

Comparaison formelle de modèles temporels pour la perception musicale

Jean-Philippe Prost

sous la direction de V. Risch

24 juin 1997

Résumé

Le but des recherches dans lesquelles s'insère ce travail est de proposer, à terme, un cadre formel de représentation et de manipulation de connaissances musicales. Établir un modèle de perception devrait permettre de simuler le comportement auditif d'un agent en situation d'écoute, et conduire à l'élaboration d'une représentation « intelligente » d'une oeuvre musicale. En particulier, nous utilisons ici des résultats issus des sciences cognitives pour tenter de caractériser l'intervention du temps dans la perception musicale ; l'objectif de notre travail est donc d'amorcer une comparaison formelle entre différents modèles de logique temporelle. Un premier état de l'art nous a conduit à porter une attention plus particulière sur plusieurs formalismes ; compte-tenu qu'il semble n'en exister aucun qui satisfasse toutes nos exigences, nous avons été amenés à proposer que soit défini un langage intermédiaire entre tous. Les premiers résultats que nous présentons ici concernent une logique temporelle basée sur un raisonnement par intervalle, où les treize opérateurs mis en évidence par Allen sont ramenés aux deux seules opérations de succession et de superposition. Les conditions d'un recalage de notre travail dans le contexte de la théorie étendue d'Allen-Hayes sont envisagées parmi les perspectives. Enfin un autre aspect de ce mémoire concerne l'implémentation possible d'un tel modèle.

Table des matières

1 Bases cognitives musicales	4
1.1 Dimension porteuse de forme	4
1.1.1 Terminologie	4
1.1.2 Lois cognitives	5
1.2 Le Temps et la perception musicale	6
1.2.1 Dynamique de l'écoute	6
1.2.2 Perception du temps : caractéristiques et propriétés	6
2 Modèles et formalismes étudiés	7
2.1 Description	7
2.1.1 Shoham ([Sho88])	7
2.1.1.1 Logique classique temporelle par intervalle (CT)	7
2.1.1.2 Logique modale temporelle par intervalle (Mod)	8
2.1.1.3 Logique modale monotone de connaissance temporelle (TK)	8
2.1.1.4 Logique non-monotone de connaissance temporelle (CI)	9
2.1.2 Balaban et Murray ([BM88, BM89])	9
2.1.2.1 Le langage des structures temporelles (TS)	9
2.1.2.2 Simulation des logiques temporelles par intervalle de Shoham, dans la logique des structures temporelles	10
2.1.2.3 Limites	13
2.1.3 Allen ([AK85])	13
2.1.4 Vecchione ([Vec88])	13
2.1.5 Chemillier ([Che87b, Che87a])	14
2.1.6 Wiggins et <i>al.</i> ([WHS88])	14
2.2 Comparaison informelle	15
2.2.1 Considérations générales	15
2.2.2 Bilan des modèles	15
3 Vers une définition formelle des critères cognitifs adoptés	16
3.1 Généralités	16
3.2 Le <i>cadre perceptif</i>	17
3.3 Restrictions cognitives : contraintes ontologiques	18
4 Quelques résultats	18
4.1 Symétries, transitivité	18
4.2 Un langage propositionnel	21
4.2.1 Syntaxe	21
4.2.2 Les opérateurs de succession et superposition	22
4.2.3 Axiomatique et schéma d'inférence	23
4.2.4 Algorithme de réduction à gauche en expression basique	24
5 Perspectives et conclusion	25
5.1 Un treillis des modèles	25
5.2 Vers un modèle de perception musicale	25
5.2.1 La Théorie étendue d'Allen-Hayes	25
5.2.2 De la non monotonie...	26

5.2.3 ... à « l'inférence causale » ? 26

Introduction

Lorsque l'informatique s'intéresse à un média de communication humain, elle dispose généralement de plusieurs modèles de représentation pour traiter l'information qui circule, suivant que le point de vue adopté est celui de l'émetteur, du récepteur voire du média lui-même. En matière de musique, seuls l'émetteur et le média ont fait l'objet de modélisation, tandis que l'auditeur semble laissé pour compte. Il conviendrait cependant aux musiciens, comme aux cognitiens et aux informaticiens, de pallier cette carence de la recherche informatique.

La présentation qui suit traduit la démarche adoptée en vue d'établir un modèle de représentation pour la perception musicale, à des fins de simulation. En particulier, nous nous attachons à caractériser l'intervention du temps dans un tel modèle. Avant tout il est primordial de fonder ce travail sur des notions de base, propres à la perception et l'interprétation de la musique, qui ont donné lieu à des résultats pratiques et théoriques des sciences cognitives. Ce sont ces bases que nous exposerons dans une première partie. Dans un deuxième temps, nous nous pencherons sur plusieurs langages et formalismes de logiques temporelles, afin d'en extraire leurs points communs, particularités et spécificités. Le but de cette comparaison est de pouvoir disposer d'une liste de propriétés que vérifie ou non un modèle temporel. Nous serons alors en mesure, dans une troisième partie, de traduire certains des critères cognitifs en critères formels de perception musicale. Une quatrième partie sera consacrée à la définition d'un « langage hybride », et aux premiers résultats qui l'accompagnent. Enfin nous évoquerons les voies de recherche envisagées à la suite de ce travail.

1 Bases cognitives musicales

Les travaux de [McA88, Del88b], et plus généralement ceux présentés dans [MD88], constituent les sources essentielles de cet exposé en matière de cognition musicale.

1.1 Dimension porteuse de forme

Les fondements cognitifs de notre étude s'articulent autour de la notion de *dimension porteuse de forme*, ou *dimension morphologique*. Elle permet de manipuler des *structures de connaissance abstraite*, organisées elle-mêmes en structure *événementielle* plus complexe. Après avoir détaillé quelques points importants de terminologie, nous exposerons les *lois cognitives* qui régissent l'acquisition de cette connaissance, et décrirons les processus intellectuels mis en œuvre. Nous pourrons alors nous concentrer sur *l'interprétation du temps* qui caractérise la perception musicale.

1.1.1 Terminologie

Nous ramenons l'ensemble des processus de perception à l'élaboration d'une *image mentale* du monde réel dans un *univers perceptif* (cf. [Pet88]) : il s'agit donc pour nous de donner une représentation formelle de cette image. Pour cela, nous distinguons deux niveaux d'interprétation :

- l'un qui consiste à *dénoter* les phénomènes du monde réel par des *événements musicaux*, et dont le but est de délimiter des *formes* en reconnaissant leurs *contours*,

- un second qui consiste à *organiser* les éléments dénotés selon des principes de *causalité* : c’est le processus d’élaboration *dynamique* qui conduit à reconnaître une œuvre musicale¹.

Une **forme** est la *représentation imagée*² (*i.e.* une “représentation mentale”), propre à un auditeur, d’une configuration possible d’autres formes reconnues, organisées, et encodées en une structure récurrente d’*événements musicaux*. Une forme de plus haut niveau porte le sens que l’auditeur donne à une pièce de musique.

Un **événement musical** est une succession de sons musicaux, produits par la source extérieure à laquelle s’intéresse l’auditeur, et perçus comme une unité. Les *événements musicaux* s’organisent donc dans l’*univers perceptif* en une forme musicale³, selon un ensemble de relations essentiellement centrées sur la *causalité*. C’est cette représentation imagée que décrit une *configuration d’événements*.

Une **dimension** correspond à un *continuum physique*, discrétisé pour les besoins de la perception. Ce continuum est ramené à une échelle de valeurs propres, discrètes ou tempérées, ordonnées ou pré-ordonnées. Ces valeurs sont organisées en structure dynamique de *catégories* d’événements et de relations entre ces événements. Une catégorie prend la forme d’un *schéma événementiel*⁴. Quatre dimensions prépondérantes ont fait l’objet de recherches plus particulières, en vue de spécifier leur propension à porter la forme : *Hauteur*, *Durée*, *Timbre*, et *Intensité*. À chacune d’elles correspond un type de relation entre ses composantes : *intervalles de hauteurs*, *vecteurs de timbres*, *proportions de durée*, et *variations d’intensité*. « Une dimension peut s’avérer *porteuse de forme* si des configurations de valeurs le long de cette dimension peuvent être encodées, organisées, reconnues et comparées avec d’autres configurations de même provenance. ([McA88, p. 258]) » Une *dimension* est donc *porteuse de forme* si elle peut donner lieu à interprétation, *i.e.* si elle permet à l’auditeur *d’identifier des formes musicales*.

1.1.2 Lois cognitives

L’**identification** d’objets ou événements perçus à une forme musicale s’opère selon un *critère de préférence*, basé essentiellement sur le fait que *le contraste entre éléments prévaut sur leur similitude* : elle nécessite donc de pouvoir établir entre eux un *degré de similitude* ou *de contraste*. La nature des groupements s’articule alors autour des deux principes du MÊME et du DIFFÉRENT ([Del88b, pp. 306–308]) : le principe du MÊME cimenter les structures qui constituent les groupements ; le principe du DIFFÉRENT les délimite. Les *lois cognitives* qui régissent les processus d’unification sont les suivantes :

1. Nous faisons ici allusion aux travaux de [Kun76] et [Rog97], que nous souhaitons pouvoir intégrer à notre modèle. Néanmoins, cet aspect d’ordre sémantique ne concerne pas directement l’objet de ce mémoire ; nous nous bornerons à la définition d’une terminologie adéquate, utile à la compréhension générale.

2. L’expression « *représentation imagée* » provient de [Duf88].

3. Consulter [McA88, Del88b, Duf88] pour plus de détails sur l’*encodage des données abstraites*.

4. Les processus de groupements auditifs élémentaires dont sont issus ces éléments sont d’ordre *segmentationnel*, *séquentiel* et *simultané* ; ils pré-organisent la « surface acoustique » en entités discrètes et groupes d’entités. Ces processus ne feront l’objet d’aucune étude particulière : le lecteur désireux d’approfondir le sujet peut se reporter à [MD88, McA88].

Loi 1 (d'assimilation) *Les processus d'unification traduisent une tendance à assimiler, au sein d'une même catégorie, des événements dont le degré de similitude autour d'une valeur de référence est relativement faible - ceci afin que le nombre de ces catégories soit minimisé.*

Loi 2 (des contrastes) *De façon duale et complémentaire à la loi d'assimilation, les contrastes perçus - le long de Dimensions Morphophoriques - entre événements auront tendance à être surestimés, et seront érigés en frontières entre différentes catégories.*

Par exemple, on observe que les groupes rythmiques sont délimités par des changements de registre, de volume, d'attaque, de timbre, etc., ou de modifications dans le débit des durées : on rejoint ainsi les principes de similitude et de proximité formalisés par Lerdhal et Jackendoff (1983).

À la lumière de ces lois, la *forme musicale* est assimilée à *l'émergence de son contour* : c'est en effet par lui et par lui uniquement que la forme existe et qu'elle est porteuse de sens.

1.2 Le Temps et la perception musicale

L'introduction de l'idée d'*émergence d'un contour* nous conduit à parler d'*interprétation dynamique* ainsi que de *schéma d'anticipation*, et par voie de conséquence à tirer les conclusions qui s'imposent quant à la nature de *l'interprétation du temps* qu'il nous faudra adopter.

1.2.1 Dynamique de l'écoute

L'interprétation dynamique constitue l'ensemble des processus mis en œuvre par l'auditeur pour établir et modifier les relations d'interaction entre formes musicales ; c'est le second niveau d'interprétation que nous avons abordé plus haut. Nous ne nous attardons pas sur ce point précis.

Le schéma d'anticipation représente la connaissance abstraite acquise au travers de l'expérience ; il est activé par les événements se présentant, et se manifeste par la formulation de *contraintes* sur les relations perçues entre formes musicales ([McA88, p. 265, 274 et suivantes]). La nature de ces relations est centrée sur la *causalité*, et conditionnée par des *mécanismes d'inférence* ([Duf88]) qui permettront la constitution d'un vocabulaire au fur et à mesure de l'écoute. Typiquement, la dynamique du discours est souvent liée à une *impression de mouvement dirigé* : une valeur donnée implique par anticipation sa succession par une autre, donnant naissance à des schémas de *tension* et *détente*, ou d'*implication* et *réalisation*.

1.2.2 Perception du temps : caractéristiques et propriétés

L'interprétation du temps, point crucial de notre étude, demande que soit explicité la différence qui est faite entre *temps universel* - physique -, et *temps musical*. En effet, tandis que l'essentiel des modèles de logiques temporelles partent du principe que c'est le temps qui informe la structure organisationnelle des états de faits, le point de vue que nous adoptons est différent : nous supposons ici que *ce sont les événements qui induisent l'interprétation du temps*. Ainsi nous distinguons l'interprétation du temps universel, indépendante de l'auditeur et de tout phénomène perceptif, et celle du *temps musical*, qui dépend de l'auditeur et des événements auditifs qu'il perçoit.

Ce temps musical n'est *pas inexorable*⁵, en ce sens qu'il autorise des "remontées dans le temps", des cycles, des fléchissements de la Base de Connaissance, etc. , à travers l'interprétation dynamique des événements. Il n'est pas *non plus inéluctable*⁶, puisqu'il procède d'un *schéma d'anticipation*.

Postulat 1 *En situation d'écoute, la dynamique - dans le référentiel Temps Universel - des différents niveaux d'interprétation d'une pièce de musique confère au temps musical une structure ramifiée, avec bifurcations vers le passé (via l'interprétation dynamique) et vers le futur (via les schémas d'anticipation).*

Une conséquence de ce postulat⁷ est que le temps musical ne permet pas qu'on lui associe une échelle graduée absolue (*i.e.* un ordre total sur un ensemble de valeurs), qui permettrait la mesure de la durée d'événements. De fait, la *Dimension Durée*⁸ ne pourra donc pas s'appuyer formellement sur une relation métrique numérique.

Dans ce qui suit nous omettrons le plus souvent de préciser sur quelle notion du temps porte notre discours ; nous supposons dans ce cas qu'il s'agit du *temps musical*.

2 Modèles et formalismes étudiés

2.1 Description

2.1.1 Shoham ([Sho88])

2.1.1.1 Logique classique temporelle par intervalle (CT)

Le formalisme utilise un cadre propositionnel (*it.* pour le 1er ordre). Une fbf⁹ de base est une paire (i, p) où i est une paire de dates (t_1, t_2) (intervalle temporel), et p un symbole propositionnel ; elle est notée $\text{TRUE}(t_1, t_2, p)$ (*logique réifiée*¹⁰). L'ensemble des objets temporels (dates) est muni d'une relation d'ordre partiel, notée \preceq , marquant la précédence (e.g., $t_1 = t_2$ et $t_1 \preceq t_2$ sont des fbf). La sémantique établit qu'une formule $\text{TRUE}(t_1, t_2, p)$ est *vraie* si la proposition p est *vraie* sur l'intervalle (t_1, t_2) .

L'ontologie¹¹ établit une classification des propositions, suivant les propriétés qui caractérisent leur comportement temporel. Ces propriétés concernent la spécification de la valeur de

5. *inexorable* : se dit de ce qui ne peut être fléchi.

6. *inéluctable* : se dit de ce qui ne peut être évité.

7. À ce sujet, Livet entretient dans [Liv] une discussion largement philosophique, autour de la distinction entre *temps physique* et *temps musical* - ramifié vers le passé et le futur. Il cherche à déterminer une axiomatique adéquate aux choix perceptifs effectués par l'auditeur, dans le cadre d'une logique modale temporelle à deux opérateurs (G et F). Il en arrive à la conclusion que les systèmes (S4), (S4.2) et (S5) permettent, à tour de rôle, de supporter les différents types de raisonnement que l'auditeur peut adopter lorsqu'il est placé en situation d'écoute. McDermott (référéncé dans [Mar88]) pour sa part, ramène le temps à un *arbre d'états*, où un état correspond à une date ; un *intervalle* est alors défini entre deux états. La *ramification du temps* n'est possible que vers le futur.

8. Nous convenons de la notation *Dimension Morphophorique*, ceci afin de distinguer la *Durée* d'un événement - vue comme une valeur le long de la *Dimension Durée* -, de sa durée - mesure d'un intervalle de temps.

9. Notation communément admise pour "formule bien formée"...

10. *i.e.* où les assertions apparaissent comme arguments d'un prédicat tel que TRUE ([Sho88, p. 38])

11. **L'ontologie** est la *connaissance de ce qui est*. En l'occurrence, il s'agit de caractériser les différents types de comportement temporel.

vérité d'un prédicat sur un intervalle de temps, relativement à sa valeur de vérité sur d'autres intervalles. Par exemple, une proposition est dite *héréditaire vers le bas*, si lorsqu'elle porte sur un intervalle de temps, alors elle porte également sur chacun des sous-intervalles, exception faite éventuellement des deux extrémités. Elle permet ainsi, notamment, de tenir compte des propriétés de *localité* (ou *homogénéité*) d'une proposition sur un intervalle : une proposition qui est *vraie* sur un intervalle ne l'est pas forcément en chacun des *instants* qui le constitue. Inversement une proposition vérifiée sur deux intervalles distincts et consécutifs peut l'être également, ou non, sur l'unique intervalle résultant de la concaténation des deux. L'ontologie proposée, à travers dix définitions, offre une plus grande diversité de comportements que la trichotomie avancée par Allen (*cf.* § 2.1.3) entre *faits*, *événements* et *processus*. Elle n'est cependant ni contraignante ni exhaustive, et peut être, à souhait, complétée et/ou affinée selon les besoins. Ainsi, Galton¹² discute la distinction entre deux sortes de *variations continues* qui peuvent caractériser une proposition, et qui viendrait en complément de la classification de Shoham.

En résumé, le formalisme utilise des *dates* comme unités temporelles syntaxiques, mais il permet également de fonder un raisonnement sur des *intervalles*. Le temps est *linéaire* et *acyclique* (la relation de précédence est un ordre partiel, bien que les exemples présentés adoptent un ordre total sur les entiers). L'ontologie permet de ne faire aucune distinction entre les objets temporels, tant que cela n'est pas nécessaire. La manipulation d'objets atomiques fait que l'étude verticale devient rapidement complexe avec le nombre d'intervalles à considérer.

2.1.1.2 Logique modale temporelle par intervalle (Mod)

Le formalisme utilise un cadre propositionnel (extensible au 1er ordre, mais non développé par Shoham). Un opérateur modal représente la *position* de l'intervalle de temps pour lequel une proposition est vérifiée, par rapport à un *intervalle courant*. 3 opérateurs de base permettent de définir les 9 autres possibles. La sémantique définit un modèle comme propre à un intervalle courant particulier ; une assertion sera alors *vraie* par rapport à cet intervalle.

Les limites sont de deux ordres ; d'une part la syntaxe ne permet pas, dans la plupart des cas, de décider des positions relatives de deux ou plusieurs intervalles les uns par rapport aux autres, ce qui n'autorise une *étude verticale* qu'au niveau sémantique. D'autre part Shoham établit que sa logique modale par intervalle est *strictement moins expressive* que sa logique classique. Toute formule de la « version modale » peut s'exprimer par une formule équivalente dans la « version classique » ; le contraire est faux.

2.1.1.3 Logique modale monotone de connaissance temporelle (TK)

Le formalisme utilise la base de la logique classique par intervalle (*cf.* §2.1.1.1), augmentée d'un opérateur modal de connaissance \Box , qui porte sur *l'intervalle temporel* (et non sur le fait que la connaissance change dans le temps). Le cadre est un système (S5) ($\vdash \Diamond\Phi \rightarrow \Box\Diamond\Phi$, relation euclidienne) : l'interprétation est fixée pour tous les mondes possibles, et l'univers ainsi constitué forme une classe d'équivalence.

12. [Gal90]

Sémantique. D'après [Sho88, §4.2.1-p. 102] :

Une *interprétation de Kripke* est un ensemble de lignes du temps infinies et « *parallèles* », partageant toutes la même interprétation du temps : une copie « *synchronisée* » des entiers.

Si KI est une *interprétation de Kripke*, et ω un monde possible de l'univers Ω , alors $KI, \omega \models \Box \phi$ ssi $\forall \omega' \in \Omega, KI, \omega' \models \phi$ (pour une assignation de variables particulière).

Limites. Le temps est *ramifié*, et toutes les branches sont *disjointes deux à deux*. La *loi du tiers exclu*¹³ n'est pas propice à une application musicale, or la sémantique de Kripke rend possible la coexistence d'une proposition et de sa négation sur un même intervalle (chacune dans un monde particulier).

2.1.1.4 Logique non-monotone de connaissance temporelle (CI)

Formalisme. La logique TK est associée à un *critère de préférence* (d'*ignorance chronologique*) sur la structure de Kripke. Un modèle M_2 est *chronologiquement plus ignorant* qu'un modèle M_1 , s'il existe une date t_0 telle que toutes les formules dont la date de fin est antérieure à t_0 sont valides dans les deux modèles, à l'exception d'une, de date de fin t_0 , valide uniquement dans M_1 (autrement dit, à partir de t_0 on a connaissance d'un fait dans M_1 qu'on ignore dans M_2). Intuitivement, la *minimisation chronologique* consiste à minimiser l'ensemble des formules nécessaires pour déduire qu'un fait particulier intervient à une certaine date.

Ex. de l'arme à feu : pour garantir que l'arme fait du bruit à la date 6, il faut s'assurer qu'on n'a pas appuyé sur la gachette avant la date 5 (minimisation du prédicat *actionner-gachette*), ni vidé le chargeur manuellement (minimisation de *vide-manuellement*).

Limites. La *loi du tiers exclu* ne rend l'application du critère de minimisation possible que sur un ensemble fini de formules, dont la sélection semble dépendre des conclusions souhaitées. L'intérêt d'un tel critère en matière de modélisation de la perception musicale reste à déterminer...

2.1.2 Balaban et Murray ([BM88, BM89])

2.1.2.1 Le langage des structures temporelles (TS)

Le cadre logique est du 1er ordre. Le domaine du discours est constitué d'*objets temporels* (dates) et d'*objets atemporels* (i.e. sans notion intrinsèque de durée). L'ensemble des objets temporels est muni d'un *ordre total*, mais le monde que décrit le langage n'a pas de ligne de temps absolue : un *historique* (ou *chronique*, par analogie à McDermott) possède sa propre ligne du temps, munie d'un Zéro. Il est *dénoté* par une *structure temporelle* (unité syntaxique), qui constitue une collection d'historiques ou de *combinaisons élémentaires*, munis chacun d'une *estampille temporelle* ; elle situe son Zéro sur la ligne du temps de l'historique composite. Une *combinaison élémentaire* n'a pas de cours du

13. La *loi du tiers exclu* établit qu'une proposition est soit vraie, soit fausse : l'existence d'une tierce valeur est exclue.

temps propre. C' est une paire (p, t_d) où p est un objet atemporel et t_d un objet temporel ; t_d est appelé *durée* de la combinaison élémentaire (p, t_d) .

A chacun des trois¹⁴ types du domaine (durées, dates, historiques, et combinaisons élémentaires) correspond une *sorte* de terme ($\{d, t, h, ec\}$): un terme n'est pas typé, mais possède une *signature* (fonction) qui permet d'étudier le type de l'objet du domaine qu'il dénote, notamment de s'assurer de l'homogénéité des paramètres manipulés par une fonction. Un certain nombre d'*opérateurs* sont également prédéfinis ; leur rôle est celui de symboles fonctionnels *interprétés*.

La sémantique inclut celle du 1er ordre, ainsi que les restrictions de type liées aux différents objets du domaine. Une axiomatique particulière introduit la notion d'*accomplissement* (*completion*) d'une structure temporelle sur un intervalle donné, dans le contexte d'une structure temporelle. Cette notion fait intervenir le prédicat spécifique $\mathbf{C}(t_1, t_2, ts_1, ts_2)$, qui signifie que l'*accomplissement* de la structure temporelle (historique) ts_1 s'opère dans le contexte de la structure ts_2 pendant l'intervalle de temps (t_1, t_2) . Il est associé à deux axiomes qui définissent sa véracité ; le premier établit que l'intervalle (t_1, t_2) est bien un intervalle de ts_2 qui permet l'accomplissement de ts_1 , et le second permet d'étudier l'accomplissement de chacune des propositions qui composent une structure ts_1 complexe (*i.e.* qui fait intervenir un connecteur logique unaire, ou entre deux propositions). A noter que ce deuxième axiome permet également d'écarter la loi du tiers exclu (il exprime une implication univoque là où le tiers exclu nécessiterait une équivalence). La distinction entre *objets*, *actions* et *processus* (*cf.* trichotomie d'Allen, [AK85]) s'opère par le *comportement temporel* de leurs entités représentées comme des historiques, et non par le biais de types adéquats.

La caractérisation des comportements temporels correspond à l'ontologie de Shoham. Un prédicat P (pour PLAYS) est introduit pour permettre l'étude du comportement temporel d'un point de vue "instantané" : il permet le passage de la notion d'accomplissement sur un intervalle à celle de *vérité en un instant*. Ainsi, $P(t, ts_1, ts_2)$ est mis pour « la structure temporelle ts_1 s'exécute (*plays*) à la date t pendant la structure ts_2 ». Les propriétés avancées établissent qu'une structure temporelle qui *s'accomplit* sur un intervalle *s'exécute* en chaque instant, mais *ne s'accomplit* sur aucun des sous-intervalles.

2.1.2.2 Simulation des logiques temporelles par intervalle de Shoham, dans la logique des structures temporelles

L'Ignorance Chronologique et les structures temporelles

Le critère de préférence de Shoham (*cf.* §2.1.1.4 et [Sho88]) est simulé par le prédicat CMI¹⁵. Contrairement à la logique (CI), la minimisation s'applique ici à *l'ensemble des formules connues*. L'idée est qu'un historique H_1 est *chronologiquement plus ignorant* qu'un historique H_2 , s'ils ont en commun la même connaissance jusqu'à une certaine date t_0 , et H_1 possède des informations en t_0 que H_2 ne connaît pas.

14. *historique* et *combinaison élémentaire* peuvent être vus comme le même type : la distinction entre les deux permet simplement de traiter une combinaison élémentaire comme un constituant *atomique* d'un historique.

15. Ignorant Chronologiquement Maximum

La logique classique du 1er ordre (cf. §2.1.1.1)

La preuve est faite par Balaban & Murray que *toute formule de la logique classique de Shoham peut être simulée par une formule dans la logique des structures temporelles*, où la structure de contexte est une variable libre. Pour Shoham le temps est *linéaire* : toutes les formules font référence à un même cours du temps. Il est donc nécessaire que toutes les formules équivalentes dans la logique des structures temporelles (TS) aient *une même et unique structure de contexte* ; tous les intervalles (et toutes les dates) seront ainsi exprimés dans un référentiel commun. On obtient qu'à un ensemble de fbfs de Shoham ϕ correspond une fbf $\phi_t(ts)$, où ts est une variable libre (structure temporelle de contexte).

Extension de la simulation pour la logique modale monotone (TK) (cf. §2.1.1.3)

Rappelons que la base de (TK) est un système (S5) ; on dispose donc d'une relation d'accessibilité universelle (relation euclidienne) : l'interprétation du temps est la même dans tout l'univers. Chaque monde (possible) a cependant sa propre ligne du temps ; il faut donc simuler chacun par une structure temporelle contextuelle propre, et assimiler l'univers à l'ensemble de toutes ces structures, nécessairement disjointes 2 à 2. Appelons Ω_t cet ensemble.

A un ensemble ϕ de fbfs de (TK) correspond alors une fbf ϕ_t dans (TS), constituée comme suit :

1. Si ϕ est du 1er ordre et ne contient aucune occurrence de l'opérateur modal \Box (nous dirons que ϕ est une *fbf de base* pour Shoham), alors ϕ_t est $\varphi_t(ts)$ et satisfait les règles de correspondance établies par Balaban & Murray (B&M), avec la restriction que $ts \in \Omega_t$.
2. si ϕ est $\Box\varphi$, où φ est une fbf de base, alors si $ts \in \Omega_t$, $\varphi_t(ts)$ simule φ , et ϕ_t est $(\forall ts)\varphi_t(ts)$.

Il reste à montrer que la translation préserve la satisfaisabilité et l'implication logique. B&M appellent *interprétation régulière* une interprétation de (TS) qui satisfait toutes les conditions requises pour être un modèle ; elles sont les seules prises en compte. Les énoncés qui suivent sont ceux de B&M, adaptés au problème qui nous intéresse ici.

Définition 2.1 Soient \mathbf{I} une interprétation régulière de (TS) + une assignation de variables, Ω_t un ensemble (infini) de variables de signatures¹⁶ h , ts une variable quelconque de Ω_t ; soient également \mathbf{J} une interprétation de (TK) + une assignation de variable, Ω l'univers (structure de Kripke) des mondes possibles, et $\omega \in \Omega$ l'un quelconque de ces mondes.

Nous dirons que (\mathbf{I}, ts) correspond à (\mathbf{J}, ω) si :

1. \mathbf{I} et \mathbf{J} disposent du même ensemble de dates, muni du même ordre ; les assignations dans \mathbf{I} pour les constantes et les variables de signature t sont les mêmes que les assignations dans \mathbf{J} pour les symboles de dates et les variables temporelles.
2. $\exists ts \in \Omega_t$, tel que l'assignation de ts dans \mathbf{I} satisfait la condition suivante :
pour tous les termes temporels t_1, t_2 , et une "prédiction" (predication) p dans (TK) :

$$J, \omega \models TRUE(t_1, t_2, p) \quad \text{ssi} \quad I \models (t_1, t_2) \in \text{intervalle}([p, t_2 - t_1], ts)$$

16. Rappelons que la notion de *signature d'un symbole du langage* permet de spécifier le type d'objet du domaine que dénote une variable, et par extension aux symboles fonctionnels, de satisfaire les contraintes de types sur les arguments d'une fonction ou d'un prédicat.

Nous dirons que (\mathbf{I}, Ω_t) correspond à (\mathbf{J}, Ω) si :

$$J \models \Box \text{TRUE}(t_1, t_2, p) \quad \text{ssi} \quad I \models (t_1, t_2) \in \text{intervalle}([p, t_2 - t_1], ts), \forall ts \in \Omega_t$$

Afin de prouver l'existence d'une correspondance formelle entre les deux logiques, B&M introduisent un ensemble Ψ de fbfs de (TS), et supposent que le langage de (TS) n'inclut que les symboles ayant au moins une occurrence dans Ψ . Cette restriction est nécessaire pour pouvoir faire la distinction, parmi les symboles fonctionnels de (TS), entre les *prédicats* et les *symboles fonctionnels* de (TK). Nous nous plaçons ici dans le même cadre restreint.

A ce stade, une étude formelle de l'ensemble Ω_t et de ses éléments paraît utile. Nous posons donc sur (TS) les hypothèses suivantes :

Ω_t est un ensemble de variables, distinct de V (ens. initial des variables).

sgn est l'application prolongée par $\text{sgn} : \Omega_t \rightarrow \{h\}$ ¹⁷

Définition 2.2 *Un monde ω est simulé dans (TS) par une et une seule structure temporelle de contexte $tc \in \Omega_t$. L'application $\chi : \Omega \rightarrow \Omega_t$, $\chi(\omega) = tc$ permet d'établir cette correspondance.*

Propriété 1 *L'application χ est bijective, et admet une réciproque $\chi^{-1} : \Omega_t \rightarrow \Omega$, $\chi(tc) = \omega$*

Propriété 2 $\forall tc_1, tc_2 \in \Omega_t \quad tc_1 \cap tc_2 \neq \emptyset \Rightarrow tc_1 \neq tc_2$

Lemme 1 (...) *il existe une Ψ - Ω_t -correspondance de \mathbf{I} vers \mathbf{J} et inversement.*

Preuve : Le lemme 1 de B&M (Ψ -correspondance) établit de façon immédiate la correspondance entre un monde et une structure temporelle donnée, en prenant $\chi(\omega)$ comme structure de contexte. Il reste à montrer que la correspondance reste vérifiée pour $\Box(t_1, t_2, p)$.

\Rightarrow :

Si dans $\mathbf{I} \quad (t_1, t_2) \in \text{intervalle}([p, t_2 - t_1], tc) \quad \forall tc \in \Omega_t$

alors dans $\mathbf{J} \quad (\omega, t_1, t_2) \in M(p), \quad \forall \omega \in \Omega$, où M est la fonction d'interprétation définie par Shoham.

La correspondance est immédiate.

\Leftarrow :

L'interprétation \mathbf{I} doit être standard (au sens de B&M), avec les mêmes interprétations des dates que dans \mathbf{J} . A une structure $tc_i = \chi(\omega_i)$ on assigne l'historique

$$H_{0i} = \{([p, t_2 - t_1], t_1) \mid J, \omega_i \models \text{TRUE}(t_1, t_2, p)\}$$

L'assignation à ts satisfait l'axiome $(\bullet h)$, dès lors, pour chaque paire $([p, d], t)$ dans H_{0i} :

$$I \models \exists ts' (tc_i = \bullet([p, d], t, ts'))$$

Il s'en suit que lorsque tc_i parcourt Ω_t , si $J \models \Box \text{TRUE}(t_1, t_2, p)$ pour une paire de dates (t_1, t_2) alors $I \models (\forall tc_i) C(t_1, t_2, [p, t_2 - t_1], tc_i)$.

17. pour la fameuse *signature*...

2.1.2.3 Limites Le langage décrit permet une manipulation aisée de structures temporelles complexes, ce qui facilite l'étude verticale. De plus, l'idée de travailler sur des structures hiérarchiques d'événements (malgré tout autonomes), pouvant être en relation les unes avec les autres, est très proche du modèle cognitif de McAdams relatif à l'encodage des informations utiles à la perception musicale ($\{\text{événements musicaux}\} \subset \{\text{flux d'événements}\} \subset \{\text{entités musicales}\}$). La *loi du tiers exclu* ne s'applique pas à la logique (TS) ; nous verrons plus loin que cela présente un avantage certain en matière de perception. Le temps est *non-borné, dense, et complet*.

2.1.3 Allen ([AK85])

Le formalisme utilise un cadre de logique des prédicats. La théorie de *raisonnement temporel par intervalle* introduit sept relations (et leurs inverses) pour décrire les treize configurations topologiques possibles de deux intervalles (*cf.* figure 1). Un prédicat dénote une assertion et l'intervalle de temps sur lequel elle est considérée. Une trichotomie entre *événements/actions/faits* permet de caractériser les différents *types* de comportement temporel, à travers les trois prédicats spécifiques **holds**, **in**, et **occurs**¹⁸.

La sémantique n'est pas explicite¹⁹. Un solveur automatique de problèmes de planification (*i.e.* de connaissance temporelle) est proposé, qui raisonne par propagation de *contraintes de transitivité*, exprimées sur des *buts*. Un but est une description partielle du monde souhaité. Les contraintes sont l'expression des propriétés de transitivité des treize opérateurs (*cf.* table 2).

Limites. Le raisonnement temporel ne peut s'effectuer que sur des intervalles ; l'observation d'un événement du point de vue des *instants* est (intentionnellement) écarté. La trichotomie avancée ne permet pas de caractériser tous les types de comportement temporel possibles. La syntaxe ne permet pas d'inférer en tenant compte des propriétés intrinsèques aux types des objets manipulés.

2.1.4 Vecchione ([Vec88])

Le formalisme utilise une *théorie de connaissance temporelle par intervalle* semblable à celle d'Allen (*cf.* § 2.1.3), basée sur une description topologique des treize relations possibles entre deux intervalles de temps. [Ris88] propose une formulation des expressions temporelles utilisant les opérateurs d'Allen²⁰, adaptée aux *grammaires de métamorphoses* - qui fondent le langage Prolog. Une 'Forme Normale Réduite à Gauche' (FNRG) est la notation préfixée d'une expression temporelle, dont le premier argument est soit un intervalle soit une FNRG, et le second argument est un intervalle. La réduction à gauche fait intervenir la notion de *support temporel* d'une configuration d'intervalles, vu comme l'intervalle de temps compris entre les dates extrêmes de cette configuration. Par exemple²¹,

18. Cette trichotomie correspond à une « version simplifiée » de l'ontologie de [Sho88], que nous explicitons dans le § 2.1.1.1.

19. [Lad87] propose une sémantique pour la théorie étendue d'Allen-Hayes, en termes de modèles pour les axiomes énoncés. Ces axiomes sont cependant propres à l'*extension* de la théorie d'Allen, non à la théorie initiale qui nous intéresse ici.

20. En l'occurrence il conviendrait ici de les nommer « opérateurs de Vecchione »...

21. La figure 1 établit une corrélation entre la notation des « opérateurs de Vecchione » et celle des « opérateurs d'Allen ».

$\alpha(\beta_4(a, b), c)$ est la FNRG de $\gamma(\gamma(\beta_4(a, b), -\beta_1(a, c)), -\beta_3(b, c))$.

Les limites sont liées à ce que la « réduction à gauche » ne donne pas lieu systématiquement à une représentation non ambiguë : par ex., la réduction de $\beta_4(a, b)\beta_4(a, c) - \beta_3(b, c)$ et celle de $\beta_4(a, b)\beta_4(a, c)\beta_3(b, c)$ conduisent à la même FNRG $\beta_3(\beta_4(a, b), c)$. Cette ambiguïté peut s'exprimer par des *contraintes de transitivité* d'Allen (cf. § 2.1.3). L'implémentation d'une FNRG sous forme d'une règle de réécriture est immédiate.

2.1.5 Chemillier ([Che87b, Che87a])

Le formalisme utilise un cadre algébrique, développé sur l'étude d'un monoïde libre \mathbf{A}^* vu comme un ensemble de *séquences musicales*. Une séquence est un *ensemble ordonné* de notes de musique - qui peut donc être assimilé à un intervalle. Afin de traduire la double organisation verticale et horizontale de la musique, Chemillier introduit, en plus de la concaténation usuelle, un *opérateur* \parallel de *superposition* de séquences musicales. $u \parallel v$ est défini pour des intervalles ayant mêmes dates de départ, et des tailles qui peuvent différer ; le résultat décrit l'union des éléments de u et v :
$$\begin{array}{c} a \ c \ c \\ b \ c \ a \end{array} \parallel ab = \begin{array}{c} a \ b \ c \\ b \ c \ a \end{array}$$
 L'opérateur \perp est défini par symétrie de construction comme une extension de la loi \cap . L'opérateur $\overline{\parallel}$ est dit de *superposition à longueurs égales*. $X \overline{\parallel} Y$ est défini sur X et Y , des *parties* de \mathbf{A}^* . Chemillier utilise cet opérateur pour s'intéresser à des problèmes de *reconnaissabilité* de parties et de superposition de parties, problèmes pour lesquels il présente et étudie plusieurs automates et algorithmes.

Limites. Les deux opérateurs de superposition utilisés ne permettent pas de tenir compte d'un *ordre vertical* sur les éléments. Les éléments qui constituent une séquence ont tous la même durée, égale à l'inverse de la cardinalité de la séquence.

2.1.6 Wiggins et al. ([WHS88])

Le formalisme utilise une structure arborescente, semblable aux TARbres de [Die88], pour implémenter un langage de description, de manipulation et d'analyse d'une pièce de musique. Le langage manipule des *événements* ; un événement (*i.e.* une note de musique) est représenté par un prédicat, dont l'arité dépend des hypothèses sur les *types de constituants* d'une note. Les types de constituants envisagés pour l'implémentation qui est présentée sont au nombre de trois ; ils correspondent aux dimensions²² *hauteur*, *timbre* et *durée*. Associés à un identificateur et une date de début ils forment un événement. La forme générale du prédicat `evenement` est décrite par `evenement(Identificateur, Hauteur, DateDebut, Duree, Timbre)`. Une *durée* est une différence de dates ; l'ensemble des dates est muni d'un *ordre total*. Une partition est représentée par une classe d'événements, organisés en *tranches* et *flux* d'événements : une tranche (ou *superposition*) autorise une « *étude verticale* », un flux (ou une *séquence*) autorise une « *étude horizontale* ».

Les limites. sont essentiellement d'ordre cognitif, puisqu'aucune sémantique ni aucun schéma d'inférence particulier ne sont décrits. Ce faisant, Wiggins et al. proposent une structure

22. cf. § 1.1 sur les « dimensions porteuses de formes », quant à l'intérêt d'un tel choix dans le cadre de notre étude...

de données suffisamment souple pour être adaptée à différents types de traitement - comme le montre l'implémentation présentée en guise d'illustration, dont le but est d'extraire et reconnaître des séquences rythmiques.

2.2 Comparaison informelle

2.2.1 Considérations générales

1. La *loi du tiers exclu* et l'interprétation donnée à la négation varient d'un formalisme à un autre.
2. Chaque formalisme est lié à un certain nombre de contraintes quant à la *nature du temps*, et offre plus ou moins de libertés quant à la possibilité d'en énoncer de nouvelles suivant les besoins. On ne pourra, par exemple, pas considérer le temps comme ramifié dans la logique classique du 1er ordre de Shoham.
3. Les résultats associés aux diverses théories de Shoham sont valables dans le cas d'un temps discret, mais la plupart ne sont plus vérifiés dans le cas infini, ou dans le cas continu (en passant, par ex., des entiers aux réels, qui semblent plus adéquats pour modéliser une représentation d'un temps continu).
4. À l'exception de la logique modale (Mod) (*cf.* §2.1.1.2), chaque formalisme de Shoham peut être simulé dans (TS).
5. Aucun des formalismes qui utilisent un raisonnement par intervalle ne tient compte d'un *ordre vertical* sur les intervalles.
6. Qu'en est-il des démonstrateurs pour chacune de ces logiques ?

2.2.2 Bilan des modèles

Légende :

Formalismes :

- (CT) logique Classique Temporelle par intervalle [Sho88]
- (TK) logique modale monotone de connaissance temporelle (*Temporal Knowledge*) [Sho88]
- (CI) logique non-monotone de connaissance temporelle (*Chronological Ignorance*) [Sho88]
- (M) logique Modale temporelle par intervalle [Sho88]
- (Al) théorie par intervalle d'Allen [AK85]
- (Ch) langage algébrique autour d'un monoïde libre [Che87b, Che87a]
- (TS) langage des Structures Temporelles [BM88, BM89]
- (V) implémentation de l' Ω -Syntaxe [Vec88, Ris88]

Critères de comparaison :

Ontologie syntaxique : différents types d'objets sont caractéristiques d'un comportement temporel particulier.

Langage algébrique

Logique réifiée	: pour régler les questions d'évaluation d'une variable temporelle on fait appel à un prédicat spécifique (ici TRUE).
Dates	: lorsqu'elles interviennent, ce peut être soit au niveau syntaxique, soit au niveau sémantique.
Durées	
Intervalles	: manipulation d'intervalles de temps comme unités syntaxiques.
Ω	: Ω -Syntaxe, <i>i.e.</i> prise en compte - de différentes façons possibles - des treize configurations d'Allen.
2 opérateurs (\parallel, \bullet)	: manipulation d'intervalles par le biais d'opérations de <i>superposition</i> et de <i>succession</i> (cf. §4.2.2).
S_V	: utilisation des propriétés de symétrie verticale (cf. §4.1).
S_H	: utilisation des propriétés de symétrie horizontale (cf. §4.1).
Structure composite	: manipulation possible d'objets composites.
Tiers inclu	: non respect de la loi du tiers exclu.

	Ont.	Lang.	Log.	Dates		Durées	Int.	Ω	2 op. \parallel, \bullet	S_H	S_V	Struct. compos.	$1/3$ inclu
	synt.	alg.	réif.	Synt.	Sém.								
(CT)			•	•									
(TK)			•	•									
(CI)			•	•									
(M)					•		•	•		•			
(AI)	•						•	•		•			
(Ch)		•					•		•			•	•
(TS)				•		•						•	•
(V)							•	•				•	

TAB. 1 –: « Propriétés » caractéristiques des modèles temporels étudiés

3 Vers une définition formelle des critères cognitifs adoptés

3.1 Généralités

À la lumière de ce qui précède, nous posons certaines hypothèses sur notre modèle de représentation. À ce stade, il est clair que toutes nos exigences ne peuvent être satisfaites ; aussi sommes nous contraints - au moins dans un premier temps - de faire des choix qui parfois ne correspondent pas à une réalité cognitive. Nous précisons ces limites au fur et à mesure.

1. La « position » d'un *objet* dans le temps musical n'est connu que relativement à la position d'un ou plusieurs autres : les notions de *date* et de *durée* - vue comme une différence de dates - ne sont pas appropriées à un modèle de perception. Par exemple, dire que « *l'exposition du thème dans telle pièce musicale dure 15 sec.* » n'est absolument pas représentatif de la durée telle qu'elle est perçue ; de même on ne mémorise pas non plus que « *ce même thème est exposé entre la date t_1 et la date t_2* ». Pour pallier ce problème, nous décidons que la description de la durée d'un intervalle se mesure - s'exprime - par une valeur de la *Dimension Durée*.

2. En vertu des lois *d'assimilation* et *des contrastes*, nous souhaitons que ces positions relatives puissent être exprimée par le seul biais des notions de *superposition* et de *succession* dans le temps. Néanmoins, les opérateurs d'Allen constituent un bon moyen de représentation, qui peut s'avérer suffisant dans bien des cas. Aussi nous envisageons de pouvoir disposer, au sein d'un même formalisme, des deux modes de représentation.

Les critères d'évaluation d'un modèle formel de représentation pour la perception musicale devront être échafaudés en priorité sur la base des ces deux premières exigences.

3. La *loi du tiers exclu* ne correspond à aucune réalité cognitive, il est donc souhaitable qu'elle ne soit pas vérifiée. Ce problème va de pair avec celui de la *négation*, dont l'interprétation conduit à une signification musicale intuitive plutôt suspecte. À notre niveau, une logique sans négation n'est pas encore envisageable ; nous dirons donc que la négation d'une proposition s'applique plutôt à une « période » de temps, et signifie que « sur cette période, le phénomène - événement - musical symbolisé n'est pas perçu ».
4. *Les objets manipulés doivent pouvoir être atomiques (i.e. exprimés sous forme d'intervalle) ou composites (ensemble structuré d'intervalles), ceci pour tenir compte des différents niveaux d'abstraction qui interviennent dans l'encodage des événements musicaux et des relations entre eux.*
5. *En ce qui concerne la Dimension Durée, une relation métrique doit être exprimée en termes de proportions de durées, sur un nombre restreint de valeurs (relatives) bien définies.*

Pour satisfaire ces exigences, et dans le but de construire notre modèle autour des dimensions morphophoriques, nous introduisons la notion de *cadre perceptif*.

3.2 Le cadre perceptif

La perception par un auditeur d'un environnement sonore (musical) est représentée dans un espace dont les dimensions sont d'une part celles morphophoriques dégagées précédemment (à l'exception de la *Dimension Durée* dont le statut particulier a été exposé au § 3.1), et d'autre part un cours du temps - musical - absolu. Nous nommerons cet espace le *cadre perceptif* d'un auditeur.

On appelle *forme* l'interprétation d'une représentation imagée dans ce *cadre perceptif* ; un sous-ensemble de composantes d'une forme - le long d'une dimension particulière - est appelé *élément morphophorique*. Une *Dimension* est associée à un *domaine de valeurs propres* (ou caractéristiques), organisées le long d'un axe, gradué et orienté suivant une *relation de précédence* prédéfinie²³. Nous nous efforcerons de donner une interprétation formelle pour certaines propriétés de ces valeurs, qui soient communes à toutes les *Dimensions*. Le « plan » relatif à une dimension et au temps musical est vu comme une « logique locale », dotée d'un *ensemble de relations* et d'un *schéma d'inférence*, définis sur ses éléments morphophoriques constitutifs. D'un point de vue sémantique, un intervalle dans ce « plan » établit que l'auditeur perçoit la valeur caractéristique - obtenue par « projection » de l'intervalle sur l'axe de la *Dimension* dans laquelle on se trouve - pendant un laps de temps musical. En vertu de la

23. Dans les parties qui suivent, nous parlerons souvent par abus de langage d'*ordre vertical*, avec l'idée qu'un axe des temps musicaux est horizontal et celui d'une dimension est vertical, orienté vers le bas. Cette présentation a pour seul but de faciliter la compréhension.

loi des contrastes (cf. loi 2), la perception d'un élément (*i.e.* ici un intervalle) s'opère par le repérage de ces *frontières* : nous pouvons donc poser que la valeur qui correspond à un intervalle n'est pas perçue de part et d'autre de ses limites - ou *bornes*. Une ligne « parallèle » à l'axe du temps est donc vue comme une succession de p et $\neg p$, où p est la valeur correspondante sur l'axe vertical (*i.e.* celui de la *Dimension*). Cette précision donne un sens musical intuitif à la négation d'une proposition, et nous permet de poser des contraintes ontologiques quant au comportement temporel de la proposition liée à un intervalle.

3.3 Restrictions cognitives : contraintes ontologiques

L'énoncé qui suit fait appel à des notions avancées et définies par Shoham²⁴, dans [Sho87, Sho88, pp. 48–50].

En vertu des *lois d'assimilation* et des *contrastés*, nous posons comme hypothèse supplémentaire l'ontologie suivante :

Postulat 2 *Les propositions qui modélisent un événement musical se caractérisent toutes par un comportement temporel de type liquide (héréditaire²⁵ vers le haut et vers le bas) et concaténable.*

4 Quelques résultats

Ce qui suit a pour but de nous mener progressivement à fournir un support formel de représentation pour le *cadre perceptif*. Nous nous ramenons à l'étude du comportement temporel d'éléments propres à une seule et même *Dimension* : il s'agit de définir une « logique locale » qui permette de manipuler des formes musicales propres à une *Dimension* particulière (*i.e.* un « plan » de l'espace de perception). À cette fin, nous établissons les bases d'un premier langage propositionnel ; il s'appuie sur des propriétés de symétries et de transitivité des configurations d'Allen que nous exposons préalablement.

4.1 Symétries, transitivité

Propriétés de symétrie

On appelle Ω_i l'ensemble des treize configurations topologiques possibles d'intervalles temporels, et Ω l'ensemble des symboles d'opérateurs d'Allen. Un élément de Ω_i est une paire d'intervalles.

Définition 4.1 *On appelle symétrie d'axe horizontal la transformation S_H définie sur l'ensemble Ω_i des intervalles temporels, qui à la paire d'intervalles (u, v) associe la paire (v, u) .*

Définition 4.2 *On appelle symétrie d'axe vertical la transformation S_V définie sur l'ensemble Ω_i des intervalles temporels, qui à la paire d'intervalles (u, v) associe la paire (u', v') , son image par rapport à la « médiatrice » du support de (u, v) .*

24. Lerdahl et Jackendoff, bien qu'ils n'utilisent pas le terme d'« ontologie », établissent en 1983 des « règles de bonne formation de groupements » qui permettent - entre autre choses - de tenir compte dans un cadre musical des contraintes que nous mettons ici en avant, quant à la caractérisation du comportement temporel des objets manipulés.

25. cf. § 2.1.1.1 pour une définition de l'hérédité.

Le tableau suivant fait correspondre à chaque paire de Ω_i son image par l'une et l'autre des deux symétries.

Transitivité d'Allen et ambiguïtés

Le problème majeur que rencontrent les logiques temporelles par intervalle réside dans l'ambiguïté à laquelle on est confronté dès lors qu'on souhaite décrire une situation temporelle qui comporte plus de deux intervalles. De nombreux travaux, tels que [Ris88, Vec88, Sho88, AK85, ...], font état de cette ambiguïté, sans apporter ni solution convaincante, ni algorithme efficace pour la lever. À ce sujet, [AK85] dresse un *tableau de transitivité* (cf. table 2), qu'il présente comme une « table de multiplication » sur les treize opérateurs ; elle recense l'ensemble des *contraintes de transitivité*²⁶. Par exemple,

Si X (s) Y et Y (fi) Z alors X (\prec m o) Z
s'exprime par la contrainte de transitivité

$$(s) * (fi) \rightarrow (\prec m o)$$

$\mathbf{Br_2C}$ $\mathbf{Ar_1B}$	<	>	d	di	o	oi	m	mi
<	<	X	< m o d	<	<	< o d m	<	< o d m
>	X	>	> oi d mi	>	> oi d mi	>	> oi d mi	>
d	<	>	d	X	< o d m	> oi d mi	< m	> mi
di	< o di m	> oi di mi	o oi d di	di	o di	oi di	o di m	oi di mi
o	<	> oi di mi	o d	< o di m	< o m	o oi d di	<	oi di
oi	< o di m	>	oi d	> di oi mi	o di oi d =	> oi mi	o di	>
m	<	> oi di mi	o d m	< m	<	o d	<	d di =
mi	< o di m	>	oi d mi	> mi	oi d	>	d di =	>

TAB. 2 –: *Table de transitivité (cf. [AK85])*

L'ensemble de ces contraintes peut être généralisé sous la forme d'une règle d'inférence.

Proposition 1 *Soient Ω l'ensemble des treize foncteurs temporels (dont la notation reprend celle utilisée par Allen), et V l'ensemble des variables sur lequel sont définis les éléments de Ω . Les contraintes de transitivité d'Allen sont alors généralisées par la règle d'inférence*

$$\forall \omega_1, \omega_2 \in \Omega \setminus \{\prec, \succ, =, m, mi\}, \quad \forall x, y, z \in V, \quad \exists \omega \in \Omega$$

²⁶. pour reprendre l'expression utilisée par Allen.

Légende :

S_V : Symétrie verticale

S_H : Symétrie horizontale

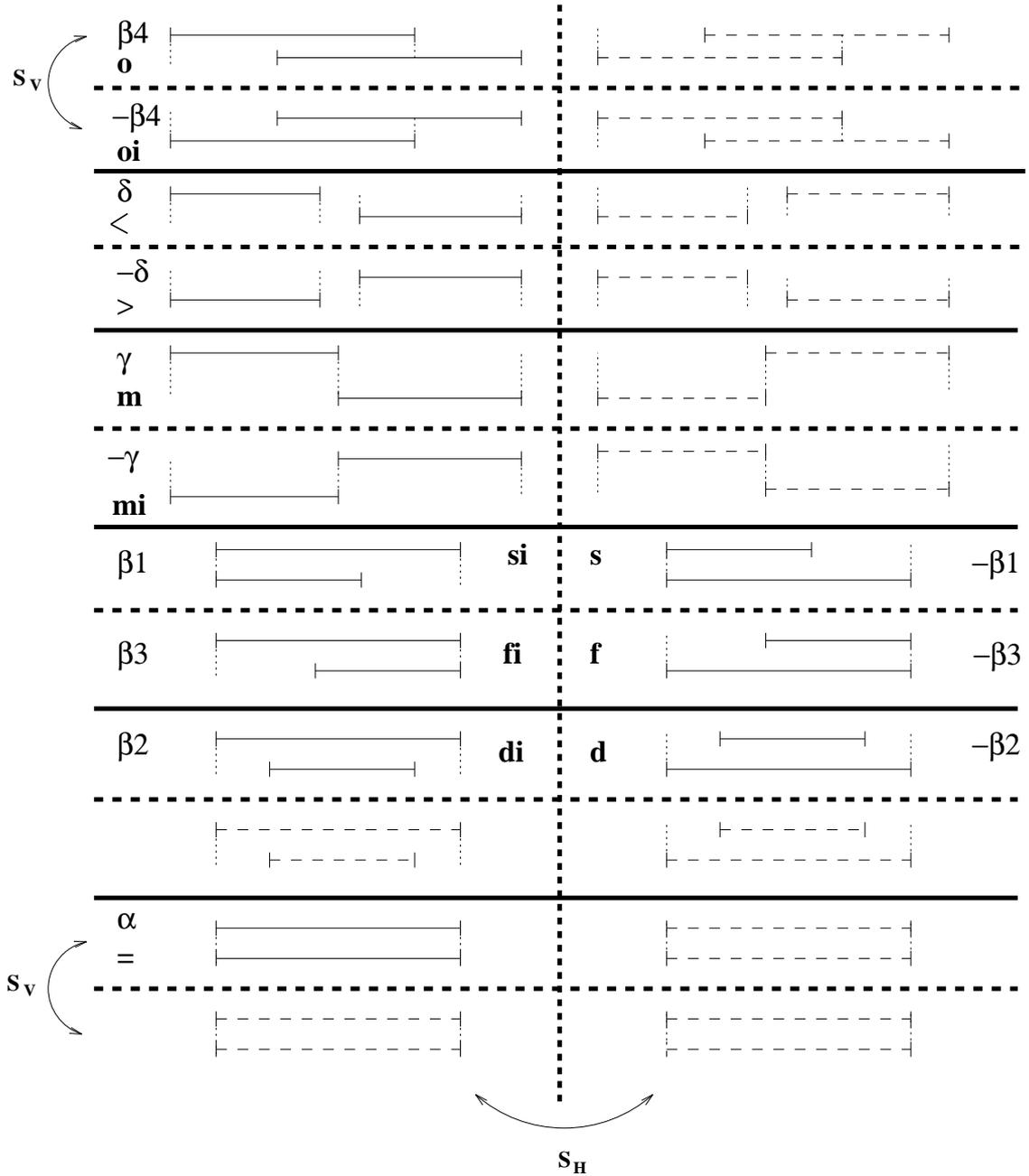


FIG. 1 —: Propriétés de symétries sur les opérateurs d'Allen, ou de l' Ω -syntaxe

$$\frac{\omega_1(x, y), \omega_2(y, z)}{\bigvee^n \omega(x, z)} \quad (1)$$

Preuve : L'énoncé présuppose que la description de deux paires d'intervalles est vue comme une conjonction de deux termes ; le tableau de transitivité d'Allen associé à la règle du *Modus Ponens* permet alors une conclusion triviale.

4.2 Un langage propositionnel

Une proposition est mise pour un *événement musical*, à savoir un trait caractéristique de la *Dimension* générant un intervalle de temps musical. Elle prend l'aspect d'une *paire temporelle* notée $[u]p$, où u est l'intervalle de temps, et p le trait caractéristique. Nous parlerons de $[u]$ comme le *support temporel* de la proposition P :

$$P \stackrel{\text{def.}}{=} [u]p$$

Par convention, les propositions sont notées en majuscules (P, Q, R , etc.), tandis que les intervalles temporels et les traits sont notés en minuscules (resp. u, v, w, \dots et p, q, r, \dots).

4.2.1 Syntaxe

Le langage \mathcal{L} est une extension de la logique propositionnelle , qui consiste en

- ‡ un ensemble \mathcal{P} fini ou dénombrable de symboles propositionnels
- ‡ un ensemble Δ fini ou dénombrable de symboles propositionnels qui dénotent des *traits* (*caractéristiques*) de la *Dimension Morphologique* considérée
- ‡ les symboles relationnels \preceq et \doteq - respectivement pour dénoter la *précédence* et l'*égalité* sur les *traits caractéristiques*
- ‡ un ensemble Θ fini ou dénombrable de symboles de *Durées* - qui dénotent les valeurs propres de la *Dimension Durée*
- ‡ un ensemble Ω d'opérateurs d'Allen
- ‡ un ensemble $\mathcal{B} = \{\|, \bullet, \overline{\|}, \overline{\bullet}\}$ d'opérateurs temporels d'ordre 2
- ‡ un ensemble de connecteurs logiques classiques

natural les symboles de constantes \top et \perp qui dénotent respectivement les constantes *vrai* et *faux*

Définition 4.3 Une formule atomique peut être :

- un symbole propositionnel,
- une constante (\top ou \perp).

Définition 4.4 L'ensemble \mathbf{P} des formules propositionnelles est le plus petit ensemble qui vérifie :

1. si A est une formule atomique, alors $A \in \mathbf{P}$,
2. $X \in \mathbf{P} \Rightarrow \neg X \in \mathbf{P}$,
3. si \circ est un connecteur de rang 2, alors $X, Y \in \mathbf{P} \Rightarrow (X \circ Y) \in \mathbf{P}$,
4. si \flat est un descripteur basique, X et Y des formules atomiques (propositionnelles serait mieux...), alors $X \flat Y \in \mathbf{P}$ (ou $\flat(X, Y) \in \mathbf{P}$ en notation préfixée),
5. si ω est un descripteur temporel de Ω , alors $X, Y \in \mathbf{P} \Rightarrow \omega(X, Y) \in \mathbf{P}$ (ou $(X \omega Y)$)
6. $X, Y \in \mathbf{P} \Rightarrow (X \doteq Y) \in \mathbf{P}$ et $(X \prec Y) \in \mathbf{P}$,

4.2.2 Les opérateurs de succession et superposition

L'objectif est ici d'adapter la notation préfixée utilisée dans [Ris88] pour décrire une situation temporelle, en n'utilisant que les deux seuls opérateurs de succession et de superposition. D'une part une telle notation, comme le souligne Risch, présente des avantages certains en vue d'une implémentation, d'autre part nous verrons qu'une *forme normale réduite à gauche* exprimée avec ces deux seuls opérateurs est non-ambiguë, contrairement à son expression utilisant les opérateurs d'Allen (ou de Vecchione, dans le cas de [Ris88]). Nous utiliserons le terme générique d'*opérateurs basiques* pour parler de la succession et de la superposition. La définition de tels opérateurs est donnée en fonction de ceux d'Allen²⁷ (cf. figure 1) ; ceci se justifie par notre volonté d'imposer un *ordre vertical* sur les intervalles (*i.e.* les événements).

Définition 4.5 On appelle *superposition* de 2 intervalles temporels u et v , notée $u \parallel v$, l'opération (au sens d'Allen, *i.e.* topologique) telle que

$$u \parallel v \stackrel{def.}{\iff} u (\asymp) v \quad (2)$$

où (\asymp) est l'opérateur d'Allen. Par convention sur l'ordre des opérands, on pose que

$$u \parallel v \stackrel{def.}{\implies} u \prec v$$

Notons qu'il s'agit ici d'une *superposition stricte* de deux intervalles : ils sont de « longueurs » égales. Par analogie à [Che87a], nous utilisons également une superposition dite « *large* » sur des intervalles de longueurs différentes, mais ayant mêmes « dates²⁸ » de départ. La définition formelle est identique à la précédente, à ceci près que l'opérateur d'Allen (\asymp) est remplacé par $((\asymp)\text{ou}(s))$. Certaines propriétés comme la distributivité, ou l'idempotence, dépendent du choix de la définition. Dans ce qui suit, sauf précisions contraire, nous utiliserons la superposition stricte. Notons qu'il ne s'agit pas d'un choix de notre part (Chemillier a montré que ces deux opérateurs ne sont pas isomorphes), mais d'une question de priorités dans l'avancement de nos travaux.

27. Pour éviter toute confusion avec le symbole d'égalité, nous noterons (\asymp) l'opérateur $(=)$ initialement défini par Allen.

28. Rappelons que nous travaillons sur temps *musical*, pour lequel la notion de *date* n'est pas fondée.

Définition 4.6 On appelle succession de 2 intervalles temporels u et v , notée $u \bullet v$, l'opération telle que

$$u \bullet v \stackrel{def.}{\iff} u (m) v \quad (3)$$

où (m) est l'opérateur d'Allen. Par convention sur l'ordre des opérandes, on pose que

$$u \bullet v \stackrel{def.}{\implies} u \dot{=} v$$

Définition 4.7 On appelle forme basique une expression logique dans laquelle les opérateurs de succession et de superposition - ou opérateurs basiques - sont les seuls opérateurs temporels utilisés.

À chaque opérateur correspond son dual (par symétrie horizontale pour \parallel et symétrie verticale pour \bullet) :

$$u \parallel v = v \overline{\parallel} u \quad (4)$$

$$u \bullet v = v \overline{\bullet} u \iff v (mi) u \quad (5)$$

Propriétés

1. idempotence : $u \parallel u \stackrel{?}{=} u$ (dépend de la *Dim. Morph.*), et $u \bullet u = u$
2. associativité : $u \parallel (v \parallel w) = u \parallel v \parallel w = (u \parallel v) \parallel w$, et $u \bullet (v \bullet w) = u \bullet v \bullet w = (u \bullet v) \bullet w$
3. distributivité : $(u \bullet v) \parallel w = (u \parallel w) \bullet (v \parallel w)$, et $(u \parallel v) \bullet w = (u \bullet w) \parallel (v \bullet w)$
4. commutativité et absorption ne sont pas conservées.
5. pour la version « large » uniquement : $(u \parallel (v \bullet w)) = ((u \parallel v) \bullet w)$

4.2.3 Axiomatique et schéma d'inférence

Ces axiomes ont été établis dans le but de servir de point de départ pour une extension du langage au 1^{er} ordre, voire pour donner lieu à la définition ultérieure d'opérateurs modaux pour la *superposition* et la *succession*, dans la même optique que la logique (Mod) de [Sho88]. Ils doivent exprimer les contraintes de *précédence horizontale* et *verticale* (A2), la relation entre *événement musical* d'une part et *intervalle temporel* (ou *support temporel*) et *trait caractéristique* d'autre part (R1). L'axiome de continuité traduit la décomposition possible d'un intervalle en une succession de sous-intervalles : à terme, il sera nécessaire de distinguer deux types de succession pour que les lois 1 et 2 soient vérifiées. Une succession aura pour objet de marquer une *frontière*, tandis que l'autre marquera la *continuité*.

Axiome 1 Toutes les formules valides du calcul propositionnel classique

Axiome 2 (précédence) (a) $(P \parallel Q) \rightarrow (P < Q)$ (b) $(P \bullet Q) \rightarrow (P \dot{=} Q)$

Axiome 3 (continuité) $([u]p \bullet [v]p) \leftrightarrow ([u \bullet v]p)$

Règle 1 (support temporel) $P := [u]p$

La proposition suivante est la transposition dans notre langage de l'équivalence essentielle avancée dans [Ris88].

Proposition 2 *L'équivalence entre forme développée et forme normale réduite à gauche d'une expression temporelle [en omega] est un théorème (de notre « logique hybride »).*

$$\vdash \omega_1(x, y), \omega_2(y, z), \omega_3(x, z) \equiv \omega(\omega_1(x, y), z)$$

Preuve : Nous utilisons la superposition large. Soient les opérateurs d'Allen $\omega_1, \omega_2 \in \Omega \setminus \{<, >, \asymp, m, mi\}$, $x, y, z \in \mathcal{P}$. $\omega_1(x, y)$ et $\omega_2(y, z)$ sont des formules du langage \mathcal{L} , et la proposition 1 nous dit il existe au moins un $\omega_3 \in \Omega$ qui vérifie les contraintes de transitivité d'Allen. On vérifie alors aisément, par application successive de la proposition 1, les deux sens de l'implication.

Remarque : Le problème est loin d'être aussi simple lorsqu'on cherche une généralisation à plus de trois intervalles.

4.2.4 Algorithme de réduction à gauche en expression basique

L'objet de ce qui suit est d'établir un ensemble de règles qui permettent d'obtenir l'expression d'une configuration sous *forme normale réduite à gauche*, à partir de sa forme développée (aux sens de [Ris88]).

L'algorithme

Commentaire : Intuitivement, réduire à gauche revient à « lire les segments d'intervalles » de bas en haut et de droite à gauche, pour construire l'expression résultante au fur et à mesure de l'intérieur vers l'extérieur.

- S'assurer** de la cohérence (contraintes de transitivité) (Étape 1)
- Exprimer** la forme normale en omega (2)
- Traduire** la forme normale en omega sous forme basique normale ensembliste (3)
- Développer** la forme normale ensembliste en forme normale atomique (4)
- Remplacer** tous les opérateurs "positifs" par leur forme duale (5)
- Tant que** (la forme normale n'est pas réduite à gauche) **Faire** (6)
- Tant que** (l'opérande droit n'est pas atomique) **Faire** (6.1)
- Réduire** FN par application des règles (6.1.1)
- Affecter** Forme normale := opérande gauche (6.2)

Règles de réduction à gauche

\nearrow	$\bar{\bullet}$	$\bar{\bullet}(c, d)$	$\bar{\bullet}(c, d)$	$\bar{\bullet}$	$\bar{\bullet}(c, d)$	$\bar{\bullet}(c, d)$
$\bar{\bullet}(a, b)$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(a, b), c), d)$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(a, b), c), d)$	$\bar{\bullet}$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(a, c), b), d)$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(a, b), c), d)$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(a, b), c), d)$
$\bar{\bullet}(a, b)$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(a, b), c), d)$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(a, b), c), d)$	$\bar{\bullet}$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(c, d), b), a)$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(a, b), c), d)$	$\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(\bar{\bullet}(a, b), c), d)$

Il est évident que la forme normale réduite à gauche d'une expression temporelle n'est pas unique ; l'algorithme proposé consiste justement à adopter *une* méthode de réduction en particulier.

5 Perspectives et conclusion

Le résultat de nos travaux est double :

- un premier concerne la mise en évidence de critères de comparaison entre modèles temporels,
- un second vise à formaliser l'adéquation d'un cadre logique à un modèle cognitif de perception musicale.

5.1 Un treillis des modèles

Les limites des différents modèles existants que nous mettons en avant ouvrent de nombreuses voies de recherche ; ainsi, tout en portant notre intérêt sur un modèle de perception musicale, nous avons été amenés à dégager des critères de « qualité » des modèles temporels qui viendront fonder une taxinomie essentielle. Nous envisageons d'étudier les propriétés d'une - éventuelle - relation de précédence, d'ordre ou de préordre vertical sur les intervalles. Jusque là, nous n'avons trouvé aucun formalisme qui tienne compte de telles propriétés dans ses axiomes ou règles d'inférences ; pourtant les propriétés de symétrie qu'utilisent les définitions mêmes des opérateurs d'Allen montrent bien l'importance d'un tel ordre. Il s'agirait en quelque sorte d'établir une « ontologie » verticale. D'autre part, nous avons vu qu'une distinction syntaxique entre succession et continuité d'événements nous sera très utile : le problème n'est certes pas nouveau, mais a toujours été envisagé, jusque-là, sur le plan de l'ontologie. Il y a là un nouveau critère de classification à ne pas négliger.

Un résultat satisfaisant serait de proposer un *treillis des modèles*, fondé sur ces critères de comparaison.

5.2 Vers un modèle de perception musicale

5.2.1 La Théorie étendue d'Allen-Hayes

À la suite des problèmes que nous avons rencontrés pour définir notre langage propositionnel « hybride » à deux opérateurs temporels, nous envisageons un passage au 1^{er} ordre, basé sur la théorie étendue d'Allen-Hayes²⁹. L'idée directrice y est d'exprimer les configurations d'Allen avec le seul opérateur de succession (*m*). Notre idée à nous est d'introduire la superposition plutôt que l'égalité dans l'axiome (M4), qui assure de l'unicité d'un intervalle entre deux dates extrêmes :

$$\mathbf{M4} : \quad (\forall p, q, r, s)(p \parallel q \parallel s \wedge p \parallel r \parallel s \rightarrow q = r)$$

La superposition utilisée serait plutôt celle à *longueurs égales*, par analogie à l'égalité qu'elle remplacerait.

Dans la perspective d'une telle extension, le postulat 2 que nous énonçons se traduirait par les axiomes

29. [AH85, AH87, Lad87]

$$\vdash (\forall u)(\forall v)([u]p \wedge (u \sqsupseteq v) \rightarrow [v]p) \quad (6)$$

$$\vdash (\forall u)(\forall v)([v]p \rightarrow [u]p \wedge (u \sqsupseteq v)) \quad (7)$$

$$\vdash (\forall u)(\forall v)([u]p \wedge [v]p \wedge [u]p \bullet [v]p \rightarrow [(u \bullet v)]p) \quad (8)$$

5.2.2 De la non monotonie...

Les lois *d'assimilation* et *des contrastes* fondent notre démarche de modélisation de la perception musicale ; or l'objet même de ces lois est de justifier l'utilisation naturelle d'un *critère de minimisation* dans les différents processus d'acquisition et de reconnaissance de forme musicale. Il vient alors tout aussi naturellement l'envie d'introduire ce critère dans notre modèle. La question est de savoir comment le traduire. En ce qui concerne le maintien de la base de connaissance abstraite, le respect des lois cognitives nous conduira nécessairement à voir les *paradoxes auditifs* - phénomènes perceptuels fondamentaux - comme sources d'inconsistance : c'est la raison pour laquelle la loi du tiers exclu apparaît comme prépondérante dans notre comparaison théorique. Replacé dans le *cadre perceptif*, nous sommes tenté d'avancer d'un côté que *l'apprentissage de formes musicales procède par révision de la structure d'intervalles sur le temps musical* ; d'un autre côté, et *a posteriori*, la mise à jour et la mémorisation de la base de connaissance relèvent de la *para-consistance*. Il nous faudra en effet éviter de propager l'inconsistance à tout le système et s'assurer en permanence qu'il ne s'effondre pas. Il reste alors à savoir comment le *schéma d'anticipation*, qui constitue clairement un schéma d'inférence (plutôt) non-monotone, se traduirait dans ce modèle « exotique »...

5.2.3 ... à « l'inférence causale » ?

Enfin à propos des relations qui justifient notamment ce *schéma d'anticipation*, nous nous sommes contentés d'évoquer qu'elles sont de nature causales ; elles n'en reste pas moins l'un des fondements du raisonnement temporel tenu par un auditeur en situation d'écoute. En admettant qu'un modèle temporel de représentation de la perception musicale arrive à voir le jour, nous pourrions alors penser à l'intégrer dans une Théorie de causalité qui permettrait de disposer d'une relation causale propre à chaque forme musicale, ou à chaque *Dimension Morphologique*...

Références

- [AAMR86] E. Amiot, G. Assayag, C. Malherbe, and A. Riotte. Duration Structure Generation and Recognition in Musical Notation. In *Proceedings of the 1986 International Computer Music Conference*, pages 75–82. Computer Music Association, San Francisco, Ed. Paul Berg, Oct. 1986.
- [AH85] James F. Allen and Patrick J. Hayes. A Common-Sense Theory of Time. In *Proc. 9th IJCAI*, pages 528–531, 1985.
- [AH87] James F. Allen and Patrick J. Hayes. Short Time Periods. In *Proc. 10th IJCAI*, pages 987–989, Milano, 1987.

- [AK85] James F. Allen and Henry A. Kautz. A Model of Naive Temporal Reasoning. In *Formal Theories of the Commonsense World*, pages 251–268, 1985.
- [Ash88] Richard D. Ashley. Modélisation de l’écoute musicale : considérations générales. In McAdams and Deliège [MD88], pages 415–436.
- [Bak88] Michael Baker. Approche computationnelle de la modélisation des structures de groupement musical. In McAdams and Deliège [MD88], pages 437–458.
- [Bar68] P. Barbaud. *La musique, discipline scientifique*. Dunod, 1968. (plus édité).
- [Bar88] Jean-Baptiste Barrière. L’informatique musicale comme approche cognitive : simulation, timbre et processus formels. In McAdams and Deliège [MD88], pages 181–202.
- [BM88] Mira Balaban and Neil V. Murray. Times Structures : Hierarchical Representation for Temporal Knowledge. Technical Report SUNYA:TR 88-32, Ben-Gurion:FC-TR-020 MCS-312, SUNYA and Ben-Gurion, SUNY at Albany, 1988.
- [BM89] Mira Balaban and Neil V. Murray. The Logic of Time Structures : Temporal and Nonmonotonic Features. In *IJCAI-89*, pages 1285–1290, Detroit, Michigan, 1989.
- [Che87a] Marc Chemillier. Monoïde libre et musique, deuxième partie. In *Informatique théorique et Applications*, volume 21(3), pages 379–418. Gauthier-Villars, janvier 1987.
- [Che87b] Marc Chemillier. Monoïde libre et musique, première partie : les musiciens ont-ils besoin des mathématiques ? In *Informatique théorique et Applications*, volume 21(3), pages 341–371. Gauthier-Villars, 1987.
- [Del88a] Célestin Deliège. De la forme comme expérience vécue. In McAdams and Deliège [MD88], pages 159–180.
- [Del88b] Irène Deliège. Approche perceptive de formes musicales contemporaines. In McAdams and Deliège [MD88], pages 305–326.
- [Die88] Glendon Diener. TTrees : An Active Data Structure for Computer Music. In *ICMC Proceedings*, 1988.
- [Duc88] Marie-Elisabeth Duchez. La notion musicale d’élément ”porteur de forme” : Approche historique et épistémologique. In McAdams and Deliège [MD88], pages 285–304.
- [Duf88] Hugues Dufourt. Musique et psychologie cognitive : les éléments porteurs de forme. In McAdams and Deliège [MD88], pages 327–334.
- [GA89] Malik Ghallab and Amine Mounir Alaoui. Relations temporelles symboliques : représentations et algorithmes. *Artificial Intelligence*, 3(3):67–115, 1989.
- [Gal90] Antony Galton. A Critical Examination of Allen’s Theory of Action and Time. *Artificial Intelligence*, 42:159–188, 1990.

- [Kun76] Jos Kunst. Making Sense in Music I : The use of mathematical logic. *Interface*, 5:3–68, 1976.
- [Lad87] Peter Ladkin. Models of Axioms for Time Intervals. In *Proceedings ??*, pages 234–239, 1987.
- [Lem88] Marc Leman. Dynamique adaptative de l’écoute musicale. In McAdams and Deliège [MD88], pages 503–522.
- [Liv] Pierre Livet. Logiques temporelles et temps musical. Rapport interne.
- [Mar88] Alan A. Marsden. L’écoute : un apprentissage par la découverte. In McAdams and Deliège [MD88], pages 459–476.
- [McA88] Stephen McAdams. Contraintes psychologiques sur les dimensions porteuses de forme en musique. In McAdams and Deliège [MD88], pages 257–283.
- [MD88] S. McAdams and I. Deliège, editors. *La musique et les sciences cognitives*, Actes du ”Symposium sur la Musique et les Sciences Cognitives”. Pierre Margada, éditeur, 1988.
- [MR88] Lionel Marcé and Eric Rutten. Une promenade bibliographique à travers le Temps-Robotique. Publication interne 410, IRISA/INRIA, mai 1988.
- [Pet88] Jean Petitot. Perception, cognition et objectivité morphologique. In McAdams and Deliège [MD88], pages 243–256.
- [Rio88] André Riotte. Modèles et métaphores : les formalismes et la musique. In McAdams and Deliège [MD88], pages 523–534.
- [Ris88] V. Risch. Grammaires musicales modales et Prolog II. In *Structures musicales et assistance informatique*, Actes du colloque MIM, pages 77–88, Juin 1988.
- [Rog97] Pierre-Yves Rognin. Toward a formal model of musical perception. In *Proc. of 3rd Triennial ESCOM Conference*, Uppsala, 1997.
- [Sho87] Yoav Shoham. Temporals Logics in A.I. : Semantical and Ontological Considerations. *Artificial Intelligence*, 33:89–104, 1987.
- [Sho88] Yoav Shoham. *Reasoning About Change : Time and Causation from the Standpoint of Artificial Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1988.
- [Vec88] B. Vecchione. Nouveaux théorèmes d’ Ω -Syntaxe. Rapport interne, janvier 1988.
- [WHS88] Geraint Wiggins, Mitch Harris, and Alan Smaill. An Abstract Representation for Music. 1ère version, Novembre 1988.