inscrit :  $Exp = 0.8$

- un professionnel inscrit depuis plus de 3 mois avec au minimum 1 participation par semaine (création d'une annotation ou d'un lien) :  $Exp = 1$
- un amateur juste inscrit :
  - o niveau débutant :  $Exp = 0$ ,
  - o niveau intermédiaire :  $Exp = 0.2$ ,
  - o niveau avancé :  $Exp = 0.4$ .

$Exp$  augmente par la suite en fonction de la régularité et de la qualité des échanges de l'utilisateur. Celle-ci peut être évaluée par les autres utilisateurs, notamment ceux reconnus comme experts, par leur profession (du moins celle affichée) et la pertinence de leurs interprétations (permettant donc de corroborer les informations entrées dans leur profil). Ce fonctionnement permet aux professionnels d'opérer des « détectations de talents » en accordant un crédit élevé aux amateurs dont ils trouvent les interprétations intéressantes.

Dans la continuité de ce qui a été présenté dans la partie 4.2.2, on propose donc la formalisation suivante du taux de crédibilité d'une Annotations Sémiotique.

Soit  $a(o, s, t)$  l'Annotation Sémiotique créée par le sujet  $s$  à l'instant  $t$  sur le cas  $o$ .

Pour tout sujet  $s'$  ayant un niveau d'expertise  $Exp(s')$ , on définit un coefficient  $c_{s'} \in [0,1]$  indiquant le crédit qu'accorde  $s'$  à  $a(o, s, t)$ .

On définit alors  $c(a(o, s, t))$  le taux de crédibilité d'une Annotation Sémiotique, calculé comme suit :

$$c(a(o, s, t)) = \frac{Exp(s) + \frac{\sum_{s'}(c_{s'} \times Exp(s'))}{\sum_{s'}(Exp(s'))}}{2}$$

Le taux de crédibilité de l'interprétation portée par l'Annotation Sémiotique dépend ainsi à la fois de l'expérience de son créateur, mais aussi des estimations des autres utilisateurs, pondérées par leurs propres niveaux d'expertise respectifs en la matière. Ainsi, l'intérêt d'une AS créée par un utilisateur de faible niveau pourra être relevé par le fait que d'autres utilisateurs trouvent la remarque ou la question qu'elle porte intéressante.

Comme précisé précédemment,  $Exp$  doit pouvoir évoluer selon l'implication et les progrès de l'utilisateur. On considère alors que passé un certain nombre d'AS de bonne qualité, on peut augmenter  $Exp$ . Cependant, cette augmentation aura pour effet de modifier drastiquement les taux de crédibilité des AS précédemment créées par cet utilisateur. Cette modification peut être voulue (revalorisation des AS créées par un sujet suite à sa progression dans le domaine), ou ignorée en considérant que le calcul d'un taux de crédibilité d'une AS n'utilise que la valeur de  $Exp$  à l'instant  $t$  où a été créée cette AS. Selon le domaine et les choix des administrateurs de la Base de Signes, on fixera les paramètres nécessaires à l'évolution de  $Exp$ . On peut également imaginer que ce dernier diminue suite à un trop grand nombre d'AS jugées non pertinentes par les utilisateurs experts. Il faudra alors disposer d'évaluations issues de sujets distincts de bon niveau afin d'éviter les conflits d'intérêt au sein de la communauté d'utilisateurs.

Ce système de notation peut bien sûr être amélioré selon le cas, en considérant par exemple une évaluation détaillée par critère (exemple : intérêt, niveau technique, niveau expressif, clarté du propos, approche pédagogique, qualité des contenus, qualité de la description du sens, etc.).

Le principe général de validation de la Base de Signe est de ne supprimer que les contenus clairement malveillants. En effet, ceux avec des imprécisions, des fautes ou des distorsions peuvent être exploités d'un point de vue pédagogique, par exemple pour signaler une erreur récurrente. Il appartient alors aux utilisateurs-experts de pointer ces cas d'école et de les exploiter au mieux. Naturellement, ce système instaure des inégalités entre les utilisateurs de la plateforme, mais il en est ainsi dans tout domaine de savoir-faire entre un débutant et un maître. L'important est de pouvoir réduire cette distance au fur et à mesure des progrès de l'apprenant, ce que l'évolution de *Exp* indique à chaque utilisateur.

D'un point de vue ludique (serious gaming), l'augmentation de *Exp* pourrait débloquent de nouvelles fonctionnalités sur la plateforme afin de motiver les apprenants à partager leurs interprétations.

Les liens entre AS et entre cas peuvent également être validés selon cette méthode. Comme précisé dans la partie 4.3.4.3, la notion de similarité dans certains domaines est délicate à définir. Il convient alors d'affecter un taux de crédibilité à un lien de similarité identifié entre deux annotations ou entre deux cas.

### **5.5 Application : création d'une Base de Signes Musicaux**

Cette partie présente les principes généraux de constitution d'une Base de Signes Musicaux à travers un outil d'annotation sémiotique de partitions musicales. Cet outil a été implémenté et testé grâce à l'application @-Muse présentée dans le chapitre suivant (validation expérimentale de l'approche). Dans un premier temps, on définit la Base de Signes Musicaux, ses objectifs et ses différents composants.

#### 5.5.1 Définition et objectifs du MSB

Une Base de Signes Musicaux (Musical Signs Base en anglais, abrégé en MSB) est une Base de Signes dédiée à la gestion de Signes Musicaux (voir définition du Signe Musical partie 4.3). A ce titre, elle collecte des interprétations musicales plutôt que des connaissances ou des données sur la musique. Le mot interprétation a ici un double sens : il s'agit aussi bien d'interprétations au sens d'« exécutions » d'une pièce dans son ensemble (les anglophones emploient le terme « performance ») qu'au sens d'« approches personnelles » explicitées sur des éléments de cette pièce. Les deux sens se complètent : l'un traduit l'expression directe de la pièce, l'autre une explication de cette expression : pourquoi l'artiste joue-t-il comme cela ? Qu'est-ce qui fait qu'on reconnaît son jeu ? Comment procède-t-il ? Le deuxième sens relève plus de la pédagogie car il s'attache à répondre entre autre à des questions techniques sur l'exécution de points précis de la pièce, quand le premier reste au niveau de son expression globale. L'objectif du MSB est donc double : collecter et préserver les interprétations, mais aussi permettre de les comparer entre elles. Ces comparaisons se fondent sur des descriptions semi-structurées des interprétations, réalisées à l'aide de modèles et d'ontologies (voir outils proposés dans la partie 4.3.4). Pour autant, ce sont principalement les gestes et les sons véhiculés par des contenus multimédia qui intéressent les interprètes. Le MSB s'accompagne donc d'outils pour l'annotation sémiotique (saisie des interprétations) et pour la structuration des œuvres (comparaison des interprétations sur un canevas commun).



### 5.5.2 Architecture du MSB

Le MSB se fonde sur une architecture dynamique interconnectant différentes ressources pour constituer une base de savoir-faire musical, tel que décrit dans la partie 5.2. Plus particulièrement, dans le cas de la musique, on a la structure suivante :

Base de Signes Musicaux = (Base de connaissances sur les œuvres + Base de partitions de référence structurables/annotables) + Annotations sémiotiques + Notions instrumentales/musicales.

Les œuvres et les partitions qui s'y rapportent constituent les objets d'étude de la Base de Signes, sur lesquels seront localisées les interprétations sous formes d'annotations sémiotiques. La Figure 73 illustre cette architecture en établissant une comparaison avec les applications de e-Learning instrumental usuelles [58]. Ces dernières ne proposent à l'utilisateur qu'une lecture par pièce (sélection d'une des pièces disponibles, consultation des ressources correspondantes), là où le MSB permet d'effectuer des requêtes aussi bien sur les pièces que sur leurs interprétations ou sur des notions musicales complexes. Le MSB est de plus alimenté par les utilisateurs eux-mêmes au gré des discussions et des collaborations qui se forment par l'annotation des partitions. La partie interface est traitée dans le chapitre suivant (expérimentations).

Le MSB peut s'appuyer sur plusieurs modèles ou composants supplémentaires :

- Des modèles descriptifs de pièces permettant de guider l'utilisateur dans l'étude complète d'une œuvre selon son genre, son époque, son compositeur, etc. L'utilisation de ces modèles s'appuie sur des logiques descriptives, c'est-à-dire des logiques d'observations propres au domaine considéré, ici, la musique (voir partie 4.3.4 sur les logiques descriptives en musique).
- Des modules logiciels spécifiques à certaines fonctionnalités : annotation manuelle ou vidéo, bibliothèques de symboles musicaux, gestion des utilisateurs (profils, statistiques), synchronisation des médias (association d'une vidéo d'interprétation à une partition), traitement et validation des annotations.

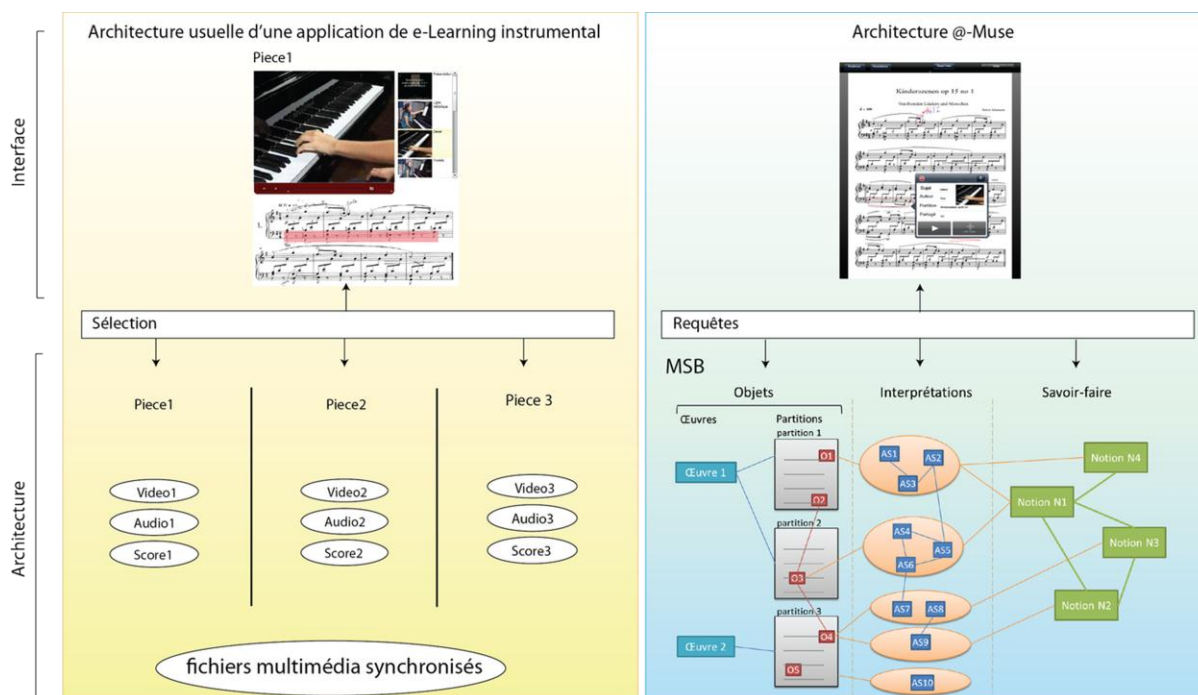


Figure 73 : Comparaison d'architectures d'applications de e-Learning instrumental.

- Des Agents d'Aide à l'Annotation Sémiotique (AAAS) tels que décrits précédemment (partie 5.3.2) pour la génération d'AS, d'exercices, l'analyse de partitions, la recommandation de ressources, l'identification de notions importantes, etc. Cet agent crée de nouvelles connaissances, voire de nouveaux Signes (dont il est le sujet !), en raisonnant à partir des métadonnées et connaissances sur les œuvres, documents de références et AS postées par les usagers de la plateforme d'annotation.

Les différents composants du MSB peuvent éventuellement être distribués ou sous-traités. Par exemple, les métadonnées sur les œuvres peuvent provenir de bases de connaissances existantes telles que MusicBrainz, certaines vidéos ou images de services tiers spécialisés.

### 5.5.3 Modélisation et peuplement d'un MSB

La gestion des Signes proposée peut se construire sur les modèles de gestion des connaissances usuels, en prenant garde à distinguer les connaissances objectives (ou du moins conventionnellement perçues comme telles) des interprétations subjectives. L'ontologie d'Annotation Sémiotique présentée dans la partie 4.2.3 accompagnée des ontologies musicales proposées dans la partie 4.3.4.3 permettent de modéliser les œuvres et leurs interprétations sous forme de triplets RDF (ou autre format interopérable). Elles permettent également de modéliser les relations entre ces objets afin d'établir des comparaisons d'interprétations.

Le MSB s'appuie sur un outil d'annotation sémiotique de partitions pour la saisie et la comparaison d'interprétations de partitions numériques représentant les œuvres étudiées. Ces partitions annotées collaborativement constituent un support central dans la mise en place de plusieurs situations d'apprentissage et de pratique de la musique : cours de musique, concert, répétition, master classe, etc. La partition est choisie comme document de référence car elle constitue une représentation relativement neutre de l'œuvre à étudier, sur laquelle seront attachées des interprétations. La représentation la plus neutre serait naturellement la méta-description de l'œuvre (voir définition partie 4.3.4.1), décrivant les éléments communs à tous les arrangements et transcriptions d'une œuvre. Cependant, cette dernière ne permet pas d'étudier certains aspects techniques propres à un arrangement particulier, figurant par exemple un instrument non présent dans les autres arrangements. Contrairement aux applications de e-Learning instrumental existantes, le MSB permet donc aux usagers de la plateforme de construire et consulter des leçons sur des pièces de façon dynamique, en fonction de ce qu'ils souhaitent travailler et des approches qu'ils souhaitent décrire.

En tant que Base de Signes, la structure du MSB repose principalement sur trois graphes : un graphe d'objets partitions et extraits de partitions, un graphe d'annotations sémiotiques de ces partitions, et un graphe de notions du domaine musicale. Ces graphes se construisent de façon transparente par l'activité des usagers de la plateforme d'annotation comme le préconise la méthodologie donnée dans la partie 5.2. Un AAAS spécialisé dans le domaine musical peut également être conçu afin de faciliter la démarche de peuplement du MSB. On détaille les spécificités d'un tel programme dans la partie suivante.

### 5.5.4 Annotation sémiotique automatique de partitions

Appliqué au domaine musical, l'AAAS présenté dans la partie 5.3.2 doit être en mesure d'analyser des partitions pour en extraire des connaissances intéressantes dans un contexte pédagogique.

L'objectif principal est d'accompagner l'utilisateur décidant de travailler une nouvelle pièce non encore définie sur la plateforme, et donc pour laquelle aucune AS n'a été créée. En effet, dans cette situation, certaines ressources déjà utilisées sur d'autres pièces sont susceptibles d'aider un musicien débutant à aborder la nouvelle pièce.

Dans notre démarche, la nature des connaissances à extraire des partitions dépend des notions abordées lors de leçons de musique. Le modèle descriptif d'analyse d'une pièce décrit dans la partie 4.3.4.2 a en effet été inspiré par le déroulement général de leçons d'introduction sur des pièces pour le piano. Il en ressort une analyse en trois temps principaux : la recherche d'informations sur le contexte de la pièce (style, ambiance, époque, compositeur, couleurs, images), la recherche de structures importantes, puis l'analyse des difficultés tant techniques qu'expressives pour l'élève. De cette analyse va dépendre la recherche de cas appropriés pour l'annotation automatique de la nouvelle partition (voir algorithme d'annotation automatique partie 5.3.2.3).

Cette analyse suppose une partition dans un format structuré restituant l'ensemble des informations sur les notes et autres symboles composant l'œuvre, voire les indications textuelles données par le compositeur. On s'appuie donc ici sur le format MusicXML, décrit en détail dans la partie 2.3.3.2. Ce format permet d'extraire avec précision chacun des symboles présents sur la partition. Si aucun fichier au format MusicXML n'est disponible pour la partition choisie, on pourra recourir à un logiciel d'OMR (Optical Music Recognition).

On ne reviendra pas ici sur les algorithmes existants en matière de recherche de structures et de motifs dans des représentations symboliques de pièces musicales, déjà abordés dans d'autres travaux (voir État de l'art partie 2.3.3). L'intégration de ces travaux à notre analyseur permettrait d'extraire les structures signifiantes de la partition. On propose ici en complément une approche plutôt fondée sur les éléments techniques liés à l'exécution d'une pièce : quels sont les passages sur lesquels un pianiste découvrant une nouvelle œuvre va s'attarder ? Quelles connaissances, ou plutôt Signes appropriés peut-on lui proposer pour accompagner cette découverte ?

### Recherche des grandes parties de l'œuvre





L'identification des grandes parties de l'œuvre étudiée est surtout utile dans le cas de morceaux longs et difficiles, faisant intervenir des changements radicaux d'ambiance et de couleur au sein d'une même pièce. L'identification de telles parties s'opère ici selon une méthode simple. La partition XML est parcourue mesure par mesure. Pour chaque nouvelle mesure, on calcule la probabilité de conclusion ou de commencement d'une partie. Cette probabilité est calculée à partir d'indices donnés par les symboles de la partition : textes de direction, doubles barres, barres de reprise, modulation, changement de tempo (Figure 74). Plus une mesure cumule de telles indications, plus elle est susceptible de finir ou débiter une partie du morceau. Cette intuition peut ensuite être confirmée par une analyse plus élaborée comme la recherche de cadences par exemple. Cependant, selon le style de l'œuvre, la présence d'une cadence

Figure 74 : Recherche des grandes parties d'une œuvre musicale.

à la fin de chaque partie n'est pas toujours avérée (voir premier exemple de la Figure 74, extrait de la *Toccata du Tombeau de Couperin* de Ravel). L'identification de ces grandes parties reste essentielle dans notre contexte. En effet, l'interprétation peut grandement varier d'une partie à l'autre. L'évaluation de la difficulté globale du morceau doit prendre en compte le niveau requis pour jouer chaque partie. Si l'une des parties est de difficulté sensiblement différente des autres (beaucoup plus simple à jouer, ou beaucoup plus complexe), l'évaluation globale du morceau doit être revue : une simple moyenne des difficultés ne correspond pas toujours au ressenti des interprètes lors de l'exécution du morceau.

### Recherche de structures prédéterminées

Tableau 4 : Exemples de structures musicales prédéterminées.

Nom de la structure	Exemple
Gamme	
Arpège	
Trille	
Basse d'Alberti	

La pratique d'exercices techniques peut aider le musicien à consolider ou entretenir son jeu. Ces exercices s'appuient généralement sur des motifs simples à répéter dans différentes configurations, tels que des gammes ou des arpèges joués sur des rythmes et dans des tonalités variées. Des ouvrages entiers sont consacrés à la description et la réalisation de tels exercices (le plus célèbre en piano étant le Hanon [22]). Ces exercices peuvent correspondre à des cas couramment rencontrés dans les œuvres à jouer. Notre idée est donc de

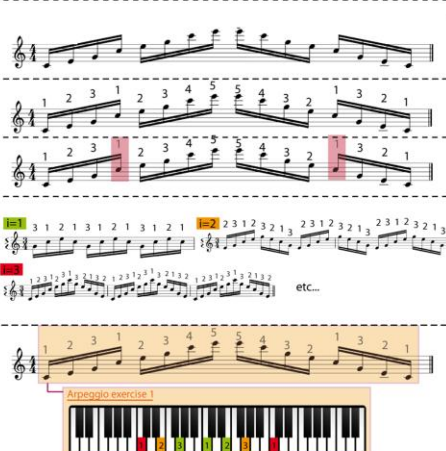
détecter ces structures sur des œuvres, sachant que des exercices éprouvés existent pour les travailler. Le Tableau 4 liste des exemples de telles structures dites « prédéterminées », c'est-à-dire pour lesquelles on sait d'avance les intervalles, les harmonies ou les cellules rythmiques les composant, à la différence des découvertes schématiques opérées par [31]. Pour les gammes par exemple, il est assez facile de lister l'ensemble des contraintes que vérifient respectivement les gammes majeures, mineures harmoniques et mélodiques, chromatiques, par tons, doriennes, myxolydiennes, ascendantes ou descendantes, etc. notamment au niveau des intervalles qui les composent. On pourra ensuite les annoter avec les doigtés les plus courants selon l'instrument et la tonalité considérée, mais aussi en pointant vers des exercices appropriés explicités dans des AS. La détection de tels éléments requiert cependant de déterminer quel est le nombre minimal de notes devant les constituer : est-il intéressant d'annoter une gamme tronquée ? Ce chiffre est essentiel afin de fixer la taille de la fenêtre de lecture de la partition XML. Cette dernière étant parcourue note par note par l'analyseur, la détection de structures prédéterminées requiert de retenir par exemple les cinq derniers intervalles précédents afin de déterminer si l'on est en présence d'une structure particulière. Une fois un début de structure repéré, il reste à déterminer la note sur laquelle elle s'achève en retenant les intervalles suivants jusqu'à ce qu'ils ne correspondent plus aux contraintes de la structure recherchée. La difficulté réside alors dans la tolérance à l'exception de l'analyseur : la régularité d'une structure peut être interrompue momentanément, le temps d'un déplacement ou d'une transposition par exemple.

On peut également construire des exercices techniques à partir des structures réelles identifiées dans les morceaux. On donne un exemple sur la Figure 75, extraite d'une de nos publications [58]. Ici, un arpège a été détecté sur la pièce à jouer. L'AAAS utilise la fonction *arpeggioEx()* afin de générer des exercices progressifs afin d'aider un élève ayant des difficultés sur de tels arpèges. La fonction

commence par doigter la structure repérée. L'exercice se concentre en particulier sur le passage des pouces. Pour chacun d'entre eux, des motifs à répéter sont générés. Ces motifs sont de plus en plus complexes, jusqu'à aboutir à l'arpège complet à jouer.

Functions :

- arpeggioEx(P)
  - arguments : a piece extract P, defined as a notes sequence in MusicXML
  - returns : an annotation A containing a group of exercises represented MusicXML extracts + associated fingerings
- fingering(P)
  - arguments : a piece extract P, defined as a notes sequence in MusicXML
  - returns : an array of figures representing the resulting fingering for P
- thumbPassing(F)
  - arguments : an array of figures F representing a fingering
  - returns : an array of indices which indicates the notes where a «thumb pass» occurs (the pianist' thumb should pass under the previous finger to play the next note)
- backAndForth(P,n)
  - arguments : a piece extract P representing a notes sequence, an integer n
  - returns : a notes sequence NS representing  $n * P$  patterns built on P (if  $P = n_1, n_2, n_3, n_4$  then  $P^{-1} = n_4, n_3, n_2, n_1$ )



```

arpeggioEx(P) {
  var fingering, thumbPassings : array //figures arrays
  var sub_ex : array //notes array
  var annotation : Annotation

  fingering = fingering(P)
  thumbPassings = thumbPassing(fingering)

  foreach(thumbPassings as thumbPassing) {
    for(i=1;i<5;i++){
      sub_ex = backAndForth(P[thumbPassing - i : thumbPassing + i].3)
      annotation.add(sub_ex)
    }
  }

  return annotation
}
            
```




Figure 75 : Génération d'exercices à partir de structures musicales prédéterminées : exemple de l'arpège.

### Explicitation de symboles

Un module pédagogique assez simple à mettre en œuvre dans un analyseur de partition est l'explicitation de symboles musicaux. En prenant en compte le contexte de la pièce, il peut être intéressant par exemple de préciser comment doit être réalisé un trille apparaissant sur la partition. Sur l'exemple de la Figure 76, les informations sur le compositeur et les notes environnant le symbole permettent de déduire comment le jouer en pratique. Une mini partition MusicXML décomposant le trille peut alors être générée et des AS montrant comment réaliser un trille régulier peuvent y être rattachés. Naturellement, ce type d'indication s'adresse essentiellement aux musiciens débutants.


Compositeur =  & Mesure 5 =  => *tr* = 

Figure 76 : Explicitation contextuelle de symboles musicaux.

Le cas particulier des ornements, spécifiques à chaque genre musical et souvent synonymes d'improvisation serait intéressant à traiter dans des travaux complémentaires.

### Recherche des difficultés techniques

L'évaluation du niveau technique requis pour l'interprétation d'une pièce de musique, du débutant au virtuose, est une question délicate car dépendante de multiples facteurs s'influençant mutuellement. Cependant, nous avons tenté d'identifier les principales causes de difficulté dans

l'interprétation d'une pièce instrumentale en se fondant sur notre propre expérience du piano. Ces travaux ont été publiés dans [53]. Une implémentation est proposée dans la partie 6.3.

On distingue sept critères ou groupes de critères qu'on analyse selon la méthodologie donnée dans la partie 5.3.2.3 (Figure 71) :

- **La vélocité des doigts :**

- Identification et occurrences : Vélocité des doigts nécessaire à l'interprétation de la pièce au tempo indiqué par le compositeur. Intuitivement, plus un morceau requiert d'enchaîner les notes rapidement, plus il sera difficile à jouer pour un débutant. Pour un musicien de niveau intermédiaire, un jeu rapide n'est pas nécessairement difficile en soi mais augmente sensiblement les autres difficultés présentes s'il y en a (positions de main peu ergonomiques, enchaînements d'accords, contrepoint complexe, rythmes syncopés, etc.).
- Portée : globale. On peut toutefois détecter des passages particulièrement plus vifs que le reste de la pièce.
- Formalisation : Dépend du tempo et de la valeur de note la plus courte à jouer (e.g. une pièce avec un tempo élevé peut ne contenir que des valeurs longues, et inversement une pièce avec un tempo lent peut contenir des notes de très courte durée s'exécutant rapidement). Cette valeur minimale doit être présente dans la pièce de façon significative (i.e. un trait avec des notes très rapides apparaissant ponctuellement ne sera pas comptabilisé).
- Méthode de mesure : si  $t$  = tempo et  $v$  = valeur de note signifiante la plus petite (représentant au moins 15% du nombre total de notes). On propose de comparer le produit de ces deux valeurs à celui d'une pièce témoin fictive extrêmement rapide. Cela nous permet d'obtenir un taux caractérisant la vélocité requise pour jouer le morceau étudié. Par exemple, si le morceau témoin est à 176 à la noire avec une plus courte valeur égale à la double croche :  $176 * 16 = 2816$ , donc vélocité =  $t * v * 100 / 2816$ .
- Implémentation MusicXML : attribut « tempo » dans le nœud <sound>, nœuds <note> et <type>
- Méthode de validation : on demande à des musiciens de différents niveaux d'évaluer la rapidité ressentie sur un corpus de pièces avec des tempi variés : très lent (vélocité = 0-20%), lent (vélocité = 20-40%), allant (vélocité = 40-60%), rapide (vélocité = 60-80%), très rapide (vélocité = 80-100%). On compare ensuite les résultats du questionnaire avec ceux de l'analyseur. Ces résultats permettent de recalibrer les seuils de difficulté si nécessaire.
- Adaptation à d'autres instruments que le piano : échelonnage des niveaux de difficulté ressentis. Si tous les instruments requièrent des doigts véloces pour jouer des pièces rapides, les niveaux de difficulté ressentis pour un même tempo ne sont pas identiques. Ainsi, jouer un trait rapide à la guitare basse demande certainement plus d'efforts que jouer ce même trait au piano.

- **Les doigtés :**

- Identification et occurrences : choix du doigt à utiliser pour chaque note. Il est généralement indiqué par la présence de chiffres au-dessus des notes. Dans certaines situations, les doigtés applicables sont nécessairement difficiles à réaliser à cause de la configuration des notes à jouer engendrant des positions de main peu ergonomiques. La

rapidité du jeu, les écarts importants entre les notes successives, la présence d'altérations, sont autant de critères accentuant la difficulté d'un doigté.

- Portée : locale.
  - Formalisation : En s'appuyant sur les travaux existants (en particulier [2]) et l'expérience de pianistes, on modélise la difficulté d'un doigté sur un extrait musical en considérant deux types de coûts : le premier concerne chaque position de main adoptée (coût vertical), le second concerne les transitions entre ces différentes positions (coût horizontal). Le résultat retourné par un algorithme de détermination automatique de doigtés étant fondé sur la minimisation de ces deux coûts, il suffit d'extraire dans ces derniers ceux qui restent élevés malgré tout : ils traduiront une difficulté liée au doigté.
  - Méthode de mesure : Des tables de coûts correspondant aux deux types précédemment définis sont réalisées. Les coûts sont ensuite échelonnés afin d'identifier des seuils de difficulté (débutant, intermédiaire, avancé, virtuose). On considère ensuite deux situations possibles :
    - si la partition est déjà entièrement doigtée : on la parcourt avec une fenêtre de six positions de main successives (ou six notes dans le cas de partitions monophoniques), puis on utilise les tables de coûts afin de déterminer la difficulté de chaque extrait.
    - sinon : utiliser un algorithme de détermination du doigté. Les coûts renvoyés supérieurs à un certain seuil indiquent des zones potentiellement difficiles.
  - Implémentation MusicXML : nœuds <fingering>
  - Méthode de validation : Validation de l'algorithme de détermination des doigtés : demander à des musiciens de bon niveau de doigter des partitions, en indiquant les passages dont ils jugent le doigté difficile. Comparer avec les résultats de l'algorithme pour les mêmes partitions. Recalibrer les tables de coût et les seuils de difficulté si nécessaire.
  - Adaptation à d'autres instruments que le piano : le travail d'adaptation est très important, notamment pour la création des tables de coût, celles-ci étant directement déduites de la gestuelle propre à l'instrument considéré.
- **Les déplacements :**
- Identification et occurrences : déplacements à effectuer sur l'instrument. En piano, cela peut se traduire par un déplacement rapide d'une extrémité à l'autre du clavier, avec la même main. Ce type de mouvement requiert de bien préparer le "saut" à réaliser afin d'éviter toute fausse note ou sonorité trop sèche. La guitare présente également ce type de difficulté lors de déplacements rapides à effectuer sur le manche avec la main gauche. Naturellement, l'écart entre les deux positions de main à adopter, les notes à jouer (notes simples ou accords) et le temps disponible pour réaliser le déplacement influent directement sur la difficulté d'exécution de ce dernier.
  - Portée : locale.
  - Formalisation : on repère les écarts importants entre chaque position et on estime le temps disponibles pour les réaliser. Plus l'écart est important avec un temps disponible court, et plus il sera difficile à réaliser.
  - Méthode de mesure : on parcourt la partition note par note. Pour chaque nouvelle note, on calcule l'écart entre cette dernière et la note précédente n'appartenant pas au même accord (on considère bien deux notes n'étant pas attaquées en même temps). Cet écart

est exprimé en demi-tons. Si cet écart dépasse un seuil donné, on examine le temps imposé pour le réaliser. Si celui-ci est court, on est en présence d'un déplacement difficile. Cette méthode de mesure repose donc sur deux paramètres : le seuil caractérisant un écart important (dans notre cas, on le fixe à 12 demi-tons pour le piano), et la durée au-delà de laquelle un déplacement, même important peut être réalisé facilement, parce que le musicien "a le temps" (exemples : tempo lent, note longue, silences, etc.). Dans l'absolu, cette durée doit être estimée en millisecondes ou en secondes, afin de correspondre au temps de l'interprétation, et doit varier en fonction de l'écart à réaliser : plus ce dernier est important, et plus la durée doit l'être également afin d'assurer un jeu confortable.

- Implémentation MusicXML : nœuds <note>, <chord>, <pitch> et <duration>.
- Méthode de validation : on peut procéder comme pour les critères précédents, c'est-à-dire en questionnant des musiciens sur un corpus de pièces prédéfinies. On compare les déplacements jugés difficiles par les musiciens à ceux jugés difficiles par l'analyseur.
- Adaptation à d'autres instruments que le piano : les paramètres de mesure doivent être adaptés à l'instrument.

- **La polyphonie :**

- Identification et occurrences : on considère la complexité polyphonique de la pièce : elle est généralement proportionnelle au nombre de voix à suivre. On entend ici par voix une ligne mélodique à part entière (e.g. un chant ou contrechant). Un accompagnement ne sera donc pas considéré comme une voix. En piano, la répartition des voix entre la main gauche et la main droite a aussi son importance. Plus une main cumule de voix à jouer, plus il est difficile pour le musicien de faire ressortir une des voix comme une ligne mélodique suivie. Des arrangements de doigtés peuvent être requis (exemple : prise d'une note à la main gauche pour "libérer" la main droite).
- Portée : globale et locale (des voix peuvent apparaître dans certains passages puis disparaître).
- Formalisation : on propose une formalisation simple : plus le nombre de voix est élevé, et plus le niveau de difficulté est important pour ce critère. Des affinements peuvent être apportés selon l'instrument considéré. Ainsi, en piano, le passage de deux à trois voix implique une augmentation importante de la difficulté puisqu'une des mains doit maintenant jouer deux voix en même temps, requérant une plus grande indépendance des doigts.
- Méthode de mesure : plusieurs cas peuvent se présenter :
  - les voix sont explicitement signalées dans le document représentant la partition : il suffit de les compter. En piano, on peut établir assez intuitivement les correspondances suivantes : 1 voix = facile, 2 voix = facile/intermédiaire, 3 voix = intermédiaire/avancé, plus de 3 voix = avancé/virtuose.
  - les voix ne sont pas explicitement signalées : un travail d'analyse supplémentaire est nécessaire afin de détecter si l'on est en présence de polyphonie (même ponctuelle, sur un passage de la pièce), et si c'est le cas, combien de voix sont à l'œuvre. Avant d'entamer des analyses complexes, de simples considérations sur le genre et la forme de l'œuvre peuvent fournir des informations intéressantes (par exemple une Fugue sera nécessairement



polyphonique). La recherche et la séparation des voix restent plus délicates sur un fichier audio, ou même sur un fichier MIDI dont toutes les voix ont été saisies sur une seule piste.

- Implémentation MusicXML : nœuds <voice> et nœuds <staff>. Il convient cependant de prendre garde aux indications de voix erronées dans certaines partitions MusicXML.
- Méthode de validation : on procède par un questionnaire, comme précédemment.
- Adaptation à d'autres instruments que le piano : naturellement, ce critère ne s'applique qu'aux instruments polyphoniques. Cependant, la polyphonie en guitare ne s'envisage pas du tout de la même façon qu'en piano par exemple.
- **Les tonalités et harmonies :**
  - Identification et occurrences : on regroupe sous cet intitulé différentes difficultés liées entre elles :
    - les tonalités difficiles à jouer, pour leur nombre d'altérations à la clé.
    - les altérations accidentelles : plus elles sont nombreuses, et plus on pourra supposer que le morceau est difficile à déchiffrer, mais également complexe du point de vue harmonique. La question des altérations peut sembler triviale pour un musicien avancé, mais reste importante pour un débutant peu à l'aise avec le déchiffrement et les enchaînements harmoniques atypiques.
    - la présence de nombreux accords, octaves ou plus généralement d'agrégats : typiquement des déplacements d'octaves ou d'accords plus élaborés.
  - Portée : globale (tonalités, proportion d'accords) et locale (altérations accidentelles, schémas harmoniques, suites d'accords).
  - Formalisation :
    - tonalités : on associe un niveau de difficulté à chaque tonalité. Intuitivement, plus une tonalité possède d'altérations, plus elle est difficile à déchiffrer. Les modulations sont également prises en compte (e.g. si une tonalité est utilisée sur une courte partie du morceau, elle aura peu d'influence sur l'estimation globale de ce critère).
    - altérations accidentelles : global : on calcule le ratio de notes altérées accidentellement par rapport au nombre total de notes. local : on met en évidence les passages contenant un nombre d'altérations accidentelles dépassant un seuil fixé (elles sont considérées comme des "marqueurs" d'un changement harmonique important).
    - accords : global : on calcule le ratio d'accords sur le nombre total de positions de main successives à adopter. local : on met en évidence les passages présentant des suites d'accords (seuil minimal à fixer : exemple : trois accords de suite à une seule main en piano). Plus la suite est longue, avec des accords fournis (minimum de trois notes par accord), plus le passage est difficile pour ce critère.
  - Méthode de mesure :
    - tonalités : on échelonne les niveaux de difficulté selon le nombre d'altérations à la clé. Si la tonalité n'est pas indiquée sur le document, on peut la déduire à partir de la tonique et des altérations les plus rencontrées dans le morceau. Si plusieurs tonalités sont utilisées dans le morceau, on

effectue une moyenne des niveaux respectifs de ces dernières, que l'on pondère selon les durées respectives des passages concernés.

- altérations accidentelles : global : on calcule le ratio comme indiqué précédemment. On fait correspondre chaque résultat à un niveau de difficulté en utilisant des domaines de valeurs. local : lors du parcours de la partition, on relève chaque note altérée. On retient la note altérée pendant un certain nombre de temps (à fixer ou calculer en fonction de la structuration de la pièce) afin d'identifier la portée de cette dernière (exemple : altération valable pour une mesure, ou toute une partie : on peut dans certains cas inférer une modulation). Plus un passage cumule d'altérations accidentelles, plus son niveau de difficulté est important pour ce critère. Un outil dédié à l'analyse harmonique peut être utilisé afin de faciliter l'identification des passages difficiles pour ce critère.
  - accords : global : on calcule le ratio indiqué précédemment et on échelonne les résultats. local : on identifie les suites d'accords successifs lors du parcours de la partition note par note. A chaque nouvel accord non précédé d'un autre accord, on crée un tableau capable de retenir les données d'une telle structure musicale : date de début, date de fin, niveau de difficulté. Si le premier accord n'est pas suivi d'au moins deux autres accords, le tableau est détruit.
- Implémentation MusicXML : nœuds <key>, <accidental> et <chord>
  - Méthode de validation : on construit un questionnaire fondé sur un corpus de pièces où il s'agit de détecter les passages harmoniquement complexes. Pour les accords, on fournit différentes suites d'accords à juger : on calibre ainsi le nombre minimal d'accords successifs impliquant une difficulté, ainsi que les conditions de cette difficulté (nombres de notes dans les accords, intervalles, rapidité, etc.).
  - Adaptation à d'autres instruments que le piano : sur certains instruments, un changement de tonalité ne se traduit que par une translation exacte des mains. La modulation reste donc simple comparativement au piano, où cette dernière modifie généralement les doigtés. La réalisation d'accords complique certainement le jeu, mais pas de la même manière qu'au piano. Ce paramètre reste donc à étudier.
- **Le rythme :**
- Identification et occurrences : des rythmes ou des mesures irrégulières peuvent être difficiles à jouer pour un débutant. On cite par exemple les valeurs décalées en piano (une main jouant un rythme ternaire, l'autre binaire), les mesures irrégulières dans la musique folklorique (7/8, 11/8, etc.) et les contretemps (note attaquée sur un temps faible suivie d'un silence sur le temps fort suivant).
  - Portée : globale (mesures) et locale (changements de mesure, valeurs décalées et contretemps)
  - Formalisation :
    - valeurs décalées : chaque groupe de notes présentant des valeurs décalées élève le niveau de difficulté rythmique de la partie considérée. Plus les valeurs sont courtes et nombreuses dans le groupe de notes, plus ce dernier est considéré comme difficile (e.g. un 5 pour 4 est plus difficile à jouer qu'un 3 pour 2).

- mesures irrégulières : global : si la mesure est irrégulière, le niveau de difficulté global de la pièce est augmenté. Si des changements de mesures ont lieu pendant le morceau, on procède comme pour les changements de tonalité, c'est-à-dire en effectuant des moyennes pondérées. local : chaque changement de mesure rapide (pas de ralentissement, de silence, etc.) augmente le niveau de difficulté local autour de la nouvelle mesure.
- contretemps et syncopes : on recherche les notes attaquées sur des temps faibles, puis soit prolongées, soit suivies d'un silence sur le temps fort suivant.
- Méthode de mesure :
  - valeurs décalées : on recherche les rythmes ternaires pour les mesures binaires, et vice-versa pour les mesures ternaires. Selon les formats de partition considérés, ces rythmes peuvent être explicitement indiqués ou pas (exemple : nœud <time-modification> en MusicXML). S'ils le sont, pour chaque occurrence d'un tel rythme, on regarde son accompagnement (toutes les autres notes jouées en même temps) : si ces notes n'ont pas la même division rythmique, le passage contient bien des valeurs décalées. Naturellement, les silences et prolongations de notes en accompagnement ne sont pas comptabilisés. Le niveau de difficulté d'exécution du groupe de notes peut ensuite être calculé en fonction de la proportion de notes décalées et/ou de notes sur les divisions (e.g. 3 pour 2 = facile, 3 pour 8 = difficile, 5 pour 6 = difficile, etc.). Cette analyse peut être globalisée en calculant ensuite le ratio de mesures comportant des valeurs décalées par rapport au nombre total de mesures.
  - mesures irrégulières : on procède comme précédemment indiqué. L'analyse locale requiert d'échelonner la difficulté des différents types de transitions possibles lors d'un changement de mesure. Par exemple, un passage de 4/4 à 2/4 se négocie plus facilement qu'un passage rapide de 4/4 à 5/8.
  - contretemps : on associe une succession de temps forts, temps intermédiaires et temps faibles à chaque mesure (exemple : 2/4 = 1 temps faible + 1 temps fort, 4/4 = 1 temps fort + 1 temps faible + 1 temps intermédiaire + 1 temps faible). Lors du parcours de la partition, chaque temps fort ou intermédiaire sur lequel aucune note n'est attaquée est marqué comme étant potentiellement un contretemps. Pour confirmer cette intuition, on regarde si le temps faible précédent est joué ou non. S'il l'est, on est bien en présence d'un contretemps.
- Implémentation MusicXML : nœuds <time-modification>, <measure> et <duration>.
- Méthode de validation : comme précédemment, on questionne des musiciens sur des cas réels (changements de mesure, valeurs décalées, contretemps, etc.) afin d'échelonner les niveaux de difficultés de chaque critère.
- Adaptation à d'autres instruments que le piano : les valeurs décalées n'ont bien sûr lieu d'être que sur des instruments polyphoniques. Maintenant, on pourrait s'intéresser aux difficultés liées au jeu en groupe : un musicien jouant des valeurs décalées par rapport à la pulsation peut-il troubler le jeu des autres musiciens ? La négociation de changements

de mesures ou de contretemps reste généralement également difficile pour d'autres instruments.

- **L'endurance :**

- Identification et occurrences : longueur de la pièce. Ce critère ne doit pas être sous-estimé : les pièces difficiles sont souvent bien plus longues que les pièces simples. Il s'agit donc d'un indicateur simple à déterminer et pourtant très significatif.
- Portée : globale.
- Formalisation : plusieurs formalisations sont possibles :
  - compter le nombre de pages (mais dépend de la mise en page de la partition),
  - compter le nombre de mesures. A mettre éventuellement en rapport avec le nombre moyen de notes par mesure, afin de normer les résultats.
- Méthode de mesure : Intuitivement, on établit la correspondance suivante : moins de 3 pages = facile, entre 3 et 5 pages = intermédiaire, plus de 5 pages = avancé.
- Implémentation MusicXML : Attributs new-page ou nœuds <measure>
- Méthode de validation : par questionnaire, en demandant l'endurance nécessaire pour jouer un corpus de pièces.
- Adaptation à d'autres instruments que le piano : peu d'adaptation requise.

Certains des critères cités peuvent être différenciés suivant qu'ils apparaissent à la main gauche ou à la main droite. En effet, chez la plupart des pianistes, la main gauche n'a pas les mêmes performances que la droite, puisque que ces deux mains ont généralement des rôles bien distincts. Par exemple, la main gauche étant souvent dévolue à l'accompagnement de la mélodie, elle peut être plus agile que la main droite lors de l'exécution de déplacements importants. La main droite est généralement plus véloce sur les groupes de notes rapides (souvent constaté lorsque l'on joue les mêmes notes aux deux mains). Il convient alors d'établir une mesure globale du critère résumant bien les difficultés rencontrées à chaque main. Dans nos mesures, on propose de prendre en compte ces distinctions de la façon suivante :

- Soit diff un critère de difficulté pouvant prendre les valeurs {1,2,3,4}. On note diff(MG) la difficulté de ce critère à la main gauche et diff(MD) à la main droite.
- Si  $\text{diff}(\text{MD}) = \text{diff}(\text{MG}) = 2$ , alors  $\text{diff} = 3$ ,
- Si  $\text{diff}(\text{MD}) = \text{diff}(\text{MG}) = 3$ , alors  $\text{diff} = 4$ ,
- Sinon  $\text{diff} = \text{Max}(\text{diff}(\text{MD}), \text{diff}(\text{MG}))$ .

Ce mode de calcul permet de considérer l'additivité de la difficulté des mains jouées ensemble: si chaque main est difficile à jouer séparément, alors, la difficulté résultante du jeu « mains ensembles » est d'autant plus importante qu'il faut cette fois ci les synchroniser.

Les différents critères cités ont deux objectifs principaux : estimer le niveau global requis pour jouer une pièce (ce que l'on nomme « portée globale »), et trouver les passages difficiles en explicitant ce qui les rend difficiles (« portée locale »). La plupart des critères locaux peuvent être globalisés par des moyennes. On obtient donc une estimation assez fiable du niveau général requis pour jouer une pièce (voir expérimentations partie 6.3). Cependant, l'analyse de la partition requiert un format traduisant fidèlement tous les éléments et symboles que l'on retrouve sur une partition. On s'appuie donc dans notre cas sur le format MusicXML. De plus en plus de logiciels d'édition de partitions

proposent d'exporter en MusicXML, il faut toutefois prendre garde à la validité et à la conformité du document produit (structuration, utilisation des balises et attributs appropriés, description de la polyphonie, etc.). De plus, les estimations réalisées grâce à ces critères ne correspondent qu'à la difficulté technique d'une œuvre. Dans bien des cas, une œuvre techniquement facile à jouer requiert une certaine maturité musicale de la part de l'interprète, au risque de trahir l'esprit de l'œuvre. Certains aspects expressifs sont abordés dans la partie suivante.

Une fois les passages techniquement difficiles découverts, les critères permettent de connaître la nature des problèmes pouvant être rencontrés. En suivant la méthodologie présentée dans la partie 5.3.2.3 (Figure 72), on peut interroger le MSB afin de trouver des AS traitant de ces difficultés. Se pose alors la question de l'application de ces AS au contexte de la nouvelle pièce. Pour ce faire, on privilégiera les AS traitant d'exercices techniques utilisables dans différentes situations. Un profilage précis de l'interprète permettrait de plus d'adapter l'analyse technique de la pièce aux besoins, difficultés et facilités de ce dernier. Par exemple, pour un musicien n'ayant aucune difficulté à lire rapidement des accords, le critère « jouer des suites d'accords » aurait une pondération plus faible que la normale. De façon similaire, si ce musicien rencontre des difficultés sur un des critères, on peut lui recommander une pièce dans laquelle ce critère revêt une importance particulière. Ce faisant, la recommandation de pièces s'adapte aux besoins et aux goûts du musicien. Cet aspect de personnalisation pose le problème du profilage des usagers : pour un instrument donné, une base d'exercices progressifs pourrait être mise en place afin d'évaluer le niveau de chaque usager sur chaque critère identifié pour cet instrument de façon uniforme. L'application pourrait être présentée sous la forme d'un jeu avec de courts exercices à réaliser. Les productions enregistrées par l'utilisateur seraient ensuite analysées afin de déterminer ses points forts et ses faiblesses.

### **Recherche des difficultés expressives**

Les difficultés liées à l'expression d'une œuvre sont plus délicates à estimer, à fortiori de façon automatique. En effet, toute œuvre musicale installe une atmosphère, voire transmet un message, que son interprète doit communiquer à ses auditeurs. Dans les niveaux les plus avancés, les cours d'instrument consacrent donc une large partie du temps au travail « expressifs » : obtenir un son approprié à l'esprit de l'œuvre, mais qui reste naturel pour l'interprète avec sa sensibilité et ses inflexions. On y apprend donc à « suivre une voix ou un thème », « gérer la pédale de résonance » (au piano), « jouer un rubato », « doser les nuances », « gérer les respirations », « imiter un autre instrument, une chanteuse, une danseuse ». Naturellement, ces critères requièrent tout de même une certaine aisance technique.

Dans le contexte de nos travaux, nous ne proposons pas de critère « expressifs » à proprement parler. Cependant, l'analyse de symboles définie précédemment pourra être une première approche dans une analyse expressive automatique d'une pièce. Par exemple, les mots de direction placés par le compositeur pourront être portés à l'attention du musicien, ainsi que les symboles de nuance et de pédale.

La difficulté expressive pourra également être soulignée au niveau plus général des notions. Cette démarche permettra de proposer un parcours de découverte d'un paramètre expressif en musique. Par exemple, la notion « le rubato dans la musique romantique » pourra être illustrée concrètement sur des pièces annotées.

---

Là encore, le profilage des usagers de la plateforme du MSB pourra être exploité afin de mesurer si un musicien a le recul nécessaire pour interpréter une œuvre complexe du point de vue expressif.

#### 5.5.5 Validation des Annotations Sémiotiques Musicales

La méthode de validation des AS proposée dans la partie 5.4 peut bien sûr s'appliquer au domaine de la musique. Cette validation a un rôle important dans la recommandation de contenus de qualité à un apprenant. Cependant, des exceptions pourront être faites sur les contributions réalisées par des professionnels reconnus (dans le cadre de Master Classes par exemple), pouvant se passer d'une quelconque évaluation. Le processus de validation intégrera également une vérification de l'illustration du sens décrit dans l'AS : un geste, une sonorité à rechercher requerra très certainement une démonstration filmée.

### **5.6 Synthèse**

Après avoir décrit notre approche sémiotique de la transmission de savoir-faire, ce cinquième chapitre a permis de définir ce qu'est une Base de Signes et de proposer une méthodologie de construction et de peuplement d'une telle Base.

Une modélisation fondée sur des graphes orientés a été proposée, afin de bien distinguer les objets étudiés, leurs interprétations sous forme d'Annotations Sémiotiques, les notions pédagogiques traitées par ces interprétations, et les relations que tous ces éléments entretiennent. Une méthodologie de constitution dynamique de ces graphes a été proposée, reposant sur les processus manuels et automatique à l'œuvre sur une plateforme d'annotation sémiotique.

Afin d'assister les usagers dans cette démarche de peuplement d'une Base de Signes, un Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique a été décrit. Cet agent exploite les modèles et logiques descriptives du domaine considéré afin de faire des suggestions aux usagers de la plateforme, selon leurs centres d'intérêt ou leur contexte d'étude. Cet Agent peut également analyser un nouvel objet à étudier en se fondant sur les cas déjà décrits dans la Base de Signes. Deux approches peuvent alors être considérées : la première exploite les similarités pouvant exister entre les objets de la base, la deuxième se fonde sur les logiques descriptives en œuvre dans le domaine (recherche de passages difficiles, de structures particulières, etc.). Les points remarquables de l'objet sont ainsi mis en évidence et relié à des Annotations Sémiotiques pouvant les illustrer.

Par la suite, une méthode de validation des Annotations Sémiotiques est proposée. Celle-ci repose sur un indice de crédibilité affecté à chaque annotation. Cet indice est une moyenne des notes données par chaque usager à l'annotation. Ces notes peuvent correspondre à des critères d'évaluation distinct (qualité pédagogique, esthétique d'une ressource, pertinence, utilité d'une question). La moyenne obtenue peut être pondérée selon le niveau estimé de chaque usager-évaluateur dans le domaine considéré. Naturellement, le niveau d'expertise du créateur de l'annotation dans le domaine considéré reste le premier indicateur de la qualité de ses productions. Ce niveau doit donc être estimé suivant un processus de profilage à déterminer.

Enfin, un exemple de Base de Signes Musicaux est décrit. Cette Base repose sur deux composants essentiels : une base de partitions musicales, et une base d'annotations sémiotiques de ces partitions. Elle peut être reliée à une base de connaissances sur les œuvres musicales et une base de notions pédagogiques structurées. Cette base est peuplée selon les besoins des usagers musiciens.

Une plateforme d'annotation sémiotique de partitions leurs permet de travailler collaborativement sur une œuvre et ainsi échanger leurs savoir-faire. Un agent d'aide à l'annotation sémiotique de partitions les assiste dans cette démarche, dès l'enregistrement d'une nouvelle pièce sur la plateforme. Cet agent s'appuie sur les outils définis pour le domaine musical dans le chapitre précédent. Il analyse également les partitions afin d'en extraire des connaissances potentiellement intéressantes pour un apprenant : formes et structures musicales, analyse de symboles musicaux, recherche des difficultés, de solutions adaptées, etc. Les annotations générées sont ensuite validées selon le même processus que celles produites par les usagers.

Des prototypes ont été développés afin d'expérimenter et valider l'approche sémiotique proposée. Le chapitre suivant présente ces expérimentations et leurs résultats.

---

## 6 Validation expérimentale de l'approche sémiotique

Dans ce chapitre, on présente deux prototypes expérimentaux développés durant la thèse. Ces prototypes ont été conçus pour l'apprentissage de la musique, et en particulier du piano. Cependant, ils peuvent être adaptés à d'autres instruments, voire à d'autres domaines de savoir-faire. Leur objectif est de démontrer la pertinence de notre approche sémiotique dans un contexte de partage de savoir-faire pratiques par les TIC.

Cependant, de la même façon que la création d'une Base de Connaissances fonctionnelle requiert un projet de recherche conséquent, la création d'une véritable Base de Signes Musicaux, alimentée et exploitée au maximum de ses possibilités, était difficilement envisageable étant donné les contraintes inhérentes à la thèse. Certaines barrières technologiques devaient de plus être surmontées avant de pouvoir proposer des outils aboutis pour l'annotation sémiotique de partitions musicales. Les prototypes développés constituent donc une première approche pour la création et le partage d'annotations sémiotiques. Ils sont appelés à être repris et intégrés à des produits finis, comme par exemple la plateforme de partage de partitions musescore.com.

Nous présentons ici deux prototypes. Le premier, nommé @-MUSE (@notation platform for MUSical Education), se présente sous la forme d'une application mobile pour tablette tactile. Cette application permet à plusieurs utilisateurs d'annoter une même partition avec des contenus multimédia (dessins, symboles, vidéos) explicites. Ces contenus peuvent être saisis et expliqués directement depuis l'application. Le deuxième prototype, nommé ScoreAnalyser, est une application Web analysant toute partition pour piano au format MusicXML. Cette analyse a pour objectif d'estimer le niveau de difficulté global d'une pièce.

Chaque outil a fait l'objet de plusieurs cycles de développement selon les retours des utilisateurs et l'avancement des travaux de recherche. Nous présentons ici les versions les plus abouties. Cependant, ces versions doivent encore être améliorées afin de se conformer à l'ensemble des modèles que nous avons proposés et ainsi proposer des fonctionnalités de partage de Signes avancées. Une part importante de la conception de l'outil est consacrée aux interactions avec l'utilisateur, ce dernier étant le dépositaire du savoir-faire à capturer et partager, sans être nécessairement familiarisé avec l'usage des nouvelles technologies.

### ***6.1 Présentation du contexte de validation***

Notre approche consiste à capturer le savoir-faire vivant sous la forme de Signes Interprétatifs. Ces Signes traduisent des interprétations d'objets par des sujets. Notre champ d'application étant la musique, nous décrivons dans ce qui suit deux prototypes destinés à capturer des Signes Musicaux. La question est alors de déterminer comment évaluer cette approche sémiotique par rapport aux approches usuelles sur la problématique posée au début de ce mémoire, c'est-à-dire le partage de savoir-faire musicaux à l'aide des TIC (partie 1.2). En effet, il existe peu d'outils consacrés au partage et à l'analyse d'interprétations, du moins au niveau de qualité pédagogique recherché. Une analyse comparative, fondée par exemple sur les outils présentés dans l'État de l'art (chapitre 3), peut donc être réalisée, mais ne présentera un intérêt que sur certaines fonctionnalités précises attendant au partage de commentaires plus qu'à la modélisation, la capture et la comparaison d'interprétations de haut niveau. La forme d'évaluation nous paraissant la plus pertinente dans notre cas est donc directement de mettre un outil d'annotation sémiotique entre les mains de divers musiciens



intéressés par la question et de leur demander d'évaluer l'approche proposée dans son ensemble. Il faut cependant prendre garde aux critères qui seront jugés : est-ce l'outil en lui-même, son interface, ses modes d'interaction avec l'utilisateur, les interactions entre utilisateurs, la qualité des média saisis, la facilité à saisir des annotations, à les éditer, l'adaptation au domaine étudié ?

Notre démarche expérimentale vise donc à évaluer l'adaptation de l'approche sémiotique aux usages de musiciens via l'appropriation d'un prototype de plateforme d'annotation sémiotique de partitions. Cette appropriation suppose une compréhension précise des activités et objectifs des musiciens (voir partie 2.2.4). Le fait de pratiquer un instrument depuis plus de dix ans, mais aussi d'en débiter d'autres, nous a donc été d'une grande aide dans la conception d'outils destinés à des musiciens de tout niveau.

### **6.2 Plateforme d'annotation sémiotique de partitions @-MUSE**

#### 6.2.1 Objectifs

L'objectif de ce premier prototype est de concevoir et tester une plateforme d'annotation sémiotique dédiée à la pratique musicale. Une telle plateforme constitue le support principal de création des Signes Musicaux. Le peuplement d'une Base de Signes Musicaux dépend donc entièrement de cet outil. Dans ce contexte, les fonctionnalités minimales que doit supporter une telle plateforme sont les suivantes :

- Gérer les objets à interpréter : il s'agit ici de partitions musicales, afin de reproduire la pratique usuelle où le musicien travaille avec une partition annotée. Ce support permet de plus de disposer d'une restitution spatiale de l'information, sur laquelle on peut visualiser l'ensemble des annotations d'un seul coup d'œil (voir partie 4.2.1).
- Interpréter ces objets ou des parties de ces objets à l'aide d'annotations sémiotiques : forme, contenu et sens doivent pouvoir être inclus dans l'annotation. Afin de capturer les gestes et sonorités à expliquer, l'utilisation d'une caméra, ou à défaut l'intégration d'une vidéo existante, doit être possible. Des bibliothèques de symboles ou des fonctionnalités de dessin permettent de reproduire les conditions réelles d'annotation d'une partition.
- Comparer et échanger ces interprétations : l'application doit être collaborative afin que plusieurs utilisateurs puissent travailler sur la même partition et exposer leurs points de vue.
- S'adapter aux pratiques en cours dans le domaine : la musique se pratique dans des situations très diverses : en groupe dans une salle de cours, seul au domicile, dans un bar, etc. La captation doit s'effectuer simplement malgré des conditions variables : faible luminosité, mauvais positionnement de l'appareil, et donc mauvais cadrage, bruits parasites, absence de connexion internet. Ces considérations imposent de nombreuses contraintes sur l'application à développer.

#### 6.2.2 Conception et implémentation

Au vu des objectifs et contraintes énoncées précédemment, nous avons choisi de concevoir @-MUSE comme une application pour tablettes tactiles. Ce choix permet de répondre aux exigences de mobilité sans pour autant compromettre les autres fonctionnalités requises (connectivité et capture multimédia). Il s'inscrit également dans la continuité des développements effectués par notre équipe de recherche en matière de e-Learning instrumental (voir Figure 20). L'application a fait l'objet de

plusieurs maquettes de test avant d'aboutir au prototype actuel que nous présentons dans ce mémoire.

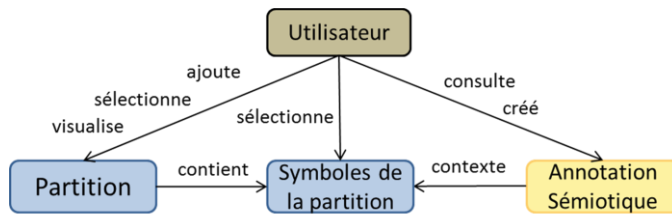


Figure 77 : Diagramme d'actions du prototype @-MUSE.

@-MUSE gère trois entités principales : les utilisateurs, les partitions et les annotations sémiotiques. La Figure 77 indique les actions que peuvent réaliser les utilisateurs avec l'application. Un utilisateur peut ajouter, sélectionner puis visualiser une partition. Il peut ensuite consulter les annotations existantes ou

en créer de nouvelles. Pour ce faire, il peut sélectionner le contexte de chaque nouvelle annotation. S'il ne le fait pas, la nouvelle annotation se rapportera à l'ensemble de la partition. L'application présente donc deux modes d'utilisation :

- Mode « **consultation** » des annotations : ce mode permet d'afficher les annotations choisies et de consulter leurs contenus respectifs à l'aide d'un menu contextuel. C'est le mode par défaut lorsque l'utilisateur sélectionne une partition.
- Mode « **saisie** » d'une annotation : ce mode permet de créer une nouvelle annotation sémiotique. Il se compose de deux phases : la sélection du contexte de l'annotation puis la création de la nouvelle annotation. L'utilisateur peut alors réaliser des captations audiovisuelles et décrire en détail le contenu et le sens de l'annotation.

La Figure 78 décrit les types de formes, contenus et sens que pourra gérer @-MUSE dans sa version définitive. La version actuelle ne gère pas encore les mots-clés et annotations similaires. Ici, le composant forme du Signe joue principalement le rôle d'indicateur de la présence d'une annotation sur la partition. En effet, l'ensemble des contenus ne peut apparaître directement sur la partition sans gêner sa lisibilité. Cette indication peut se faire de deux manières : un cadre de sélection coloré, ou bien un tracé quelconque (manuscrit ou issu d'une bibliothèque de symboles prédéfinis). Dans les deux cas, un clic sur l'indication fait apparaître un menu permettant de consulter le détail de l'annotation (contenu et sens). Le contenu est constitué de tous les documents audiovisuels que le créateur de l'annotation a rattachés à celle-ci. Le composant sens comprend le titre de l'annotation, une courte description, une liste de mots-clés et un ensemble d'annotations traitant de sujets similaires.

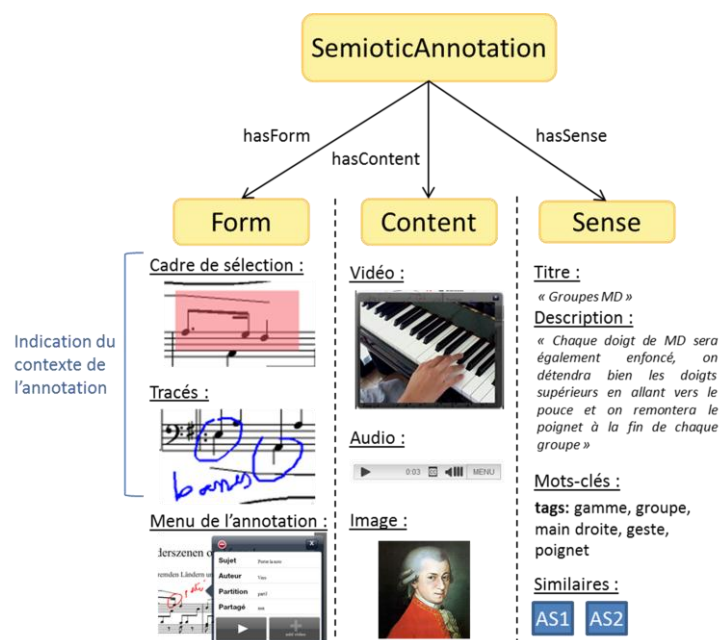


Figure 78 : Composants d'une annotation sémiotique dans @-MUSE.

Le contenu est constitué de tous les documents audiovisuels que le créateur de l'annotation a rattachés à celle-ci. Le composant sens comprend le titre de l'annotation, une courte description, une liste de mots-clés et un ensemble d'annotations traitant de sujets similaires.

L'implémentation d'une telle application reste complexe du fait des nombreuses fonctionnalités requises et des ressources qu'elles nécessitent : partitions musicales dans un format logique exploitable, moteur d'affichage et de traitement de ces partitions, outils de sélection de notes, serveur multimédia, gestion des utilisateurs, etc. Des choix technologiques ont donc été faits afin de réaliser l'application dans les meilleures conditions au vu des contraintes fonctionnelles et organisationnelles existantes. On dresse la liste des choix techniques réalisés et leurs motivations :

- Plateforme de développement mobile : Flash ActionScript 3 et Adobe AIR. Cette plateforme permet un développement unique pour les systèmes d'exploitation pour mobiles iOS et Android. De plus, Flash offre des fonctionnalités Web et Multimédia avancées (accès à la Webcam, enregistrement sur un serveur de streaming, etc.).
- Serveur de média : plateforme Flash Media Server. Celle-ci s'interface naturellement avec Flash ActionScript 3 et propose par défaut une application d'enregistrement et de streaming de vidéo. L'installation et l'utilisation d'une plateforme de démonstration est de plus gratuite.
- Format des partitions : MusicXML. Ce format nous permet à la fois d'afficher la partition pour la lecture par un musicien, et d'accéder précisément à l'ensemble des objets musicaux essentiels à l'analyse de la pièce : hauteurs et durées des notes, mesures, tonalité, tempo, etc. Il est certes plus difficile de trouver des partitions au format MusicXML qu'au format PDF, cependant le MusicXML est de plus en plus plébiscité comme format d'échange entre les différents logiciels d'édition de partition (exemple : possibilité de télécharger les partitions au format MusicXML sur Musescore.com). En outre, les logiciels d'OMR sont de plus en plus performants.

La première version de l'outil a été développée en 2011 par Paul Sébastien, alors étudiant en 1<sup>ère</sup> année à l'école d'ingénieur Polytech Grenoble. Nous avons ensuite repris ce développement pour

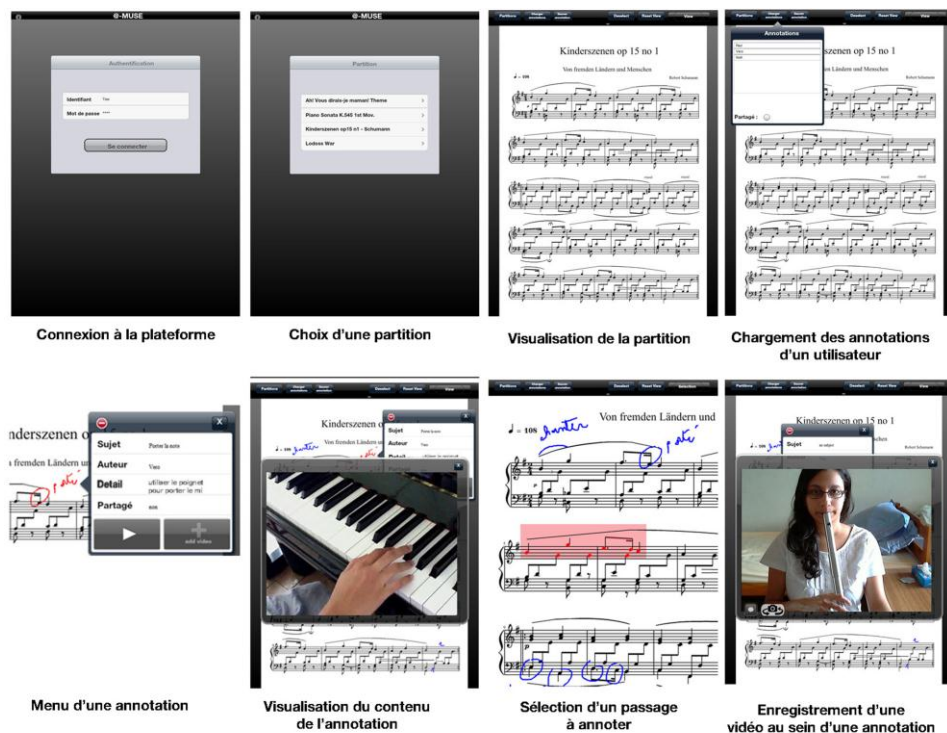


Figure 79 : Cas d'utilisation d'@-MUSE à l'aide de captures d'écran de l'application.

ajouter des fonctionnalités et tester la compilation pour les tablettes Android. La Figure 79 présente le résultat de cette implémentation au travers d'un cas d'utilisation de la plateforme. Les images de la figure sont des captures d'écran de l'application. Une fois l'utilisateur identifié sur la plateforme, ce dernier peut choisir une pièce dans la bibliothèque. L'application affiche la partition choisie en plein écran. Les gestes usuels permettent de naviguer dans celle-ci (zoom, translation, changement de page). L'utilisateur peut charger les annotations existantes afin de les consulter ou d'y répondre. Des filtres permettent de choisir les annotations à afficher : par utilisateur, type d'annotation, qualité de l'annotation, etc. Les annotations s'affichent alors sur la partition, soit sous forme de rectangles rouges, soit sous forme de tracés quelconques. En touchant l'une de ces annotations, un menu apparaît permettant de visualiser son contenu. L'utilisateur peut également créer des annotations. Le passage en mode « sélection » permet de sélectionner la partie à annoter à l'aide d'un rectangle de sélection. Il est également possible de toucher directement les notes concernées. Ces dernières passent en rouge afin d'indiquer la sélection active, qui constituera le contexte de la prochaine annotation saisie (définition d'une nouvelle ressource de type MusicalWorkExtract, voir partie 4.3.4.3). Le bouton « annoter » permet de saisir une nouvelle annotation sur le passage sélectionné (définition d'une nouvelle ressource de type SemioticAnnotation, voir partie 4.3.4.3). Par défaut cette annotation ne comporte qu'un titre et un texte court entré par l'utilisateur. Ce dernier peut ajouter une vidéo en appuyant le bouton correspondant. Cette action déclenche la caméra de la tablette. Des commandes permettent de choisir la caméra (face avant, face arrière), de lancer et stopper l'enregistrement, de le visualiser et de le valider. Par défaut toutes les annotations créées sont visibles par tous les utilisateurs connectés. Un utilisateur peut créer des annotations privées qui ne seront visibles que par lui.

Les étapes décrites précédemment constituent l'« application minimum » pour bâtir une Base de Signes Musicaux. Les annotations présentent bien les différents composants d'un Signe : le contenu (vidéo), la forme (contexte sélectionné) et le sens (texte descriptif).

Deux modes supplémentaires ont été implémentés et testés :

- Le mode « **tracés** » (Figure 80) : ce mode permet aux utilisateurs d'effectuer des tracés sur la partition à l'aide du doigt ou d'un stylet. Cette fonctionnalité permet de reproduire les conditions d'annotation d'une partition papier avec un crayon. Les tracés deviennent alors des objets annotation à part entière, ne requérant pas nécessairement l'affichage d'un rectangle de sélection (la présence d'une annotation est déjà signalée par le tracé ou groupe de tracés lui-même). Une fois un tracé ou un groupe de tracés validé, il devient cliquable de la même façon qu'un cadre de sélection. Des codes couleurs peuvent lui être associés : par exemple, un tracé bleu signale que l'annotation contient une vidéo.
- Le mode « **doigté** » : ce mode est dédié à la saisie de doigtés sur la partition. En entrant dans ce mode, chaque chiffre saisi par tracé est automatiquement affecté à la note la plus proche. Cette dernière s'affiche en rouge afin que l'utilisateur puisse vérifier (et éventuellement corriger) que le doigté saisi s'applique bien à cette note. Ce comportement permet

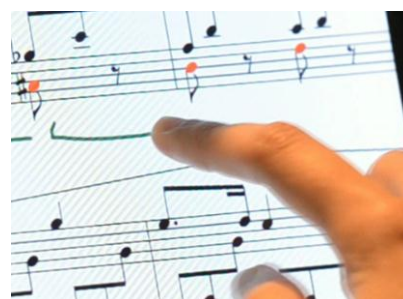


Figure 80 : Saisie d'un tracé dans @-MUSE.

l'association automatique de chaque chiffre du doigté à une note précise, plutôt qu'une association indistincte entre un groupe de tracés et un ensemble de note. Chaque chiffre constitue ainsi une « sous-annotation » exploitable séparément. Plus généralement, ce mode pose la question de l'imbrication des annotations sémiotiques (quel degré d'importance donner à une sous-annotation ?) et celle de la reconnaissance automatique de contexte d'une annotation avec tracés (traitée entre autre par [11]).

On reprend le tableau présenté dans la partie 3.2.4 afin de situer notre outil par rapport à ceux existant en matière d'annotation de partitions musicales.

Tableau 5 : Comparatif @-MUSE et autres outils d'annotation de partitions pour la pratique musicale.

	Neuma	LiveScore Annotator	Tonara	Vemus	INScore	iAnalyse	@-MUSE
Type d'application	Application Web	Application Web mobile	Application mobile	Application pour Tablet PC	Application offline (Multiplateforme)	Application offline (MAC OS)	Application mobile (iOS et Android)
Cibles	musicologues, interprètes de la musique ancienne	élèves et professeurs de musique	élèves et professeurs de musique, interprètes	élèves et professeurs de musique	compositeurs et enseignants	musicologues et enseignants	élèves et professeurs de musique, musiciens amateurs
Objectif principal	centraliser des partitions de musique ancienne	support d'annotation commun pour cours de musique en visioconférence	tourner automatiquement les pages d'une partition pendant son interprétation	support d'annotation augmenté pendant un cours de musique en présentiel	création d'animations musicales à visées pédagogiques ou artistiques	structuration et explication d'une partition animée	collecte, partage et explication d'interprétations de pièces musicales
Saisie des annotations	Clavier+souris	Manuscrite	Glissé-déposé / clavier iPad	Manuscrite	Clavier+souris	Clavier+souris	Manuscrite, audiovisuelle
Contenu des annotations	Texte, tags	Tracés manuscrits	Bibliothèque de symboles	Tracés manuscrits + Bibliothèque de symboles + fichiers audio	Texte + éléments graphiques vectoriels et bitmap + fichiers audio/vidéo	Texte + Bibliothèque de symboles	Texte + éléments graphiques vectoriels et bitmap + fichiers audio/vidéo
Indexation sur la partition	A la note près	non	non	A la note près	A la note près	A la note près	A la note près
Référencement des annotations	tags	non	non	non	non	non	tags
Recherche d'annotations	inconnu	non	non	non	non	non	à implémenter
Mobilité	non (navigateurs Web mobiles ?)	oui	oui	oui	non	non	oui
Export partition annotée	inconnu	non	non	inconnu	fichier pdf, image jpeg, png, etc.	image jpeg, vidéo H264	à implémenter
Travail collaboratif à distance	Entre utilisateurs authentifiés ?	Entre 2 utilisateurs connectés	non	non	non	non	Entre utilisateurs authentifiés
Statut de la partition annotée	publique	privée	privée	privée	privée	privée	publique ou privée (choix de l'utilisateur)
Type de communication	asynchrone	synchrone					asynchrone
Modération des annotations	inconnu	non					à implémenter

On constate qu'@-MUSE est un des outils les plus complets en matière d'interaction entre les utilisateurs et de richesse de contenu des annotations, malgré son statut de prototype non abouti. Il est de plus l'unique outil permettant la captation de vidéo directement dans l'interface de création des annotations.

De nombreuses fonctionnalités restent à implémenter, notamment celles exploitant les modèles, logiques et ontologies décrits dans la partie 4.3.4 pour le domaine de la musique. Cependant, de premiers tests ont pu être réalisés au cours du développement, permettant l'amélioration constante de l'application en fonction des besoins de ses utilisateurs.

### 6.2.3 Tests et Résultats

Le prototype développé dans le cadre de cette thèse a été testé en deux temps. La première série de tests a été réalisée pendant le développement, auprès des membres de l'équipe de recherche également musiciens. La seconde série de tests consistait à montrer l'application à des musiciens lors d'événements locaux ou internationaux (congrès, expositions, concerts).

La première phase de tests a mis en évidence les résultats suivants :

- L'intérêt d'un tel outil dépend des pratiques et préférences des musiciens : il est susceptible de convenir à ceux ayant eu une formation « classique », dans laquelle la partition est centrale. Cependant, l'apprentissage d'un instrument, même à un haut niveau de maîtrise, ne requiert pas nécessairement une partition. C'est souvent le cas des musiques traditionnelles et folkloriques. Cependant, notre outil peut effectivement correspondre aux besoins des professeurs de conservatoire s'appuyant sur la partition comme référence pour l'œuvre à interpréter et support d'aide à l'enseignement et à l'apprentissage. À ce titre, l'application ne cible pas les débutants, qui doivent d'abord s'initier à l'écoute, à la découverte de l'instrument, avant d'apprendre à lire une partition. Selon leur rapport à la musique, leur sensibilité et leurs pratiques, les membres de notre équipe n'évaluent donc pas l'intérêt de l'outil de la même façon. L'idée d'exploiter cette plateforme afin de construire une Base de savoir-faire musicaux (MSB), bien que jugée difficile à réaliser en pratique, semble appréciée. Notre approche reste complémentaire de celle développée par e-Guitare, où le point de référence était alors l'interprétation du professeur [51]. @-MUSE vise moins la réalisation de contenus audiovisuels de qualité professionnelle que la possibilité pour les enseignants et apprenants de créer eux-mêmes les contenus qui les intéressent au moment où ils le souhaitent.
- L'interface de la plateforme doit rester simple et intuitive : différents choix effectués sur les premiers prototypes n'étaient pas intuitifs. Par exemple, l'enchaînement des étapes pour la création d'une nouvelle annotation restait difficile : peu d'utilisateurs comprenaient à quel moment l'annotation était réellement générée (sélection, tracé, bouton de validation ?). Certains souhaitaient directement enregistrer une vidéo après avoir entouré les notes, alors que la sélection doit d'abord être validée, afin de générer une annotation vide (permet de gérer des sélections multiples pour une seule annotation).
- L'usage de la caméra de la tablette pour filmer une interprétation au piano est difficile sans assistance : il requiert l'utilisation d'un trépied flexible adapté à ce type de prise de vue.
- L'enregistrement direct sur un serveur de streaming peut poser des problèmes en cas de débit trop faible ou de perte de connexion. La meilleure solution serait donc d'effectuer l'enregistrement en local, sur la tablette, puis de transférer cet enregistrement sur le serveur de façon transparente pour l'utilisateur.

La deuxième phase de tests a mis en évidence les résultats supplémentaires suivants :

- Le doigt n'est pas assez précis pour réaliser des annotations manuscrites sur une tablette : il faut soit zoomer dans la partition, soit utiliser un stylet.
- Les enseignants trouvent l'application intéressante, en particulier pour le partage de doigtés au sein d'une classe et les possibilités d'échange avec les élèves à distance. Un des professeurs a suggéré l'emploi d'@-MUSE pour la préservation et la diffusion de Master

Classes. Cela permettrait également de disposer d'une leçon de haut niveau bénéficiant d'une captation professionnelle pour certaines pièces.

- Même si les musiciens sont de plus en plus nombreux à acquérir des tablettes, beaucoup d'entre eux n'en ont pas, bien qu'ils possèdent un ordinateur. L'accès aux partitions annotées via une application Web fonctionnant dans un navigateur serait donc un plus.

De manière générale, un travail de développement important reste encore à effectuer avant de réaliser des tests à grande échelle (une école de musique, voire tout possesseur de tablette). Ce travail pourrait être réalisé dans le cadre d'un projet de recherche de type ANR, et aboutir à la création d'une entreprise innovante dans le domaine du e-Learning instrumental mobile. Plus précisément, les usages d'un tel service d'annotation sémiotique gagneraient à être étudiés dans le cadre du Living Lab de l'Université de La Réunion, créé en 2012 sur la thématique de l'enseignement et de l'apprentissage par le jeu.

### **6.3 Analyseur automatique de partitions : Score Analyzer**

#### 6.3.1 Objectif

Score Analyzer<sup>48</sup> est un prototype d'analyseur de partitions musicales au format MusicXML. Son objectif est de déterminer automatiquement le niveau de difficulté technique d'une partition pour piano. Ce programme est un premier prototype d'un module de détection automatique des passages difficiles faisant partie de l'Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique décrit dans la partie 5.3.2. Il est donc destiné à être intégré à l'application @-MUSE présentée précédemment.

#### 6.3.2 Conception et implémentation

Score Analyzer se fonde sur les sept critères de difficulté technique définis dans la partie 5.5.4 pour le piano. Le programme accepte en entrée des partitions pour piano au format MusicXML. Le prototype a été développé en deux phases. Dans la première phase, les mesures de difficulté ont été testées et calibrées sur un corpus de cinquante pièces pour piano classique. La seconde a débuté suite à la publication de nos premiers résultats dans [53], qui a été récompensée par un prix. L'entreprise Muscore nous a alors permis d'exploiter son Web Service Muscore.com afin de bénéficier d'un corpus de partitions MusicXML bien plus important. En effet, la nouvelle version de Score Analyzer peut estimer le niveau de difficulté de n'importe quelle partition pour piano postée sur muscore.com.

---

<sup>48</sup> <http://e-piano.univ-reunion.fr/tests/ScoreAnalyser/selectScore.php>, visité le 09/08/2013.

Concrètement, Score Analyzer se présente sous la forme d'un script PHP prenant une partition MusicXML en entrée. La partition est parsée note par note afin d'en extraire les informations nécessaires à l'évaluation de sept critères de difficulté. La Figure 81 est une capture d'écran de la version la plus récente du prototype. Elle présente une partie de la fiche d'analyse d'une pièce. La partie gauche de l'écran affiche les résultats calculés par le script, la partie droite inclut la partition animée grâce au widget de musescore.com. Suite à la présentation de quelques métadonnées et statistiques, Score Analyzer affiche les grandes parties trouvées dans la pièce selon la méthode décrite dans la partie 5.5.4 de ce mémoire. Une estimation du niveau de difficulté global de la pièce est ensuite donnée (section « General »). Chaque critère est évalué par une note entre 1 (facile/débutant) et 4 (très difficile/virtuose). Cet échelonnement a été choisi car il permet de résumer assez simplement le niveau de difficulté ressenti. Il se rapproche de plus des échelles choisies par d'autres spécialistes de la partition comme le site free-scores.com (5 niveaux de difficulté : débutant, facile, intermédiaire, avancé et expert) ou le catalogue DIAM<sup>49</sup> (5 niveaux, suivant le nombre d'années de pratique de l'instrument). La note générale de la pièce est une moyenne pondérée des résultats obtenus pour chacun de ces critères. Les méthodes de mesures employées pour chaque critère ont été décrites dans la partie 5.5.4 sur la recherche automatique des difficultés techniques d'une partition. La calibration des niveaux de difficulté associés aux ratios mesurés a été faite sur la base de notre propre expérience du piano et des tests décrits dans la partie

## Score Analyzer v2

[< Change score](#)

### Identification

- Title : Prelude
- posted by [Stig](#)

### Statistics

- Tonality : E major
- Number of pages : 3
- Number of measures : 61
- Quantise : 16 (base duration : 3)

### Structure

- part 1 : measure 1 to 30 (certitude : 100 )
- part 2 : measure 31 to 44 (certitude : 38 )
- part 3 : measure 45 to 61 (certitude : 38 )

### Difficulty

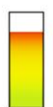
#### General

Marks summary (/4) :

- speed difficulty: 2
- displacements difficulty: 4
- chords difficulty: 4
- alterations difficulty: 3
- rhythm difficulty: 2

**Result:**

2.9  
advanced



#### Playing speed

tempo : 88.0002 , measure : 4/4 (binary)  
shortest significant value : 8  
estimated playing speed ratio : 25 %

**Result:**

moderate

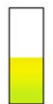


Figure 81 : Capture d'écran du prototype Score Analyzer.

<sup>49</sup> Diffusion Art Musique : <http://www.diamdiffusion.fr>, visité le 09/08/2013.



suivante. Malgré l'absence du critère « doigté », information généralement non décrite dans les fichiers MusicXML, et qui requerrait donc un algorithme spécifique, les résultats obtenus sont proches des estimations faites par des musiciens.

### 6.3.3 Tests et résultats

Les méthodes de mesures de la difficulté musicale ont été testées et calibrées sur un corpus<sup>50</sup> de cinquante pièces pour le piano classique. Dans [58], nous avons comparé les résultats obtenus à des estimations provenant de deux sources distinctes de musiciens. La première source d'estimations provient du site de partage de partitions free-scores.com qui propose à ses utilisateurs d'attribuer un niveau de difficulté aux partitions téléchargées. Une moyenne des notes ainsi attribuées est ensuite effectuée. La deuxième source est un questionnaire demandant à des pianistes confirmés de notre entourage d'estimer la difficulté de chaque pièce du corpus avec la convention suivante : 1 = débutant, 2 = intermédiaire, 3 = avancé, 4 = virtuose. Les deux sources sont donc complémentaires : la première cible une large population de musiciens mais de niveaux très hétérogènes, la seconde concerne une population très restreinte mais plus spécialisée et avec laquelle nous avons un contact direct afin d'obtenir des précisions sur les raisons de la difficulté ressentie. Cette seconde source, plus fiable que la première, est d'autant plus importante que nombre d'évaluations relevées sur free-score.com s'avèrent faussées, qu'il s'agisse d'une estimation aberrante de la part d'un musicien trop ou pas assez sûr de lui, ou même de commentateurs ayant indiqué leur propre niveau d'instrument au lieu du niveau de la pièce commentée. Dans ce contexte, les pièces ayant récolté peu de notes ont donc plus de risques d'obtenir une estimation moyenne non pertinente. Toutefois, quelques soient les sources, les estimations restent généralement très proches de celles obtenues avec Score Analyzer comme le montre la Figure 82. Les résultats de Score Analyzer sont même plus proches des estimations des pianistes expérimentés que des moyennes de free-scores. Une analyse par critère a permis de confirmer la pertinence des évaluations automatiques de Score Analyzer. Cependant, des

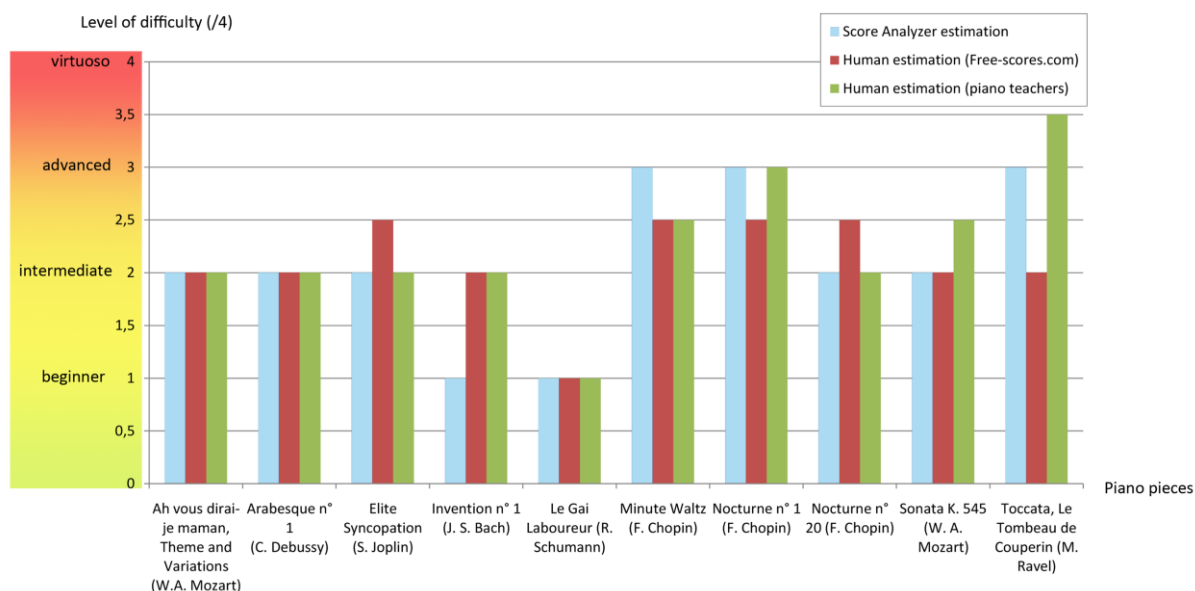


Figure 82 : Comparaison de différentes sources d'estimation du niveau de difficulté de pièces pour piano. (source : [58])

<sup>50</sup> Corpus accessible à l'URL suivante : <http://e-piano.univ-reunion.fr/tests/ScoreAnalyser/readScore.php>, visitée le 12/08/2013.

erreurs d'estimation restent possibles pour des morceaux présentant des difficultés non encore implémentées dans la version actuelle de Score Analyzer, telles que le contrepoint (exemple de l'Invention de Bach sur la Figure 82).

Dans [53], nous avons réalisé une Analyse par Composantes Principales (ACP) afin d'étudier comment les différents critères discriminaient les pièces du corpus. Pour ce faire, et afin de n'inclure aucun jugement personnel, on ne s'est fondé que sur les mesures

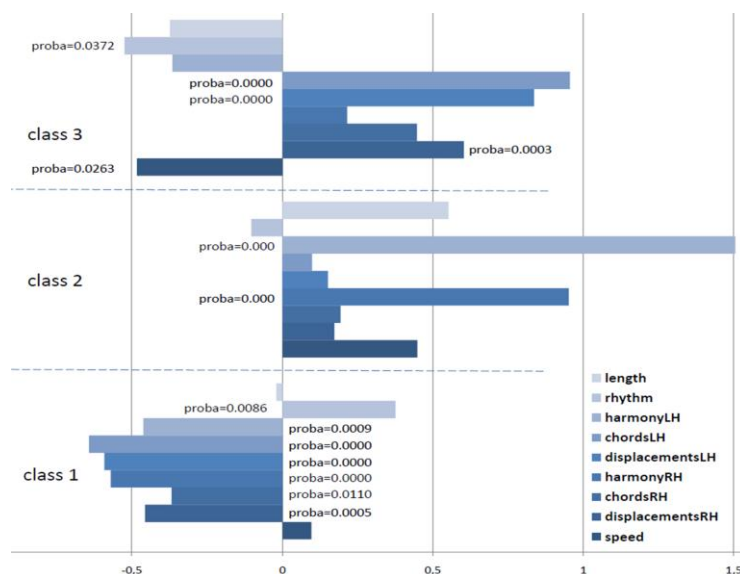


Figure 83 : Test de Student (comparaison de moyennes) sur les trois classes identifiées au sein du corpus de Score Analyzer v1.

statistiques réalisées sur les partitions sans considérer les estimations de difficulté ressentie. Cette analyse a mis en évidence trois classes au sein du corpus, avec les profils suivants :

- Classe 1 : cette classe regroupe essentiellement des pièces pour les débutants (Les Scènes de l'Enfance, Le Gai Laboureur de Schumann) et niveaux intermédiaires (Sonatines, Inventions). Ces pièces sont généralement courtes, ont peu d'accords et de déplacements et présentent peu de difficultés harmoniques. Le tempo peut cependant rester élevé, et certaines pièces d'un niveau intermédiaire présentent des formules rythmiques élaborées (exemple : l'Arabesque n°1 de Debussy).
- Classe 2 : cette classe contient des morceaux d'un niveau avancé à virtuose (des Etudes de Chopin, la Toccata du Tombeau de Couperin de Ravel), avec un tempo rapide, de nombreux et grands déplacements sur le clavier, des motifs harmoniques complexes et de nombreux accords. Certains individus limitrophes ne présentent pas un niveau de difficulté très élevé mais sont tout de même rattaché à la classe à cause de l'importance de leurs critères harmoniques et rythmiques peu communs pour des pièces simples.
- Classe 3 : cette classe n'est pas caractérisée par un niveau de difficulté mais plutôt par une écriture musicale commune. En effet, chaque individu de la classe présente un accompagnement de main gauche du type « basse+accord » (ragtimes, valse, cakewalk, etc.). La plupart de ces pièces ont un niveau de difficulté intermédiaire.

On en déduit que les critères utilisés pour le moment discriminent assez facilement les pièces difficiles des pièces simples, mais qu'un travail supplémentaire est nécessaire afin d'analyser les pièces de niveau intermédiaire sur lesquelles les difficultés sont plus subtiles.

## 6.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présentés deux prototypes d'application destinés à accompagner des musiciens dans l'annotation sémiotique de partition, afin de co-construire un MSB (Base de Signes Musicaux). Le premier prototype, nommé @-MUSE, est une plateforme d'annotation collaborative de partitions MusicXML adaptée aux tablettes tactiles. L'application a été testée sur un petit groupe

de musiciens ayant eu une formation classique au conservatoire. Ces tests ont permis de valider l'approche proposée dans cette thèse pour la gestion de savoir-faire de haut niveau, impliquant à la fois une approche symbolique, abstraite, intellectuelle (la partition musicale, les écrits), et une approche expressive, sensible, intuitive (la vidéo, le son, l'image, le geste). Le second prototype, nommé Score Analyzer, a pour but d'analyser automatiquement des partitions afin de détecter les difficultés techniques inhérentes à l'interprétation de la pièce. Cette fois-ci, la machine n'est plus une simple station de traitement des données, puisque ses analyses peuvent avoir des répercussions sur le processus d'apprentissage de la pièce. En effet, l'objectif est d'intégrer Score Analyzer à @-MUSE afin de détecter automatiquement les difficultés d'une pièce et de trouver des annotations sémiotiques pouvant aider les débutants à les surmonter. Pour ce faire, les prototypes doivent être améliorés et donner lieu à des expérimentations plus poussées.

Dans un premier temps, le système d'annotation sémiotique d'@-MUSE pourrait être intégré à un service de partage de partitions déjà en place, tel que musescore.com. Ceci permettrait d'expérimenter l'annotation sémiotique sur une plus grande échelle et ainsi approfondir l'étude des usages d'une telle application. Il s'agit également de valider les modèles de connaissances musicales décrits dans la partie 4.3.4. Dans un second temps, l'intégration de Score Analyzer permettrait d'automatiser certains processus d'annotation sur des pièces non encore renseignées (nouvelles pièces, compositions, etc.). L'usage de Score Analyzer peut également être étendu à des activités musicales autres que la pédagogie. Ainsi, l'analyse par critère pourrait être utilisée afin de comparer des transcriptions distinctes d'un même morceau. Cette idée a été émise suite à un constat : sur la plateforme musescore.com, de nombreuses personnes réalisent des transcriptions d'œuvres existantes pour un instrument particulier. Pour les morceaux populaires, il peut y en avoir jusqu'à cinq versions distinctes<sup>51</sup> pour le piano seul. Score Analyzer permettrait ainsi de trouver la plus appropriée aux préférences d'un musicien, ou bien de fournir la plus proche de la version originale (est-ce la plus difficile ?). Cette étude permettrait également de mieux cerner les aptitudes d'écoute musicale des utilisateurs de la plateforme en les mettant en relation avec d'autres paramètres (i.e. l'âge, le sexe, l'expérience musicale, l'instrument joué, les goûts musicaux, les œuvres transcrites, etc.).

---

<sup>51</sup> Voir l'exemple du morceau *Skyfall* d'Adele transcrit pour le piano : <http://e-piano.univ-reunion.fr/tests/ScoreAnalyser/searchResults.php?searchbar=skyfall>, visité le 13/08/2013.

---

## 7 Conclusion et perspectives

### *7.1 Synthèse des propositions*

La transmission de savoir-faire requiert une interaction constante entre l'enseignant et l'apprenant, tout particulièrement en musique, où il s'agit de montrer, reproduire et corriger des gestes, d'acquérir une certaine agilité et de créer des sonorités particulières. Les nouvelles technologies de l'information et de la communication constituent un médium intéressant pour soutenir ces activités pédagogiques.

Notre état de l'art, présenté dans les Chapitres 2 et 3, a cependant montré que les outils existants ne sont pas adaptés à la comparaison d'interprétations personnelles de sujets, avec leur expérience, leur sensibilité et leur perception propre de l'objet étudié. Dans notre domaine d'application, la musique, l'interprétation est en effet au cœur de la création artistique : comment un musicien professionnel joue-t-il un passage, comment produit-il une sonorité ? Existe-t-il d'autres approches pour la pièce étudiée ? Quelle serait la meilleure, et pourquoi ? Les bases de connaissances actuelles peuvent difficilement gérer les réponses à ces questions, car elles sont dédiées à la manipulation de connaissances formelles et objectives, alors que les savoir-faire que nous souhaitons gérer sont dépositaires de sujets humains, ayant des approches distinctes d'un même problème, et qui de plus n'expriment qu'une faible partie de leurs interprétations par le langage.

Dans cette thèse, nous avons donc proposé de modéliser ces interprétations par des Signes. En effet, le Signe est un objet particulièrement approprié à l'étude d'interprétations puisqu'il distingue l'idée d'un sujet (le signifié) de sa représentation (le signifiant) employée pour communiquer avec d'autres sujets. En décrivant ces composants dans un environnement adapté, des comparaisons deviennent possibles.

Notre première proposition, exposée dans le Chapitre 4, a donc consisté en une nouvelle définition du Signe, adaptée à la comparaison d'interprétations. Après avoir défini et formalisé la notion d'interprétation, nous avons donc décrit un Signe Interprétatif composé d'un contenu, d'une forme et d'un sens, dépendants tous trois de la sensibilité et de l'expérience d'un sujet. Ce Signe est construit progressivement par le sujet, au fur et à mesure de sa pratique de l'activité considérée et de sa motivation à communiquer son interprétation personnelle. Nous avons ensuite proposé de modéliser ce Signe Interprétatif sous la forme d'une annotation de l'objet interprété. Cette modélisation, que nous nommons Annotation Sémiotique, nous permet de représenter des Signes dans un système informatique à l'aide de données, d'information et de connaissances semi-formelles. En particulier, l'usage de données multimédia permet de montrer des savoir-faire gestuels au sein des annotations sémiotiques. Afin d'intégrer l'annotation sémiotique aux ontologies du Web Sémantique, nous avons construit un formalisme et proposé un schéma de classe adapté. Le processus de construction du Signe est également modélisé dans le domaine informatique via l'usage de logiques descriptives et de modèle descriptifs dérivés des pratiques du domaine d'étude considéré. Ces logiques permettent de guider l'utilisateur du système d'annotation sémiotique dans la description de son interprétation. Les modèles proposés sont ensuite appliqués au domaine musical. Après une étude succincte de la typologie des Signes Musicaux dans les œuvres, du point de vue du compositeur ou de l'auditeur, nous avons analysé les modalités de capture de Signes échangés lors de leçons d'instrument, cette fois-ci du point de vue de l'interprète. Des logiques descriptives, modèles descriptifs et ontologies ont été proposées afin d'assister les musiciens dans

l'expression de leur approche personnelle d'une œuvre à travers l'annotation sémiotique de partitions.

L'activité d'annotation pose la question de l'organisation de ces dernières : liens entre annotations, recherche d'annotation, validation des contenus. Notre seconde proposition, décrite dans le Chapitre 5, consiste donc en la définition d'une Base de Signes. On propose de modéliser cette dernière à l'aide de graphes orientés d'objets, d'annotations sémiotiques et de notions. Si les annotations sémiotiques permettent de modéliser des interprétations de sujets, les notions permettent, elles, de regrouper ces interprétations selon des thèmes ou compétences importantes du domaine étudié. Des enseignants peuvent ainsi exploiter ces notions afin de proposer des parcours pédagogiques originaux à leurs élèves. La Base de Signes, en sus de l'apprentissage machine caractéristique des Bases de Connaissances, se pose comme support d'un apprentissage humain. Une méthodologie de peuplement dynamique de la Base est ensuite proposée : les objets et annotations sont saisis selon les besoins et motivations des usagers de la plateforme d'annotation. Cette méthodologie permet notamment d'identifier les processus automatisables dans la démarche d'annotation sémiotique. Cette constatation nous permet de proposer un Agent d'Aide à l'Annotation Sémiotique (AAAS) fondé sur le raisonnement à partir de cas. Ce dernier exploite des interprétations validées et des situations similaires afin de résoudre des problèmes identifiés sur de nouveaux objets d'étude. En particulier, l'AAAS tente de détecter les situations difficiles, les causes de ces difficultés et comment les surmonter. Pour ce faire, il est important de pouvoir confirmer ou infirmer la pertinence d'une approche décrite dans une Annotation Sémiotique. Un système d'inter-validation d'annotation est donc également décrit. Enfin, l'ensemble des propositions du chapitre est appliqué au domaine musical afin d'identifier les modalités de constitution d'une Base de Signes Musicaux (MSB). On s'intéresse entre autre à l'annotation automatique de partitions musicales pour l'aide à l'interprétation. A titre d'exemple, on propose un ensemble de sept critères permettant d'estimer le niveau de difficulté technique d'une pièce pour le piano.

Enfin, le Chapitre 6 décrit les expérimentations menées pendant cette thèse. Ces dernières se présentent sous la forme de deux prototypes permettant d'évaluer la pertinence de l'approche sémiotique pour la transmission et le partage de savoir-faire musicaux. Le premier prototype, nommé @-MUSE (@notation platform for MUSical Education) consiste en une plateforme collaborative d'annotation sémiotique de partitions musicales. Bien que toujours au stade de prototype et requérant encore de nombreux travaux d'ingénierie, cette application a permis de confronter notre approche sémiotique à l'appréciation d'un groupe de musiciens de niveau avancé (3<sup>ème</sup> cycle de conservatoire et professeurs). Ces derniers ont confirmé l'apport d'une telle approche, notamment pour les échanges entre professeurs, et ont permis de mettre en évidence ses principales limites techniques. Le second prototype, Score Analyzer, est un script d'analyse de partitions pour piano au format MusicXML. Son objectif est de déterminer automatiquement le niveau global de difficulté d'une partition à partir d'une grille de critères. Ces critères sont directement inspirés des difficultés rencontrées par les pianistes lors du déchiffrement et de l'exécution d'une partition. Couplé à @-MUSE, Score Analyzer permettra de détecter les passages difficiles d'une nouvelle pièce à annoter, et de relier ces derniers à des Annotations Sémiotiques appropriées.

Bien que la nécessité de préserver et transmettre des savoir-faire soit claire, la construction d'une solution extensive au moyen des TIC mobilise des connaissances dans des domaines très distincts (gestion des connaissances, pédagogie, sémiotique, musique) et fait émerger une multitude de

---

problèmes sous-jacents : la représentation de savoir-faire, d'interprétations subjectives dans un système informatique, la place de ce dernier dans le processus pédagogique, la validation des interprétations, leur réutilisation dans des contextes appropriés, la capitalisation d'échanges informels, la constitution de cours, l'identification de notions importantes, la capture des Signes gestuels, sonores, etc. Il en résulte une thèse certes complexe et peu conventionnelle, mais représentative des nouveaux enjeux de la gestion des savoir-faire, en particulier dans le domaine de l'apprentissage musical, riche en innovations pédagogiques, artistiques et technologiques.

### **7.2 Perspectives**

La première perspective de ce travail de recherche est naturellement la poursuite des implémentations afin d'expérimenter l'approche sémiotique dans un cadre plus étendu. Pour ce faire, un partenariat entre le Living Lab de l'Université de La Réunion, la société MuseScore et des écoles de Musique est envisagé. Un tel projet permettrait d'une part de transformer les prototypes développés en produits aboutis grâce à un travail d'ingénierie, et d'autres parts de les expérimenter dans des conditions réelles, c'est-à-dire avec un accès ouvert à tous les musiciens. Cependant, l'administration et l'animation d'une plateforme telle que @-MUSE a des coûts. Une incubation d'entreprise innovante constituerait donc une piste sérieuse d'exploitation des résultats de notre thèse.

Par ailleurs, cette thèse a levé de nombreuses questions de recherche qui gagneraient à être approfondies. En premier lieu, on distingue les questions portant sur la notion d'interprétation en informatique, non uniquement en tant que projection possible de descriptions formelles dans le monde réel, mais plutôt comme point de vue personnel d'un sujet sur un objet. La différence réside essentiellement dans le fait qu'on reconnaisse ou non que toute connaissance communiquée est en fait une interprétation d'un sujet. Les questions, pour certaines traitées dans ces travaux en prenant un parti, sont alors nombreuses : où finit l'interprétation et où débute la connaissance ? Deux interprétations peuvent-elles être identiques, ou est-ce impossible du fait de la grande variabilité des interprètes, même s'ils ont une éducation et des sensibilités proches ? Peut-on alors identifier des courants d'interprétations ? Peut-on parler de qualité d'une interprétation ? Selon quels critères, par rapport à quelle référence ? Comment se construit une interprétation ? Quels sont les facteurs qui l'influencent ? Peut-on les modéliser afin de fournir un environnement propice à la construction d'interprétations abouties ? En second lieu, on peut approfondir le lien entre l'interprétation et l'apprentissage d'un savoir-faire. En particulier, dans notre contexte musical, nous avons vu que l'annotation constitue une approche intéressante pour véhiculer des interprétations. On souhaiterait alors poursuivre les travaux sur l'annotation automatique de partitions afin d'assister les musiciens dans l'apprentissage ou l'enseignement d'une pièce. Nous nous intéressons en particulier aux influences mutuelles entre les critères de difficulté techniques identifiés, à la mise en place de critères expressifs ou encore à l'adaptation des critères à d'autres instruments que le piano. La génération automatique d'exercices techniques est également intéressante pour les débutants. On propose pour ce faire d'exploiter les structures remarquables de la partition, ou bien les annotations sémiotiques indexant des cas similaires.

La musique offre la possibilité d'explorer encore bien d'autres pratiques. Par exemple, le jeu en groupe fait intervenir de nouveaux critères qui n'avaient pas lieu d'être considérés pour le piano solo : la synchronisation entre les musiciens, l'accordage, l'équilibre entre les différents instruments, etc. Les expérimentations réalisées sur Score Analyzer ont également révélé l'intérêt d'un tel

système pour l'étude de transcriptions. Là encore, l'interprétation joue un rôle important : si les individus entendent généralement la même mélodie, les accompagnements, harmonies, formules rythmiques et carrures ne sont pas nécessairement transcrits de la même façon. L'improvisation constitue également un vaste champ d'expérimentation, où la créativité et la sensibilité personnelle de l'interprète sont encore plus essentielles : comment un musicien exploite-t-il un thème pour construire une œuvre nouvelle par l'improvisation ?

Enfin, la personnalisation de la plateforme sémiotique est essentielle afin d'adapter le service d'annotation à ses usagers. Beaucoup des propositions faites en ce sens dans nos travaux reposent sur un profilage précis des musiciens : comment cerner le niveau d'instrument d'un individu ? Les professeurs de musique parviennent à le faire simplement en entendant une interprétation. Cependant, sur une plateforme TICE, l'enjeu est de proposer un processus plus simple, personnalisé et ludique qu'un examen magistral, particulièrement contraignant, voire démotivant, pour un débutant. Notre idée pour dresser ce profil serait donc de concevoir un jeu sérieux (serious game) de profilage du niveau d'un instrumentiste. Un travail pédagogique réalisé avec des professeurs expérimentés permettrait de concevoir des exercices permettant d'évaluer le niveau des musiciens selon différents critères (essentiellement techniques). Ces exercices seraient ensuite présentés sur la plateforme sous forme de mini-jeux. Chaque musicien sondé peut enregistrer son exécution de l'exercice sur la plateforme. Sa performance est ensuite comparée à celles d'autres musiciens afin de la situer. La question de l'automatisation ou non de cette évaluation reste ouverte. Certes, cette évaluation peut être perçue comme une volonté de « ranger les musiciens dans des cases ». Cependant, en plus des possibilités de personnalisation qu'offre cette dernière, elle permet d'aborder la technique instrumentale sous l'angle du jeu, du défi personnel (suivi des progrès réalisés) et de la compétition entre les interprètes. Cette approche innovante est de plus en plus plébiscitée dans le domaine du e-Learning, en particulier pour un public jeune, rompu aux nouvelles technologies et adeptes des jeux-vidéos.

En résumé, l'ensemble des perspectives proposées appellent à des expérimentations excitantes au carrefour de la gestion des connaissances et des signes, des arts et de la pédagogie, depuis les fondements de nos traditions jusqu'aux plus récentes de nos technologies.

# Bibliographie

- 1 Abrouk, L., Audeon, H., Cullot, N. et al. The neuma Project: Towards On-line Music Score Libraries. In *Intl. Workshop on Exploring Musical Information Spaces (WEMIS'09)* ( 2009).
- 2 Al Kasimi, A., Nichols, E., and Raphael, C. A SIMPLE ALGORITHM FOR OR AUTOMATIC GENERATION OF POLYPHONIC PIANO FINGERINGS (2009).
- 3 Assayag, G., Rueda, C., Laurson, M., Agon, C., and Delerue, O. Computer-assisted composition at IRCAM: From PatchWork to OpenMusic. *Computer Music Journal*, 23, 3 (1999), 59-72.
- 4 Bachimont, Bruno. *Ingénierie des connaissances et des contenus, le numérique entre ontologies et documents*. Lavoisier, Paris, 2007.
- 5 Beller, Grégory. *Analyse et modèle génératif de l'expressivité. Application à la parole et à l'interprétation musicale*. 2009.
- 6 Bellini, P. and Nesi, P. WEDELMUSIC format: An XML music notation format for emerging applications. In *Web Delivering of Music, 2001. Proceedings. First International Conference on* ( 2001), 79-86.
- 7 Berners-Lee, T., Hendler, J., Lassila, O., and others. The Semantic Web. *Scientific american*, 284, 5 (2001), 28-37.
- 8 Bertin-Mahieux, T., Eck, D., and Mandel, M. Automatic tagging of audio: The state-of-the-art. *Machine Audition: Principles, Algorithms and Systems* (2010), 334--352.
- 9 Bimbot, F., Deruty, E., Sargent, G., and Vincent, E. Semiotic structure labeling of music pieces: concepts, methods and annotation conventions. In *Proceedings of the International Symposium on Music Information Retrieval* ( 2012).
- 10 Castan, G., Good, M., and Roland, P. Extensible markup language (XML) for music applications: An introduction. *The virtual score: representation, retrieval, restoration* (2001), 95-102.
- 11 Chapuis, Y., Fober, D., Letz, S., Orlarey, Y., and Daudin, C. Annotation de partitions musicales dynamiques. *Proc. JIM* (2007), 18-27.
- 12 Conruyt, N. and Grosser, D. Knowledge Management in Environmental Sciences with IKBS: Application to Systematics of Corals of the Mascarene Archipelago. *Selected Contributions in Data Analysis and Classification* (2007), 333-343.
- 13 Conruyt, Noël, Grosser, David, and Vignes-Lebbe, Régine. Knowledge Discovery for Biodiversity: from Data Mining to Sign Management. In *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs)* (Leipzig, Germany 07/2012 2012).



- 14 Couprie, P. iAnalyse: un logiciel d'aide à l'analyse musicale. *Actes des Journées d'Informatique Musicale, Albi* (2008).
- 15 Deransart, Pierre. *Conception de traces et applications (vers une méta-théorie des traces)*. INRIA Rocquencourt. 2009.
- 16 Desautels, J. STANDARD MUSIC DESCRIPTION LANGUAGE: UNE NORME EN DEVENIR. *Cursus*, 5 (1999).
- 17 Fober, D., Orlarey, Y., Letz, S. INScore - An Environment for the Design of Live Music Scores. In *Proceedings of the Linux Audio Conference, LAC 2012* ( 2012).
- 18 Fober, D., Letz, S., and Orlarey, Y. VEMUS-Feedback and groupware technologies for music instrument learning. In *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference* ( 2007), 1-8.
- 19 Gobeil, Cécile. *L'Apprentissage du Piano*. 2002.
- 20 Gruber, Thomas R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*, 5 (April 1993), 199-220.
- 21 Handelman Eliot, Sigler Andie and Chasles Jean-Benoit. Automatic performance analysis of virtuosic music for string. In *International Symposium on Performance Science (ISPS)* (Toronto 2011).
- 22 Hanon, C. L. *The Virtuoso Pianist in Sixty Exercises*. 1873.
- 23 Hass, J. *Introduction to Computer Music, vol. 1, Chapter 3: MIDI*. Indiana University, Center for Electronic and Computer Music, 2010.
- 24 Haury, J. La grammaire de l'exécution musicale au clavier et le mouvement des touches. *Manuscrit* (1987).
- 25 Haury, J. La pianotechnie ou notage des partitions musicales pour une interprétation immédiate sur le metapiano. *Pr. of the 14th Journées d'Informatique Musicale, Grenoble, France* (2009).
- 26 Haus, G. and Longari, M. Towards a symbolic/time-based music language based on xml. In *Proceeding of the First International IEEE Conference on Musical Application using XML (MAX2002)* ( 2002), 38-46.
- 27 Hirata, K., Noike, K., and Katayose, H. Proposal for a performance data format. *Tentative Program* (2003), 7.
- 28 Koduri, G.K., Serrà, J., and Serra, X. Characterization of intonation in carnatic music by parametrizing pitch histograms. In *Proceedings of the 13th International Society for Music Information Retrieval Conference., Porto, Portugal* ( 2012).

- 29 Konieczny, V. *Glenn Gould: A Musical Force*. Dundurn, 2008.
- 30 Krishna, S. *Introduction to database and knowledge-base systems*. World Scientific Publishing Company Incorporated, 1992.
- 31 Lartillot, O. Une analyse musicale automatique suivant une heuristique perceptive. In *3ème Conférence Internationale Francophone sur l'Extraction et la Gestion des Connaissances, EGC* (2003).
- 32 Le Renard, J. and Conruyt, N. On the representation of observational data used for classification and identification of natural objects. *IFCS'93. Lecture notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag* (1994), 308-315.
- 33 Le Renard, J., Levi, C., Conruyt, N., and Manago, M. Sur la représentation et le traitement des connaissances descriptives: une application au domaine des éponges du genre *Hyalonema*, vol. 66 suppl., *Biologie, Recent advances in sponge biodiversity and documentation*, P. Willenz. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique* (1996), 37-48.
- 34 Levoine, X. *Synthèse de l'enquête sur l'utilisation des Tice en Conservatoire*. ARIAM Ile-de-France, 2010.
- 35 Lin, C.-C. *An Intelligent Virtual Piano Tutor*. National Chung Cheng University, 2006.
- 36 Li, T., Ogihara, M., and Tzanetakis, G. *Music data mining*. CRC Press, 2011.
- 37 Meftah, I.T., Le Thanh, N., and Ben Amar, C. Towards an Algebraic Modeling of Emotional States. In *Internet and Web Applications and Services (ICIW), 2010 Fifth International Conference on* (2010), 513-518.
- 38 Morris, C.W. *Foundations of the Theory of Signs*. University of Chicago Press, 1938.
- 39 Napoli, Amedeo. Une brève introduction aux logiques de descriptions. *Cours de la Logique de Description* (2005).
- 40 Nattiez, J.J. and Abbate, C. *Music and discourse: Toward a semiology of music*. Princeton Univ Pr, 1990.
- 41 Pachet, F. and Cazaly, D. A Taxonomy of Musical Genres. In *Content-Based Multimedia Information Access Conference (RIAO)* (Paris 2000).
- 42 Parncutt, R., Sloboda, J.A., Clarke, E.F., Raekallio, M., and Desain, P. An ergonomic model of keyboard fingering for melodic fragments. *Music Perception* (1997), 341-382.
- 43 Piaget, J. *Six Etudes de Psychologie*. Editions Gonthier, Genève, 1964.
- 44 Rabson, Grace. *The influence of analytical prestudy in memorizing piano music*. New York, 1937.

- 45 Raimond, Y. *A distributed music information system*. 2008.
- 46 Raimond, Y., Abdallah, S., Sandler, M., and Giasson, F. The music ontology. In *Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval ( 2007)*, 417-422.
- 47 Rho, S., Song, S., Hwang, E., and Kim, M. COMUS: Ontological and Rule-Based Reasoning for Music Recommendation System. In *Proceedings of the 13th Pacific-Asia Conference on Advances in Knowledge Discovery and Data Mining ( 2009)*, 859-866.
- 48 Rigaux, P. Neuma Ontology Specification. *Project Neuma Report, Lamsade-CNRS, ANR-08 (2008)*.
- 49 Salamon, J., Gulati, S., and Serra, X. A Multipitch Approach to Tonic Identification in Indian Classical Music. ( 2012), ISMIR, page.
- 50 Salaün, Jean-Michel. *Vu, lu, su : Les architectes de l'information face à l'oligopole du Web*. La Découverte, 2012.
- 51 Sébastien, O. *Gestion des Savoir-Faire par les Systèmes d'Information : une Application à l'Apprentissage Instrumental*. 2009.
- 52 Sébastien, O., Conruyt, N., and Grosser, D. Defining e-services using a co-design platform: Example in the domain of instrumental e-learning. *Interactive Technology and Smart Education*, 5, 3 (2008), 144-156.
- 53 Sébastien, V., Ralambondrainy, H., Sébastien, O., and Conruyt, N. SCORE ANALYZER: AUTOMATICALLY DETERMINING SCORES DIFFICULTY LEVEL FOR INSTRUMENTAL E-LEARNING. In *Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval ( October 2012)*.
- 54 Sébastien, V., Sébastien, P., and Conruyt, N. @-MUSE : Sharing Musical Know-how Through Mobile Devices Interfaces. In *5th Conference on e-Learning Excellence in the Middle East, Dubaï (Dubaï January 2012)*.
- 55 Sébastien, V., Sébastien, D., and Conruyt, N. A collaborative platform model for digital scores annotation. In *3rd Annual Forum on e-Learning Excellence in the Middle East, Dubaï (Dubaï January 2010)*.
- 56 Sébastien, V., Sébastien, D., and Conruyt, N. An Ontology for Musical Performances Analysis: Application to a Collaborative Platform Dedicated to Instrumental Practice. In *Fifth International Conference on Internet and Web Applications and Services (ICIW), 2010 ( May 2010)*, 538-543.
- 57 Sébastien, V., Sébastien, D., and Conruyt, N. ANNOTATING WORKS FOR MUSIC EDUCATION: PROPOSITIONS FOR A MUSICAL FORMS AND STRUCTURES ONTOLOGY AND A MUSICAL PERFORMANCE ONTOLOGY. In *ISMIR ( 2013)*.
- 58 Sébastien, V., Sébastien, D., and Conruyt, N. Constituting a Musical Sign Base through Score Analysis and Annotation. *International Journal On Advances in Networks and Services*, 4, 3 and 4

(April 2012), 386-398.

- 59 Sébastien, Véronique, Sébastien, Didier, and Conruyt, Noël. Contribution à l'élaboration d'un modèle de plateforme collaborative d'annotation multimédia de partitions musicales numériques. In *Actes de la conférence Convergence des Réseaux, de l'Informatique, et du Multimédia pour les E-Services (CRIMES)* (Saint Denis de La Réunion, France November 2009), 29.
- 60 Sebastien, V., Sebastien, D., and Conruyt, N. Dynamic music lessons on a collaborative score annotation platform. In *ICIW 2011, The Sixth International Conference on Internet and Web Applications and Services* ( March 2011), 178-183.
- 61 Shortliffe, Edward Hance. *Computer-based medical consultations: MYCIN*. Elsevier, 1976.
- 62 Sloboda, J.A., Clarke, E.F., Parncutt, R., and Raekallio, M. Determinants of finger choice in piano sight-reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 1 (1998), 185.
- 63 Smith, J.B.L., Burgoyne, J.A., Fujinaga, I., De Roure, D., and Downie, J.S. Design and creation of a large-scale database of structural annotations. *Proc. of ISMIR,(Miami, USA)* (2011).
- 64 Sordo, Mohamed. *Semantic Annotation of Music Collections: A Computational Approach*. Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, 2011.
- 65 Tarasti, Eero. *La musique et les signes: précis de sémiotique musicale*.
- 66 Tchounikine, Pierre. *Computer Science and Educational Software design, A Resource for Multidisciplinary Work in Technology Enhanced Learning*. Springer-Verlag Berlin Heideberg, 2011.
- 67 Thielemann, H. Untangling Phase and Time in Monophonic Sounds. *arXiv preprint arXiv:0911.5171* (2009).
- 68 Wanderley, M. M. *Les Nouveaux Gestes de la Musique*. IRCAM, 1997.
- 69 Winget, M.A. Annotations on musical scores by performing musicians: Collaborative models, interactive methods, and music digital library tool development. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 59, 12 (2008), 1878-1897.
- 70 Zacklad, Manuel. Introduction aux ontologies sémiotiques dans le Web Socio Sémantique. In *Actes de la conférence Ingénierie des Connaissances* (Nice 2005).
- 71 Zacklad, Manuel, Cahier, Jean-Pierre, Bénel, Aurélien, Lejeune, Christophe, and Zhou, Chao. Hypertopic: une métasémiotique et un protocole pour le Web socio-sémantique. In *Actes des 18eme journées francophones d'ingénierie des connaissances (IC2007)* ( 2007), 217-228.

# Table des Figures

Figure 1 : Cas d'école de partage de savoir-faire en musique. ....	8
Figure 2 : Organisation des chapitres de la thèse. ....	11
Figure 3: Relations entre donnée, information, connaissance et savoir-faire. ....	13
Figure 4 : Cycle des quintes. ....	16
Figure 5 : Représentation des douze degrés sur un clavier de piano. ....	17
Figure 6. Structure d'une partition musicale pour piano ....	17
Figure 7 : les acteurs de la pratique musicale et leurs rôles ....	20
Figure 8 : processus d'apprentissage d'un instrument de musique. ....	23
Figure 9: Déroulement de l'étude d'une pièce en piano. ....	24
Figure 10 : Acquisition d'un son en informatique ....	26
Figure 11 : Echantillonnage d'une onde sonore. ....	27
Figure 12 : Extrait d'un fichier MusicXML et représentation SVG associée ....	30
Figure 13 : Exemple de partition au format ABC notation ....	31
Figure 14 : Exemple de structures relevées sur une partition de Schumann ....	34
Figure 15 : Motifs répétés sur une partition ....	34
Figure 16 : Exemple de doigté non intuitif pour une note répétée au piano ....	35
Figure 17 : Exemple de table de coûts pour la détermination automatique de doigtés ....	36
Figure 18 : typologie des logiciels utilisés dans les conservatoire français. ....	39
Figure 19 : interface d'étude d'une pièce du DVD e-guitare ....	44
Figure 20 : développement itératif d'un service de e-Learning instrumental à l'Université de La Réunion ....	45
Figure 21 : extrait d'un DVD d'apprentissage du tin whistle. ....	46
Figure 22: interface de l'application Songs2See. ....	46
Figure 23 : interprétation iPerform3D réalisée par motion ....	47
Figure 24 : Capture d'écran du jeu Rocksmith. ....	47
Figure 25 : interface de la plateforme FIGS. ....	48
Figure 26 : Exemple de discussion sur un doigté sur le forum humeur-piano.com. ....	48
Figure 27 : enregistrement d'une interprétation sur iScore ....	50
Figure 28 : intégration d'une partition NoteFlight à Moodle. ....	50
Figure 29 : Extrait d'une partition animée réalisée avec iAnalyse ....	52
Figure 30 : Interface de création de partitions augmentées et interactives de INScore. ....	52
Figure 31 : Exemple de partition annotée par un professeur de piano ....	54
Figure 32 : Composants d'une annotation numérique. ....	56
Figure 33 : Exemple d'utilisation de l'Open Annotation Ontology. ....	57
Figure 34 : Interface d'annotation de partitions du projet Neuma ....	59
Figure 35 : Interface d'annotation de LiveScore Annotator. ....	59
Figure 36 : Exemples de tracés pour lesquels la portée la plus proche n'est pas celle qui correspond aux événements manifestement concernés. ....	60
Figure 37 : Interface de l'outil d'annotation de Tonara sur iPad. ....	60
Figure 38 : Exemple de décomposition du Signe en signifiant, signifié et référent. ....	65
Figure 39 : Relation entre Signe, Interprétation et Connaissance ....	69
Figure 40: Représentation tétraédrique du signe ....	69
Figure 41: Relations entre donnée, information, connaissance, savoir-faire et signe ....	71
Figure 42 : Processus de Signification. ....	72

Figure 43 : Comparaison des entités SI et Document sur un exemple. ....	75
Figure 44 : Diagramme de classe UML de l'outil HyperTopic et exemple d'application sur un programme de valorisation de projets R&D. ....	76
Figure 45 : Identification de Connaissances et de SI dans une discussion portant sur l'étude d'une pièce en piano .....	78
Figure 46 : Identification de Connaissances et de SI dans une discussion portant sur l'étude d'un tableau.....	79
Figure 47: Représentation tétraédrique du SI Numérique .....	82
Figure 48 : Exemples de SIN en musique et en peinture. ....	83
Figure 49 : Implémentation du SIN sous forme d'annotation de documents.....	85
Figure 50 : Schéma de classes de l'annotation sémiotique d'œuvres. ....	88
Figure 51 : Schéma de classes : relations entre annotations sémiotiques. ....	90
Figure 52 : Construction itérative d'un modèle descriptif .....	91
Figure 53 : Modèle de Signe Interprétatif Musical.....	94
Figure 54 : Interface de cours de l'application e-Piano. Le cadre rouge sur la partition désigne la partie expliquée par le professeur. Le menu de droite permet de sélectionner une partie du cours. ....	96
Figure 55 : Modèle tétraédrique du Signe Interprétatif Musical. ....	99
Figure 56 : Lien entre SIM et annotation sémiotique de partitions musicales. ....	100
Figure 57 : Modèle descriptif générique d'une pièce de musique.....	105
Figure 58 : Description de la comptine Frère Jacques. ....	106
Figure 59 : Description de la comptine Frère Jacques en canon.....	107
Figure 60 : Description de la Petite Plaisanterie de Kabalevski. Représentation sous forme d'écrans successifs et annotations. ....	108
Figure 61 : Description de la Fugue BWV 846 de J.S. Bach .....	109
Figure 62 : Organisation et rôles des ontologies musicales MO, MFSO et MPO. ....	110
Figure 63 : Schéma de classes : annotation sémiotique d'œuvres musicales. ....	111
Figure 64 : Schéma de Classes de l'Ontologie des Formes et Structures Musicales (MFSO). ....	112
Figure 65 : Analyse d'un cours de piano : extraction et classification des unités linguistiques significatives. ....	113
Figure 66 : Schéma de classes : Music Performance Ontology (MPO).....	115
Figure 67 : Exemple d'utilisation de la MPO via l'annotation sémiotique d'une pièce. ....	116
Figure 68: architecture générale d'une Base de Signes. ....	121
Figure 70 : Emergence et comparaison de notions de savoir-faire. ....	127
Figure 71 : Algorithme d'annotation semi-automatique d'objets. ....	131
Figure 72 : Méthodologie de modélisation d'un critère de difficulté pour l'analyse automatique de documents.....	132
Figure 73 : Recherche de difficultés sur un document de référence.....	133
Figure 74 : Comparaison d'architectures d'applications de e-Learning instrumental. ....	137
Figure 75 : Recherche des grandes parties d'une œuvre musicale.....	139
Figure 76 : Génération d'exercices à partir de structures musicales prédéterminées : exemple de l'arpège.....	141
Figure 77 : Explicitation contextuelle de symboles musicaux.....	141
Figure 78 : Diagramme d'actions du prototype @-MUSE. ....	154
Figure 79 : Composants d'une annotation sémiotique dans @-MUSE. ....	154
Figure 80 : Cas d'utilisation d'@-MUSE à l'aide de captures d'écran de l'application.....	155
Figure 81 : Saisie d'un tracé dans @-MUSE.....	156
Figure 82 : Capture d'écran du prototype Score Analyzer. ....	160

Figure 83 : Comparaison de différentes sources d'estimation du niveau de difficulté de pièces pour piano.....	161
Figure 84 : Test de Student (comparaison de moyennes) sur les trois classes identifiées au sein du corpus de Score Analyzer v1. ....	162

# Liste des Publications

Articles dans des journaux internationaux à comité de lecture :

- **V. Sébastien**, D. Sébastien, N. Conruyt, « Constituting a Musical Sign Base through Score Analysis and Annotation », International Journal On Advances in Networks and Services, No 3&4, pp. 386-398, 2011. ([Paper](#))

Articles dans des actes de conférences internationales à comité de lecture :

- **V. Sébastien**, D. Sébastien, N. Conruyt, « Annotating works for music education: propositions for a musical forms and structures ontology and a musical performance ontology ». 14th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2013, à paraître.
- **V. Sébastien**, H. Ralambondrainy, O. Sébastien, N. Conruyt, « Score Analyzer: Automatically Determining Scores Difficulty Level for Instrumental e-Learning », 13th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2012, October 8-12, Porto, Portugal, 2012. (**Best Student Paper Award**). ([Paper](#))
- **V. Sébastien**, N. Conruyt, O. Sébastien, « Score Analyzer: Extracting Performance Information for Instrumental e-Learning », 15th International Conference on Interactive Computer Aided Learning, ICL 2012, September 26-28, Villach, Austria, 2012.
- **V. Sébastien**, P. Sébastien, N. Conruyt, « @-MUSE: Sharing Musical Know-how Through Mobile Devices Interfaces », 5th Conference on e-Learning Excellence in the Middle East, Dubaï, 2012. ([Paper](#))
- **V. Sébastien**, D. Sébastien, N. Conruyt, « Dynamic Music Lessons on a Collaborative Score Annotation Platform », The Sixth International Conference on Internet and Web Applications and Services, St. Maarten, 2011. (**Best Paper Award**). ([Paper](#))
- N. Conruyt, **V. Sébastien**, O. Sébastien, « Transmitting and Sharing Know-How through Sign Management: an Application to Semiotic Annotation of Music Pieces », 4th Conference on e-Learning Excellence in the Middle East, Dubaï, 2011.
- N. Conruyt, O. Sébastien, **V. Sébastien**, « Living Lab in practice : the case of Reunion Creativity Platform for Instrumental e-Learning », 13th International Conference on Interactive Computer Aided Learning, ICL 2010, September 15-17, Hasselt, Belgium, 2010.
- **V. Sébastien**, D. Sébastien, and N. Conruyt, « An Ontology for Musical Performances Analysis. Application to a collaborative platform dedicated to instrumental practice », The Fifth International Conference on Internet and Web Applications and Services, Barcelona, 2010. ([Paper](#))
- N. Conruyt, O. Sébastien, **V. Sébastien**, D. Sébastien, D. Grosser, S. Calderoni, D. Hoarau, P. Sida, « From Knowledge to Sign Management on a Creativity Platform, Application to Instrumental E-learning », 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies, DEST 2010, April 13-16, Dubaï, UAE, 2010.
- **V. Sébastien**, D. Sébastien, and N. Conruyt, « A collaborative platform model for digital scores annotation », 3rd Annual Forum on e-Learning Excellence in the Middle East, Dubaï, 2010.

Articles dans des actes de congrès nationaux à comité de lecture :

- **V. Sébastien**, « Préservation et transmission du patrimoine culturel par l'usage d'outils numériques », Forum des Jeunes Chercheurs, Université de La Réunion, 2010. (**Prix de la meilleure présentation**).
- **V. Sébastien**, D. Sébastien, and N. Conruyt, « Contribution à l'élaboration d'un modèle de plateforme collaborative d'annotation multimédia de partitions musicales numériques », Convergence des Réseaux, de l'Informatique, et du Multimédia pour les E-Services, CRIMES09, Saint-Denis de La Réunion, 2009. ([Paper](#))

Articles dans des actes d'ateliers de conférences internationales à comité de lecture :

- N. Conruyt, **V. Sébastien**, O. Sébastien, D. Grosser, D. Sébastien, « From Knowledge transmission to Sign sharing: Semiotic Web as a new paradigm for Teaching and Learning in the Future Internet », In 20th European Conference on Artificial Intelligence and 1st International Workshop on Artificial Intelligence for Knowledge Management, AI4KM'2012, ECAI'2012, Montpellier, France, 2012.



# Annexe A : Typologie des Signes Musicaux

Type de Signe Musical	Définition	Usage général	Exemples de couples (signifiant/signifié)	Exemples d'œuvres caractéristiques
<b>Timbre musical</b>	Le timbre est ce qui distingue entre eux deux sons de même hauteur et de même intensité (source : Encyclopédie Universalis). Il se rapporte à un instrument de musique ou une voix. C'est sa "couleur" au sens acoustique (forme d'onde).	Donne une couleur à une œuvre. Peut évoquer un personnage, une personnalité. Pour un même instrument, diverses techniques permettent de modifier le timbre et produire ainsi des effets musicaux variés. Des alliances d'instruments peuvent également créer de nouveaux timbres.	(flute / oiseau, stridence), (basson / personnage imposant, humour), (hautbois / chaleur, rondeur, nature), (harpe / onirisme, nostalgie, cristal), (violoncelle / chant, voix humaine)	Dans le conte musical <i>Pierre et le Loup</i> de Prokofiev, les instruments représentent les personnages apparaissant sur la scène et dialoguant entre eux. L'usage d'instruments "ethniques" (sitar, shakushi, tabla, bouzouki, cornemuse, vielle à roue, etc.) dans une œuvre occidentale lui donnent une couleur "exotique".
<b>Registre</b>	On appelle registre, dans toute l'étendue d'une voix ou d'un instrument, les zones caractéristiques correspondant à un certain type de sonorité : ainsi, on distingue généralement les registres grave, médium et aigu d'un instrument ou d'une voix. (source : Dictionnaire Larousse)	Sur un même instrument, l'emploi de différents registres peut suggérer différents caractères ou personnages. Les accompagnements sont généralement dans le registre médium-grave, et les mélodies dans le médium-aigu.	(registre aigu / jeunesse, innocence, féminité, stridence), (registre grave / soutien, sérieux, masculin)	Les Opéras jouent beaucoup sur les registres vocaux des personnages pour suggérer leurs caractères. La célèbre <i>Marche Funèbre</i> de Chopin débute dans un registre très grave, avec un rythme de marche lent et insistant, créant une atmosphère particulièrement noire et accablante.
<b>Articulation</b>	L'articulation caractérise la transition entre les notes. Ces dernières peuvent principalement être liées (notes tenues) ou détachées (notes séparées). On compte également les respirations (coupure et élan entre deux phrases), inspirées des techniques vocales, les accents et le staccato (notes piquées). L'articulation est lié à l'attaque et à la tenue des notes. (source : Encyclopédie Universalis)	Sert à modeler une phrase, lui donner vie dans son ensemble en cela de la diction. C'est une variable interprétative essentielle, mais elle n'est pas toujours indiquée sur la partition.	(pizzicato / légèreté), (légato / chant, phrase, suivi), (accent / appui, marquage rythmique, insistance)	La <i>Danse des Mirlitons</i> du ballet Casse-Noisette de Tchaïkovsky utilise les pizzicati sur plusieurs instruments. Articulations et ornements sont utilisés de concert pour animer les mélodies espagnoles d'Albeniz (exemple : ligne mélodique d' <i>El Puerto</i> de la suite <i>Iberia</i> ).
<b>Ornement</b>	L'ornement est une variation que l'on ajoute à une phrase musicale donnée avec l'intention de l'embellir (source : Encyclopédie Universalis). Au-delà de l'embellissement, l'ornementation modèle véritablement un thème, si bien qu'il en est souvent indissociable.	Sert tout à tour à embellir une phrase, insister sur un élément, prolonger une note (clavecin) ou effectuer des transitions entre des motifs. Certains ornements sont laissés libres à l'interprète, notamment dans la musique folklorique et le jazz.	(appoggiature / passage, intermédiaire, attente), (mordant / accent, vibration), (arpègement / étalement, fluidité), (vibrato / émotion, tenue, longueur, vibration), (tremolo violon / fébrilité, tristesse), (trille / vibration), (arpège / transition), (gamme / transition), (glissando / glissement, chute, ascension, effet brillant).	La mélodie de l' <i>Adagietto</i> de la <i>5ème Symphonie</i> de Mahler est modelée par de nombreuses appoggiatures. Messiaen créé des vibrations à l'aide de tremolos pour évoquer des oiseaux. Les compositeurs « impressionnistes » utilisent souvent des effets à base d'arpèges ou de gammes pour suggérer les éléments de la nature ( <i>Jeux d'Eaux</i> de Ravel, <i>Jardins sous la pluie</i> de Debussy).
<b>Formes musicales</b>	La forme désigne la manière générale de construire une œuvre. Elle ne doit pas être confondue avec la structure, qui désigne plutôt les motifs et les thèmes sous-jacents. La forme est un "tout" et a des implications sur l'instrumentation et les différentes parties de l'œuvre. (source : Encyclopédie Universalis). Les formes courantes de la musique classique (Sonate, Concerto, Symphonie) sont issues des Suites de l'époque baroque.	Ancre la composition dans la culture et l'histoire, donne des indications sur la structure, l'instrumentation et la complexité de l'œuvre.	(concerto / instrument soliste, 3 mouvements), (sonate / piano, 3 mouvements)	Maurice Ravel a fait plusieurs hommages aux musiques françaises anciennes en utilisant leurs formes et structures caractéristiques ( <i>Menuet Antique</i> , <i>Pavane pour une Infante Défunte</i> , <i>Le Tombeau de Couperin</i> ). Elles sont parfois regroupées en suites ( <i>Suite Bergamasque</i> chez Debussy, <i>Suite du Tombeau de Couperin</i> chez Ravel). Certains compositeurs modifient les formes usuelles (exemple : <i>Symphonie Inachevée</i> de Schubert, dernières Sonates de Beethoven, où l'on retrouve des Fugues).

<p><b>Harmonie, Modes et Tonalités</b></p>	<p><b>Harmonie</b> : science des accords entendus verticalement, c'est-à-dire dans leur sonorité globale, ainsi que de leurs enchaînements.  <b>Mode</b> : répartition d'intervalles, le plus souvent le ton et le demi-ton, dans une gamme. On utilise le plus souvent les modes mineur et majeur.  <b>Tonalité</b> : ton principal de référence d'un morceau. (source : Dictionnaire Larousse de la Musique).</p>	<p>Ces trois éléments posent la couleur de l'œuvre et jouent un rôle important dans la transmission d'émotions. Ils ont en commun de se référer à la hauteur des sons plutôt qu'à leur durée même s'ils désignent bien des caractères musicaux distincts. L'harmonie a une forte valeur culturelle (on « s'habitue » à entendre des suites d'accords).</p>	<p>(passage de mineur à majeur / ouverture, lumière), (cadence parfaite / conclusion, achèvement), (cadence rompue / attente, question), (modulation / transition, changement de couleur), (dissonance / frottement, jeu, cri)</p>	<p>Les compositeurs utilisent régulièrement des modes spécifiques pour suggérer l'exotisme (les <i>Contes de Ma Mère L'Oye</i> de Ravel, <i>Danse arabe</i> dans le <i>Casse-Noisette</i> de Tchaïkovski, <i>Suite Espagnole</i> d'Albéniz). Les changements de mode de mineur à majeur évoquent souvent un effet de lumière (tierce picarde chez Bach, fin d'<i>Une Nuit sur le Mont Chauve</i> de Moussorgski). Dans l'Opéra, Monteverdi propose une approche harmonique et polyphonique originale par rapport aux canons de la Renaissance. Les compositeurs modernes (Debussy, Ravel, Stravinsky, Albeniz) sont aussi reconnus pour leurs innovations harmoniques. Mais les plus novateurs restent sans doute les compositeurs contemporains (Schönberg, Messiaen, Dutilleul, Boulez, Cage) s'affranchissant régulièrement du système tonal (exemple : musique sérielle). Certains compositeurs ont des tonalités de prédilection (Ut mineur pour Mozart, Mi majeur pour Bach, etc.).</p>
<p><b>Rythme, Formule rythmique, Mesure, Tempo</b></p>	<p><b>Rythme</b> : Ordonnance des sons dans le temps selon des proportions accessibles à la perception, fondées sur la succession de leurs durées et l'alternance de leurs points d'appui.  <b>Formule rythmique</b> : motif rythmique caractéristique (exemple: danses)  <b>Mesure</b> : Retour d'un temps fort à interval régulier. Donne lieu à métriques usuelles (2/4, 4/4, 6/8, etc.)  <b>Tempo</b> : terme qui désigne la plus ou moins grande rapidité d'exécution. (source : Dictionnaire Larousse de la Musique)</p>	<p>On s'intéresse ici à la dimension temporelle de l'œuvre musicale. Elle suggère tantôt la stabilité et la régularité (rythmes réguliers, points d'appui sur les temps), tantôt l'instabilité et le déséquilibre (contretemps, changements de mesure, mesures irrégulières, rythmes saccadés). Le rythme est particulièrement affecté par le tempo (un rythme n'aura pas du tout le même caractère, selon qu'il soit joué à un tempo lent ou bien à un tempo rapide).</p>	<p>(pulsation lourde et appuyée / battements du cœur), (rythmes ternaires soulignés / danses), (valeurs décalées entre les mains / fluidité, poésie, instabilité), (mazurka, sicilienne, tarentelle, polka / danse folklorique, rythmée)</p>	<p>Les rythmes binaires des marches militaires renvoient à l'ordre et la discipline martiale (<i>Marche Militaire</i> de Schubert), mais peuvent être détournés pour évoquer la violence et le traumatisme de la guerre (1<sup>er</sup> mouvement du <i>Concerto pour la Main Gauche</i> de Ravel). Les Rhapsodies Hongroise de Liszt sont un hommage aux musiques traditionnelles de son pays natal. Elles intègrent des structures rythmiques et des sonorités de la musique tzigane. Le Sacre du Printemps de Stravinsky repose sur des rythmes mouvants et asymétriques novateurs aux interprétations multiples.</p>
<p><b>Motif</b></p>	<p>Un motif est un thème se répétant de façon régulière et continue au sein d'une œuvre. Il peut apparaître sous des formes très différentes (développement, inversion, réponse, etc.). Le leitmotiv est un court motif mélodique, harmonique ou rythmique, très caractérisé, servant à illustrer ou à individualiser, au cours d'un drame lyrique, un personnage, une idée ou un sentiment. (source : Encyclopédie Universalis)</p>	<p>Sert à marquer une idée ou un personnage récurrent. Un motif peut intervenir à différents moments de la pièce, à différents instruments, et avec des variantes.</p>	<p>(leitmotiv / idée obstinante), (motif / rappel, thème), (formule rythmique répétée / danse), (sujet de fugue / idée développée).</p>	<p>Certains voient dans le motif répété de la 5<sup>ème</sup> <i>Symphonie</i> de Beethoven le destin frappant à la porte. Ce motif se retrouve d'ailleurs dans ses autres compositions (exemple : <i>Hymne à la Joie</i>). Dans ses œuvres orchestrales, Debussy utilise également régulièrement des motifs. Wagner est l'inventeur du leitmotiv (exemples : Les thèmes du Valhalla, de l'épée, de la Walkyrie ou de Siegfried dans <i>L'Anneau du Nibelung</i>).</p>
<p><b>Accompagnement</b></p>	<p>Structure rythmique et harmonique régulière servant à accompagner une mélodie. Il est usuellement au second plan par rapport au thème (source : Encyclopédie Universalis).</p>	<p>L'accompagnement fourni une trame de base à la mélodie. Il sert ainsi souvent à réaliser l'harmonie. Cependant, dans certains cas, l'accompagnement a autant d'importance que la mélodie (ex: Lieds de Schubert), ou se confond avec celle-ci (ex: <i>Valenciana</i> dans la <i>Suite Espagnole</i> de Granados).</p>	<p>(basse + 2 accords en 3/4 / valse), (ostinato / insistance, obstination, inquiétude)</p>	<p>Les chansons populaires actuelles ne se conçoivent pas sans un accompagnement. Il est régulièrement dévolu à la guitare et à la basse, dans une moindre mesure au piano, la rythmique étant assurée par la batterie. Certains accompagnements sont caractéristiques d'un genre, d'une époque ou d'un compositeur (exemple : Mozart et la basse d'Alberti, la rythmique d'accompagnement "shuffle" du blues, la structure rythmique de la basse du habanera, etc.).</p>

<b>Thème</b>	Mélodie principale, constituée de plusieurs phrases.	Le thème est ce que l'on retient de l'œuvre quand on l'entend la première fois. C'est donc le message principal que véhicule le compositeur. Tous les autres Signes Musicaux sont donc là pour le servir. Il peut exprimer une partie d'un récit, ou un paysage.	(thème / paysage, narration, présentation, sentiment, fil conducteur)	Presques toutes les musiques exposent des thèmes. Les Sonates sont fondées sur deux thèmes principaux complémentaires, exposés puis développés. Les musiques de films notamment utilisent des thèmes pour servir des situations ou évoquer des personnages.
<b>Dynamiques</b>	Evolution progressive dans le temps du tempo ou de l'intensité sonore.	Les compositeurs peuvent contrôler deux principales dynamiques : le volume et le tempo. L'augmentation ou la diminution progressive de ces paramètres peut suggérer la tension ou au contraire l'apaisement.	(crescendo / apogée, accomplissement, exultation, grandissement), (ralentissement / essoufflement, apaisement, conclusion), (rubato / romantisme, détachement, élan).	Le <i>Boléro</i> de Ravel est célèbre pour son crescendo orchestral étalé sur environ 15 minutes, aboutissant à une modulation et une coda brillante. Le rubato est souvent associé à la musique romantique (Chopin, Liszt, Brahms). Dans la musique de variété, on retrouve le "fade-out" permettant de terminer le morceau par une diminution progressive du volume sur une phrase répétée.

## Annexe B : Transcription d'un cours de piano

1 « Nous allons étudier *Espièglerie* de Kabalevski. On essaiera, même dans le travail  
2 d'apprentissage, d'y mettre l'esprit amusant et enjoué de cette petite œuvre. Tout le long du  
3 morceau, on va trouver des enchaînements de quintes. Il y a plusieurs parties dans le morceau  
4 au niveau de l'apprentissage du texte, la première partie où la main gauche (MG) et la main  
5 droite (MD) ont les mêmes notes, à savoir deux quintes (joue). Pour la MD on développera  
6 toutes les notes, mais pour apprendre les notes rapidement, on va d'abord jouer ces quintes  
7 enchaînées comme ça (joue). On prendra garde de bien mettre le doigté 2-5 à la MG qui  
8 permettra d'avoir un détaché beaucoup plus léger, beaucoup plus vivant. Voilà ce que ça donne  
9 (joue)...ici c'est ensemble (joue toujours). Voilà, c'est la 1ère partie. Il faut savoir jouer  
10 ça assez rapidement, tout de suite avec les nuances. Là j'ai montré lentement. Ça ne doit pas  
11 être un problème en répétant 3-4 fois d'obtenir ça (joue au tempo et avec les nuances). Il  
12 faut que ça passe tout à fait naturellement, voire le plus vite possible par cœur, car c'est  
13 assez difficile de se déplacer sur le clavier et regarder la partition en même temps. »

14 « Ensuite on développera la MD en faisant très attention au rythme (joue lentement en  
15 développant la MD). Chaque doigt de MD sera également enfoncé, on détendra bien les doigts  
16 supérieurs en allant vers le pouce et on remontera le poignet à la fin de chaque groupe  
17 (montre que la MD lentement en insistant sur le geste). Et la MG sera quant à elle vraiment  
18 pincée, comme s'il s'agissait de pizzicato sur un instrument à corde, assez sec. Dans le  
19 travail, on aura d'abord un son un peu au-dessus de ce qu'il faudrait, c'est normal dans un  
20 premier temps. »

21 « Pour la 2<sup>ème</sup> partie qui commence ici (montre la partition), on verra plus un travail  
22 harmonique (joue les accords). Et on pourra travailler de la même manière, c'est à dire faire  
23 les 2 croches détachées, même si le motif s'inverse (on fait les triples à la main gauche). On  
24 peut tout de suite travailler ça (joue les croches inversées). Donc musicalement on a « la mi  
25 si mi », puis on repart (joue). Il faut bien apprendre ça. Ensuite les groupes de MG, avec un  
26 petit fa dièse qui vient compliquer la donne. Même chose, on prend les notes de près et on  
27 remonte le poignet sur la fin (joue). Pour le dernier groupe « si do ré mi fa # » je conseille  
28 le doigté 43212 qui est beaucoup plus facile à faire que celui-là où on est un peu coincé dans  
29 les touches. Pour les petits c'est certainement plus facile. Donc pareil pour la suite  
30 (joue). »

31 « Ensuite il y a les 2 passages avec les croches (joue) qui sont assez difficiles  
32 d'apprentissages. On fera un 1er travail en jouant mains séparées les intervalles ensemble  
33 (joue). Donc à la MG « do-sol » et « fa#-la », sur lesquels je ne mets pas le doigté indiqué  
34 mais « 5-2 » et « 3-1 ». Donc on répète bien ça. Ensuite on répète en détachant (joue).  
35 Ensuite 4 par 4 (joue). Toujours avec ce détaché pizzicato. Et puis on essaie d'enchaîner  
36 assez soutenu, puisque ce sera fort. Même travail à la MD: « mib-sib » ensemble, puis « ré-  
37 la » (joue). On peut même travailler l'enchaînement des doubles-notes, ça prépare les doigts à  
38 travailler. Puis ça (doubles notes suivantes). Ensuite on les enchaîne. Ensuite on peut  
39 répéter ça (détache), puis par 4. En respectant bien le doigté tout le temps !! On enchaîne.  
40 On fait le même travail les 2 mains ensemble. Si l'élève a du mal, on peut répéter mains  
41 ensembles lentement, suivant la même décomposition que montrée main séparées.

42 « Toujours se placer à l'avance quand on travaille des choses avec des déplacements. »

43 « Bien faire sentir à l'élève les fausses notes, ne pas en avoir peur, c'est pour s'amuser. »

44 « Prendre l'habitude de compter (compte sur le rythme). »

45 « Si ça c'est mi-fort, comment je vais faire mon son piano ? Chercher comparativement les  
46 nuances. »

47 « On pensera SI-MI...la-ré (joue avec un crescendo du si au mi, et un decrescendo du la au ré.  
48 Chante le nom des notes avec la bonne intonation en plus du jeu au piano). »

N.B. : les textes entre parenthèses sont des notes de transcription et n'ont pas été prononcées par le professeur.