

VII. Temps symbolique, objets temporels/atemporels, synchronisation (*symbolic time, time/out-time objects, synchronization*)¹⁷⁶

Pour Balaban¹⁷⁷, la musique est avant tout une structure hiérarchique (éventuellement sous plusieurs aspects) organisée sur une échelle du temps. Balaban examine de manière critique différents langages de description de la musique en distinguant les représentations déclaratives¹⁷⁸, qui décrivent la musique comme une structure de données (en vue de la formalisation de partitions), et les représentations procédurales¹⁷⁹, où l'aspect temporel est partiellement défini par les structures de données et par l'exécution du programme. Dans toutes ces approches les structures de données atomiques (hauteur, durée, registre, dynamique, etc.) sont signifiantes, mais les structures de plus haut niveau sont artificielles et manquent de flexibilité:¹⁸⁰

In SCORE the music is necessarily decomposed into 'instruments' which are collections of arrays describing, each, a line of notes and their properties. PLA decomposes the music into 'voices' which are similar to SCORE's instruments, and into 'sections' which are collections of voices. Both languages enforce a rigid polyphonic view of all music, and use artificial formal constructs — collections of arrays of musical properties — to describe the music. Gourlay's language is designed for music printing, and therefore all higher level constructs correspond to partitioning of a printed score by measures.[...] The language is not appropriate for standardizing music description since the notion of hierarchy in music does not, necessarily, coincide with the measures partitioning, but rather with musical objects like parts, sections, phrases, motifs, themes, etc.¹⁸¹

On s'intéresse, dans les chapitres VII-VIII-IX, aux outils conceptuels permettant de formaliser les relations entre la description symbolique de la musique (les structures de surface du niveau syntaxique) et les caractéristiques sonologiques des "objets musicaux".

1. Sonèmes, objets musicaux, objets sonores (*sonemes, musical objects, sound-objects*)

En faisant un parallèle avec la linguistique computationnelle, on peut s'interroger sur la possibilité d'introduire une **composante sonologique** dans une grammaire formelle décrivant un idiome musical.

¹⁷⁶ L'essentiel de ce chapitre a été réédité en version anglaise (Bel 1991a) et donnera lieu à publication (Bel 1991c).

¹⁷⁷ 1990

¹⁷⁸ Erickson 1977; Byrd 1977; Smith 1973; Droman 1983; Maxwell & Ornstein 1983; Hamel 1984; Yavelow 1986; Gourlay 1986. (Tous cités par Balaban)

¹⁷⁹ Smoliar 1971; Smith 1976; Schottstaedt 1983; Cointe et Rodet 1983. (Tous cités par Balaban)

¹⁸⁰ Balaban 1990.

¹⁸¹ *Ibid.*

Honing¹⁸² affirme qu'il existe un large consensus sur l'utilisation d'éléments **discrets** (notes, événements sonores ou objets) comme primitives des représentations de la musique. Dans les approches inspirées de la linguistique et orientées vers la modélisation de partitions, on considère par exemple les notes comme des “phonèmes” de la musique. En psychologie de la musique, on se contente d'admettre l'existence d'un ensemble d'“éléments acoustiques” de base.¹⁸³ Toutefois, l'expérimentation en psychoacoustique montre qu'il est très difficile de définir ces éléments d'un point de vue strictement perceptuel.¹⁸⁴

1.1 Sonèmes et objets musicaux (sonemes and musical objects)

L'informatique permet de représenter le son aussi bien comme un phénomène **continu** que **discontinu**. Dans le premier cas, il peut s'agir d'une description de processus de synthèse (l'évolution d'un nombre fini de paramètres dans un espace de représentation adéquat) ou encore de modèles physiques dont l'évolution est jugée intéressante.¹⁸⁵ Dans le second cas, le compositeur se munit, soit de manière générale, soit pour une œuvre musicale particulière, d'un ensemble d'objets que l'on peut appeler — par analogie avec la phonétique — des **sonèmes**.¹⁸⁶

Un sonème est une classe d'événements acoustiques équivalents (ses **variantes acoustiques**).

Une taxonomie de sonèmes (les “objets musicaux”) a été proposée par Schaeffer¹⁸⁷, fondateur de la musique concrète. On pourrait l'utiliser pour formaliser une caractérisation systématique d'objets à l'aide de “traits” représentés par des variables dichotomiques, par exemple *continu/discontinu*, etc.¹⁸⁸⁻¹⁸⁹

En limitant les manipulations des objets musicaux à des opérations de collage, la musique concrète ne répondait pas entièrement aux attentes de certains compositeurs, qui ont préféré rechercher une totale liberté de manipulation dans la synthèse numérique.¹⁹⁰ Une approche sonologique aurait plutôt consisté à classer les objets d'après leur **fonction** dans un système de communication:

¹⁸² 1990

¹⁸³ Deutsch 1982. Cité par Honing 1990.

¹⁸⁴ Voir par exemple McAdams & Bregman 1985.

¹⁸⁵ Borin et al. 1990, p.234

¹⁸⁶ Il est difficile de mettre en évidence l'intentionnalité du compositeur: le choix d'une représentation discrète plutôt que continue peut résulter aussi bien d'une axiologie compositionnelle, que de contraintes imposées par un système d'écriture, ou par un environnement de tâches — par exemple, l'utilisation de matériaux échantillonnés, d'un séquenceur, etc.

¹⁸⁷ 1966

¹⁸⁸ Ce travail a été entrepris par Marco Ligabue (CNUCE de Florence) en s'inspirant de la phonologie de Jakobson (1963). Voir Chiarucci 1972 pour une approche similaire.

¹⁸⁹ Il ne faut toutefois pas confondre la caractérisation des objets (par un ensemble fini de traits) avec l'ensemble des paramètres qui permettraient de les reconstituer de manière satisfaisante par une opération de synthèse. (Voir par exemple Risset 1989a, ou Kronland-Martinet & Grossmann 1991) La reconstitution sonore d'un instrument est d'ailleurs d'un intérêt discutable dans une situation de simulation: l'évaluation, par un expert humain, des propositions de la machine risque de porter plus sur la qualité de la reconstitution du matériau sonore que sur le contenu musical.

¹⁹⁰ Risset 1989b, p.67

[...] not only do individuals and groups give different verbal meanings to music; they also conceive its structures in ways that do not permit us to regard musical parameters as objective acoustical facts. In music, thirds, fourths, fifths, and even octaves, are social facts, whose syntactical behaviour can differ as much as that of *si, see, and sea, beau, bow, and bo, or buy, bye, by and bai*.¹⁹¹

Même dans un domaine aussi restreint que celui de la musique tonale, une telle classification doit faire appel à une théorie élaborée, comme par exemple celle de Lerdahl et Jackendoff¹⁹² (voir chapitre IV §1).

A l'opposé de cette théorie,¹⁹³ une approche empiriste de la performance est celle de Katayose & Inokuchi¹⁹⁴, qui consiste à identifier et quantifier les paramètres caractéristiques d'une interprétation musicale "virtuose" dans une (très petite¹⁹⁵) partie des informations sur le geste musical.

Dans tous les cas cités, les recherches s'insèrent dans un système musical déjà formalisé¹⁹⁶ pour lequel existe à la fois un large corpus d'œuvres et un consensus sur certaines règles d'interprétation.

1.2 Objets sonores (*sound-objects*)

Dans un environnement d'informatique musicale, élaborer la composante sonologique d'une grammaire musicale impose en premier lieu de définir une correspondance entre les sonèmes et les symboles terminaux de la grammaire. Ce qui tient lieu de règles d'articulation peut être formulé, comme dans la phonologie générative de Chomsky¹⁹⁷, à l'aide de règles de réécriture.¹⁹⁸ Il est préférable toutefois, dans un souci de généralité, de considérer toute variante acoustique d'un sonème, non comme un échantillon sonore figé, mais comme le résultat d'un processus déclenché et contrôlé par des **messages**, i.e. des vecteurs de paramètres positionnés sur l'axe du temps.

On peut ainsi parler d'**objet sonore** pour désigner une structure de données qui comprend la description du processus (que nous appelons "**prototype d'objet sonore**") et un certain nombre de paramètres, propriétés et procédures qui permettent d'**instancier** les variantes acoustiques du sonème associé.¹⁹⁹ (Voir chapitre IX)

¹⁹¹ Blacking 1984, p.364

¹⁹² Jackendoff & Lerdahl 1982, pp.92-ff; Lerdahl & Jackendoff 1983.

¹⁹³ L'objet — contestable — des travaux de Lerdahl et Jackendoff est de définir un modèle de la **compétence** universelle dans le domaine de la tonalité, en référence au postulat d'innéisme de Chomsky. Voir à ce sujet la critique de Piaget (Piattelli-Palmarini 1979).

¹⁹⁴ 1990

¹⁹⁵ On se limite aux estimations de l'intensité d'attaque des notes et aux durées du maintien de la pression sur un clavier. Une étude plus détaillée du geste musical a été menée par l'équipe de l'ACROE à Grenoble. Des travaux similaires en vue d'établir des règles d'interprétation en jazz (différentes conceptions du *swing*) sont en cours au CNUCE de Florence.

¹⁹⁶ Pour Lerdahl et Jackendoff il ne s'agit que de monodie. Katayose & Inokuchi travaillent sur des pièces polyphoniques de musique classique.

¹⁹⁷ Chomsky & Halle 1973.

¹⁹⁸ On peut désigner comme **morphème** tout regroupement significatif (pas nécessairement séquentiel) "minimal" de sonèmes. Voir par exemple la notion de "vocabulaire" dans un langage de percussion, chapitre VI §7.

¹⁹⁹ Nous avons volontairement introduit ici la terminologie de la **représentation orientée objet** en informatique, en lieu et place de celle des "objets musicaux".

Un objet sonore ne produit pas nécessairement un son: il produit des messages qui sont interprétés par un générateur de sons. Certains messages peuvent ne servir qu'à modifier les objets sonores suivants.

1.3 Contraintes soniques (*sonic constraints*)

Une représentation discrète est souvent associée à une stratégie de composition **descendante** ou **guidée par les buts** (*top-down, goal-driven*) qui consiste à “instancier” une structure hiérarchique prédéfinie ou calculée à l'aide de règles de construction (une “grammaire”). Dans les représentations continues, par contre, il semble que l'on privilègerait plutôt une stratégie **ascendante** ou **guidée par les données** (*bottom-up, data-driven*) dans laquelle les structures musicales “émergent” du continuum sonore lors de l'écoute.²⁰⁰

Le système sonologique décrit dans cette étude privilégie l'approche descendante au niveau de la structure syntaxique des propositions, et l'approche ascendante au niveau de l'instanciation sonore de ces propositions.

De la même manière que la composante sonologique d'une grammaire fait le lien entre les représentations syntaxique et acoustique, cette composante peut à son tour se scinder en deux niveaux: une **matrice sonologique** qui décrit des catégories d'objets musicaux et leurs relations avec des segments de la structure de surface, et une **matrice sonique** qui décrit les propriétés des objets indépendantes des sources sonores (propriétés **acousmatiques**²⁰¹) et de leur fonction syntaxique (propriétés **asyntaxiques**).²⁰² Dans l'approche que nous préconisons, la matrice sonologique est implicitement décrite par les règles de réécriture, l'agencement final des sonèmes s'effectuant au niveau de la représentation sur le temps symbolique (voir infra et chapitre VIII). La matrice sonique, par contre, est l'ensemble des paramètres et procédures d'instanciation des objets sonores. L'instanciation est donc un problème de **résolution de contraintes**, les unes “descendant” de la structure et les autres “remontant” des objets (voir chapitre IX).

2. Le temps musical (*musical time*)

Alors qu'un énoncé linguistique est une séquence de phonèmes, une structure musicale discrète fait intervenir de multiples relations (implicites ou explicites) d'antériorité et de simultanéité entre les objets sonores. Il est donc indispensable, quelle que soit la composante sonologique d'une grammaire musicale, de disposer d'outils conceptuels permettant de formaliser ces relations temporelles.

Parmi les systèmes de représentation de la musique, on peut distinguer:²⁰³

- ceux qui ne contiennent **aucune représentation du temps**, par exemple les systèmes en temps réel;

²⁰⁰ Il est légitime de s'intéresser en priorité, dans ce cas, aux phénomènes psychoacoustiques.

²⁰¹ Terme créé par Pythagore pour désigner une forme d'enseignement où le maître est caché de ses élèves, et repris par le compositeur Pierre Schaeffer pour désigner une écoute qui s'intéresse au contenu, et non à l'origine des sons. (Schaeffer 1966, p.91)

²⁰² Laske 1972a, p.30-3.

²⁰³ Cette classification est inspirée de Honing (1990).

- ceux qui attribuent des **marques temporelles** aux objets sonores: points ou durées, sur un temps absolu, relatif, ou partiellement défini par des informations fournies en temps réel;²⁰⁴
- ceux qui contiennent un encodage explicite des **relations temporelles**: logiques temporelles²⁰⁵, représentations orientées objet²⁰⁶, types de données abstraits (*abstract data types*) en langage fonctionnel ou en logique des prédicats²⁰⁷, etc.

Une limitation de nombreux modèles est l'absence de prise en compte de **propriétés** du temps musical et des objets qui pourraient conditionner leur positionnement temporel en fonction du contexte. Par conséquent, les systèmes (autres que ceux basés sur le temps réel) souffrent d'une rigidité qui les confine souvent à l'exécution de maquettes sonores. Par exemple, à toute séquence de symboles on fait correspondre une interprétation (unique) des objets sonores correspondants sans tuilage possible des intervalles supports temporels contigus. On reproduit ainsi, dans un modèle présumé général, des contraintes aussi limitatives que celles liées à la notation tonale et au temps métronomique.

Nous proposons dans le cadre de cette étude une approche nouvelle qui consiste à distinguer deux niveaux: celui de la **représentation symbolique** sur un temps gradué, et celui de la **représentation sonétique** sur le temps physique. La mise en temps des objets sonores fait intervenir à la fois la représentation symbolique (les **dates symboliques** des objets), une correspondance arbitraire entre temps symbolique et temps physique (**structure du temps**), des **contraintes** liées à des propriétés attachées aux objets, et, le cas échéant, des décisions du compositeur quant aux solutions envisagées. (Voir chapitre IX)

Les relations de simultanéité entre objets ne sont pas nécessairement explicitées dès le départ au niveau symbolique: la relation est explicite, non sur des *objets*, mais sur des *séquences* d'objets. Le système est en mesure de déduire les relations entre objets en faisant une hypothèse de moindre complexité lorsque les informations sont incomplètes. (Voir §8-9 et chapitre VIII)

Notre approche a été moins guidée par la recherche d'un formalisme méta-musical (transculturel) que par celle de solutions efficaces²⁰⁸ à certains problèmes de traitement du temps communs à la notation rythmique instrumentale et à la musique électroacoustique. Nous présentons en premier lieu l'environnement informatique dans lequel s'est effectuée cette implémentation.

²⁰⁴ Voir par exemple les méthodes de synchronisation de Dannenberg 1984; Vercoe 1984.

²⁰⁵ Balaban & Neil 1989; Balaban 1990.

²⁰⁶ Diener 1988; Camurri & al. 1990.

²⁰⁷ Smaill & Wiggins 1990.

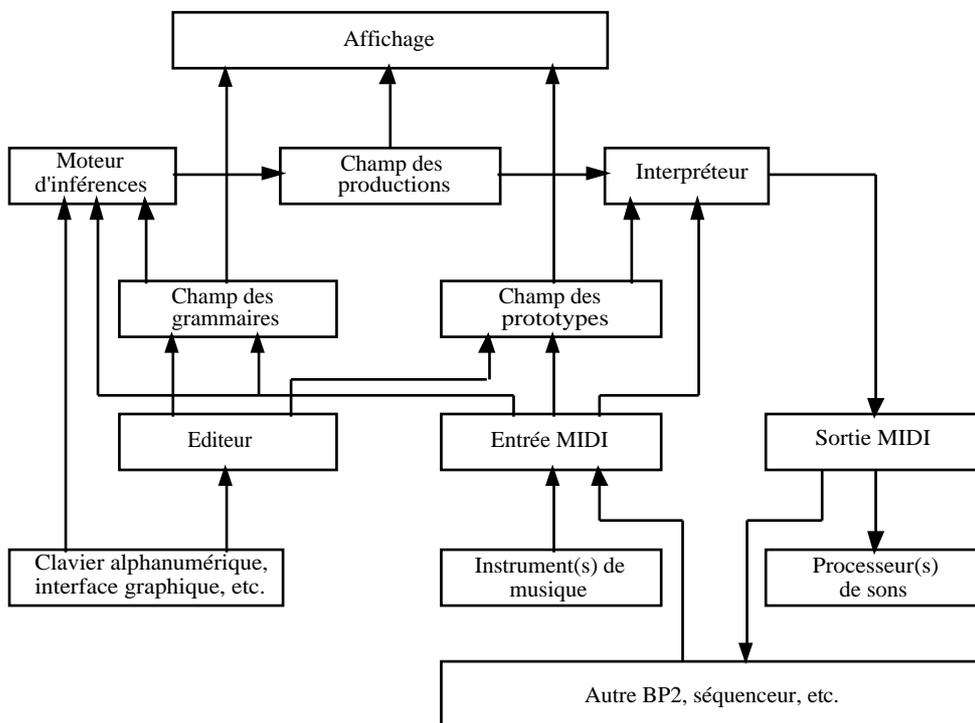
²⁰⁸ L'efficacité consiste ici à rechercher des algorithmes de faible complexité qui peuvent être implémentés avec des langages de programmation de bas niveau.

3. *Bol Processor BP2* — l'environnement (*BP2 environment*)

Dans cette version du *Bol Processor*, l'accent a été mis sur la réduction de la durée du **cycle de vie compositionnel** (*compositional life cycle*²⁰⁹), en permettant l'écoute directe d'ébauches musicales. Pour cela, le système a été relié à un processeur de sons en temps réel.²¹⁰

Les travaux se sont orientés vers la recherche de procédures permettant divers modes de contrôle des réalisations, depuis le mode “automatique” qui laisse à la machine l'initiative des décisions, jusqu'au mode “pas-à-pas” qui permet l'exploration manuelle d'un ensemble de solutions.

Un schéma synoptique du *Bol Processor BP2* est le suivant:



Trois champs sont utilisés pour mettre en mémoire des **grammaires**, des **productions** grammaticales et des **prototypes d'objets sonores** définis à l'aide d'un instrument de musique ou d'un clavier alphanumérique. Les productions sont des représentations symboliques (chaînes de caractères ou graphèmes) de structures musicales. Elles sont interprétées puis transmises au(x) processeur(s) de sons sous forme de messages en temps réel.

L'interprétation d'une production tient compte des propriétés des objets (au niveau sonore: continuité, déformabilité, etc., voir §1.3), qui ne sont pas explicitées par la grammaire. La résolution de ces contraintes permet de transformer une structure

²⁰⁹ Laske 1989a, p.47

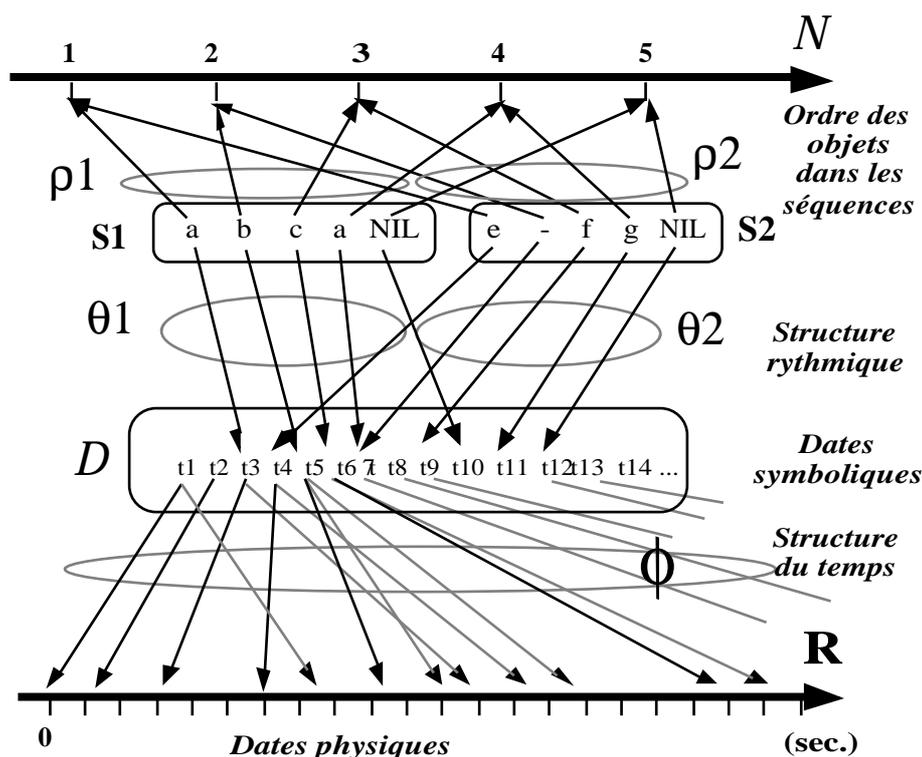
²¹⁰ Le système SYTER (SYnthèse en TEmps Réel), conçu par J.F. Allouis à l'INA-GRM. On peut utiliser n'importe quel processeur muni d'une interface MIDI.

temporelle “symbolique” (construite sur un ensemble arbitraire totalement et strictement ordonné) en une liste de dates et de paramètres d'exécution des objets. (Voir chapitre IX) L'algorithme de résolution fournit un ensemble fini (parfois très grand) de solutions que le compositeur est libre d'explorer lorsqu'il ne souhaite pas se contenter de la première solution.

Le schéma du BP2 indique aussi des possibilités de contrôle extérieur, à la fois du moteur d'inférence, des grammaires et du module d'interprétation. Ces contrôles sont essentiellement destinés à la composition improvisationnelle. Ils sont provoqués, soit par des interventions manuelles (clavier de contrôle, contrôleurs MIDI), ou encore par des messages en provenance d'une autre machine dialoguant avec le BP2.²¹¹

4. Temps symbolique et objets temporels (*symbolic time and time-objects*)

La notion de **temps symbolique** se rapproche de celle de *basic time* de Jaffe²¹², ou encore du *virtual time* dans l'environnement de programmation musicale *Formula*²¹³. Nous introduisons la terminologie à partir d'un exemple utilisant la notion intuitive de “séquence”, terme que nous définirons ultérieurement (chapitre VIII §1). La figure ci-dessous représente une structure formée de deux séquences notées symboliquement “abca” et “e-fg”, où “a”, “b”, “c”, “e”, “f”, “g” et “-” sont des **étiquettes d'objets sonores**:



²¹¹ On peut ainsi mettre en interaction plusieurs grammaires/automates pour faire de la “composition distribuée” en temps réel.

²¹² 1985

²¹³ Anderson et Kuivila 1989, pp.11-23.

L'application ρ (**indexage**) sert à définir la relation d'ordre strict des objets dans chaque séquence. Nous considérons par ailleurs $D = \{t_1, t_2, \dots\}$, un ensemble totalement et strictement ordonné de **dates symboliques**, et θ une application *injective* de S dans D que nous appelons la **structure rythmique** de la séquence. Nous appelons **objet temporel** le couple $(x, \theta(x))$, où “ x ” représente l'étiquette d'un objet sonore et $\theta(x)$ sa date symbolique. Par convention, $\theta \circ \rho^{-1}$ est une fonction monotone croissante.

L'étiquette “-” désigne ici un silence, objet qui ne bénéficie d'aucun statut particulier. Les silences doivent être distingués des **objets vides** que nous étiquetons “_”.²¹⁴ Un objet vide est la prolongation de l'objet, vide ou non, qui le précède.

Les deux séquences de l'exemple peuvent être représentées simultanément dans un tableau dont les lignes correspondent aux séquences et les colonnes aux dates symboliques:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
-	-	a	-	b	c	a	-	-	NIL	-	-	-	-
-	-	-	e	-	-	-	-	f	-	g	NIL	-	-

Toute case du tableau qui ne contient pas une étiquette d'objet non vide contient le symbole “_”.

Nous appelons **structure du temps**²¹⁵ l'application Φ qui associe à toute date symbolique une date physique. L'ensemble image de Φ est une partie de \mathbb{R} , où les dates sont représentées avec une unité de temps convenable. Φ n'est pas nécessairement une fonction monotone croissante,²¹⁶ mais nous envisageons uniquement ce cas. Lorsque la monotonie est vérifiée, soit

$$t_i < t_j \Leftrightarrow \Phi(t_i) < \Phi(t_j)$$

on peut construire une distance Δ sur D :

$$\Delta(t_i, t_j) = | \Phi(t_j) - \Phi(t_i) |$$

Puisque

$$\forall i, j, k, \Delta(t_i, t_j) + \Delta(t_j, t_k) \geq \Delta(t_i, t_k),$$

(D, Δ) est un espace métrique. Cet espace est, de plus, euclidien si la propriété

²¹⁴ Dans la notation tonale numérique chinoise, les silences sont notés avec le chiffre “0” et les objets vides avec le symbole “-”. Dans la notation indienne tonale de V.N. Bhatkhande, on utilise “S” pour le silence et “-” pour l'objet vide. Enfin, dans celle des percussions indiennes, on confond silence et objet vide.

²¹⁵ Xenakis distingue les structures hors-temps, la structure du temps et la structure temporelle (1963, pp.190-1,200). La notion de structure du temps que nous introduisons ici correspondrait à celle de structure temporelle.

²¹⁶ Jaffe (1985, p.40) ne s'intéresse qu'aux fonctions strictement monotones. Par contre il règle le problème de la polyphonie en utilisant une fonction Φ distincte pour chaque voix (*op.cit.* pp.44-ff).

$$j - i = 1 - k \Rightarrow \Phi(t_j) - \Phi(t_i) = \Phi(t_l) - \Phi(t_k)$$

est vérifiée. Cette situation correspond au **temps métronomique**.

5. Durée symbolique d'un objet temporel (*symbolic duration of a time-object*)

Dans le tableau précédent, on pourrait appeler durée symbolique d'un objet dont l'étiquette figure dans la colonne i la valeur de $(j-i)$, où j est l'index de la colonne de l'objet non vide suivant sur la même ligne. Dans ce but on a placé un objet non vide "NIL" en fin de chaque séquence. Avec cette convention, les séquences d'objets temporels peuvent être représentées par des listes de couples (étiquette, durée symbolique):

$$(a,2) (b,1) (c,1) (a,3) \quad (e,2) (-,3) (f,2) (g,1)$$

ce qui peut s'écrire plus simplement:

$$a _ b _ c _ a _ _ \quad e _ - _ - _ f _ g$$

Cette définition de la durée symbolique correspond au cas où l'ensemble des dates symboliques D est une partie de l'ensemble des entiers naturels N . Une autre option, que nous avons discutée en détail par ailleurs²¹⁷, consiste à prendre pour D une partie de l'ensemble des nombres rationnels Q . Dans ce cas, en effet, on peut insérer une infinité de dates intermédiaires entre deux dates distinctes données.

Durée symbolique: définition

La **durée symbolique** du n -ième objet temporel²¹⁸ s_n dans une séquence S est la différence $\theta(s_{n+p}) - \theta(s_n)$, où s_{n+p} est le prochain objet non vide consécutif à s_n dans la séquence S .

Remarque: on a $p > 1$ si s_{n+1} est un objet vide.

6. Objets atemporels (*out-time objects*)

Le formalisme introduit précédemment ne permet de manipuler que des objets de durée symbolique strictement positive. Cette approche n'est pas satisfaisante pour un grand nombre d'applications musicales. Il est difficile, par exemple dans le cas de la notation classique tonale, de caractériser la durée d'un objet aussi "fugitif" qu'une appoggiature brève, même au prix d'une quantification très fine des durées.

En fait, les structures musicales qui manipulent de tels objets peuvent être vues comme intermédiaires entre l'homophonie et la polyphonie. Les modes d'exécution des ornements (appoggiature, *gruppetto*, mordant, etc.) sont dans ce cas fortement liés au

²¹⁷ Bel 1990e, pp.118-21.

²¹⁸ On utilise une définition différente pour la durée symbolique des objets sonores (voir chapitre IX §2.1).

traitement de la “matière” sonore. Dans une représentation informatique destinée à l'exécution mécanique, deux approches sont possibles:

- 1) On rattache l'ornement à l'objet sonore qu'il modifie (en général, l'objet suivant dans la séquence), au risque de multiplier les définitions d'objets;
- 2) On utilise une représentation symbolique particulière pour certains ornements.

C'est l'approche (2) qui justifie la création d'un nouveau type d'objets, les **objets atemporels**. Un objet atemporel a une durée symbolique nulle. Si “c” désigne un objet temporel et $\langle\langle a \rangle\rangle$, $\langle\langle b \rangle\rangle$, ... des objets atemporels, la chaîne

$$\langle\langle a \rangle\rangle c$$

représente une structure sonore dans laquelle $\langle\langle a \rangle\rangle$ est déclenché en même temps que “c”. On peut écrire:

$$\langle\langle a \rangle\rangle \langle\langle b \rangle\rangle = \langle\langle b \rangle\rangle \langle\langle a \rangle\rangle$$

dans la mesure où les dates symboliques de ces deux objets atemporels sont identiques.

Un objet atemporel peut représenter un objet sonore (i.e. une séquence de messages qui produisent des sons), mais dans ce cas les messages sont envoyés simultanément (voir chapitre IX §1). La durée perçue de l'objet sonore représenté par un objet atemporel n'est toutefois pas nécessairement nulle; on peut imaginer par exemple un son percussif (cordophone *pizzicato*, membranophone, etc.).

Une autre application typique des objets atemporels est l'envoi de messages “non musicaux” pour la communication de paramètres d'exécution ou de messages de synchronisation entre machines.

Un objet atemporel est représenté par un couple $(\langle\langle x \rangle\rangle, \theta(x))$ dans lequel “x” est l'étiquette d'un objet sonore et $\theta(x)$ sa date symbolique.

7. Temps lisse et temps strié (*smooth and streaked time*)

Les notions de temps **lisse** et de temps **strié** (*smooth/streaked time*) ont été introduites par Boulez²¹⁹ pour caractériser deux situations typiques de l'interprétation musicale. Ces notions peuvent être ramenées à des propriétés de la structure Φ du temps.

Si l'application Φ est connue à l'avance, les interprètes (humains ou mécaniques) doivent ajuster les durées des objets afin de satisfaire les contraintes de “voisinage” (voir infra). Cette situation est celle du **temps strié**: “la pulsation du temps *strié* sera régulière ou irrégulière, mais systématique”.²²⁰ Par pulsation “régulière” on désigne ici une structure du temps qui se rapproche, au moins localement, de celle du temps métronomique.

Au temps strié Boulez oppose le **temps lisse**, que l'on peut associer à une structure du temps déterminée au moment de l'exécution.

²¹⁹ 1963

²²⁰ Boulez 1963, p.104. Le qualificatif “systématique” pourrait s'appliquer, dans le cas d'une musique interprétée par une machine, à toute structure perçue comme “non arbitraire”. Une telle définition, aussi simple qu'elle puisse paraître, met l'accent sur l'importance des mécanismes de perception.

Si la distinction entre temps lisse et temps strié, pour une musique interprétée par des humains ou (et) sous la direction d'un humain, se situe au niveau perceptif, c'est au niveau des algorithmes de mise en temps qu'il faut l'envisager dans le cas de musiques interprétées par des machines. Une structure de temps **strié** est une liste croissante de dates physiques sur lesquelles les objets doivent être positionnés: à chaque objet correspond une **strie de référence**. Une structure du temps **lisse** peut être définie comme une liste de dates indéterminées, chaque objet étant alors considéré comme "relocalisable".

8. Problème de la synchronisation (*the synchronization problem*)

Nous posons ici de manière abstraite le problème de la synchronisation d'événements. Au §9 sont présentées les conditions qui définissent une classe d'univers d'événements formés de séquences, ainsi qu'un ensemble de conventions qui permettent de résoudre le problème dans ce cas. L'application de cette représentation aux structures d'objets temporels, et l'algorithme de résolution des contraintes correspondant, font l'objet du chapitre VIII.

8.1 Univers d'événements (*event universe*)

Nous appelons **univers d'événements** un ensemble E structuré par trois²²¹ relations:

- 1) une relation d'ordre strict appelée "antériorité" et notée '<';
- 2) une relation d'équivalence appelée "simultanéité" et notée '=';
- 3) une relation d'ordre strict appelée "séquentialité" et notée '&';

et remplissant les **conditions de cohérence** suivantes:

$$\begin{aligned} \forall (e_1, e_2, e_3) \in E^3, \\ e_1 \& e_2 \Rightarrow e_1 < e_2; \\ e_1 \& e_2 \text{ et } e_2 = e_3 \Rightarrow e_1 \& e_3; \\ e_1 < e_2 \Rightarrow \text{on n'a pas } e_1 = e_2; \\ e_1 < e_2 \text{ et } e_2 = e_3 \Rightarrow e_1 < e_3. \end{aligned}$$

Remarque: on peut prouver de même: $e_1 < e_2$ et $e_1 = e_3 \Rightarrow e_3 < e_2$.

" $a < b$ " se lit "a précède b". " $a \& b$ " se lit "a puis b".

On considère le graphe bicolore non orienté G tel que:

$$e_1 < e_2 \quad \text{ou} \quad e_1 = e_2 \Rightarrow G(e_1, e_2)$$

²²¹ On peut aussi n'introduire que deux relations, celle d'antériorité étant un ordre réflexif et antisymétrique. La simultanéité de deux événements est alors leur antériorité réciproque.

8.2 Problème de la synchronisation (*the synchronization problem*)

En général, le graphe G n'est pas complet, ce qui revient à dire qu'il existe des couples d'événements qui ne sont pas comparables par ' $<$ ' ni par '='.

Résoudre le **problème de la synchronisation** sur E revient à inférer assez de relations d'antériorité et de simultanéité pour que les fermetures transitives de ' $<$ ' et de '=' produisent un graphe G complet. Nous appelons **univers complet** un univers d'événements tel que G est complet.

On remarque que les relations de séquentialité "&" ne servent ici qu'à déduire des relations d'antériorité. La séquentialité n'est qu'une donnée supplémentaire qu'on pourra utiliser lorsque les événements sont des intervalles temporels.

8.3 Le temps dans un univers complet d'événements (*time in a complete event universe*)

Lorsque le graphe G est complet on peut définir un temps gradué sur E . On construit le quotient de E par la relation d'équivalence "=". Les classes obtenues sont strictement ordonnées par "<". La date de chaque classe est son rang dans cet ordre.

Inversement, étant donné un ensemble de points temporels sur un temps gradué, on peut toujours construire un graphe complet G à partir des relations "<" et "=" sur les dates de ces points.

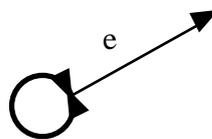
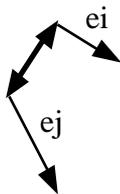
La représentation d'un univers complet d'événements par un ensemble de points temporels sur un temps gradué est donc isomorphe de celle par les relations "=" et "<". Par contre elle ne permet pas de représenter la relation "&" ni de décrire un univers incomplet.

8.4 Représentation graphique (*graphic representation*)

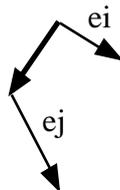
- 1) Chaque événement est représenté par un arc orienté:



- 2) Les relations $e_i = e_j$ et $e = e$ (réflexivité) sont représentées:



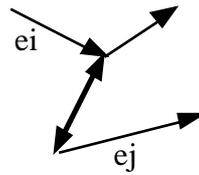
- 3) La relation $e_i < e_j$ est représentée:



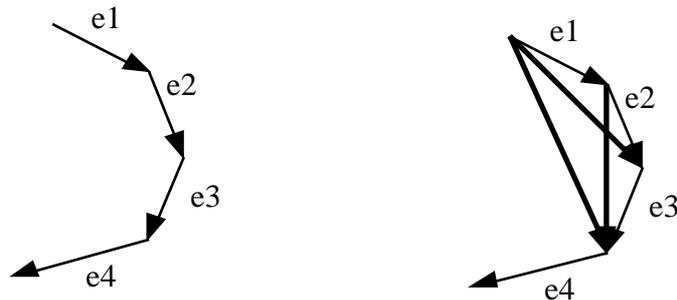
- 4) La relation $e_i \& e_j$ est représentée:



ou de manière équivalente:



- 5) Dans tout univers d'événements, on peut ne représenter qu'un sous ensemble des relations, choisi de sorte que le graphe G puisse être obtenu à partir des fermetures transitives de ces relations. Par exemple, une séquence est représentée par un graphe unilinéaire et permet toujours de déduire un graphe complet:



9. Synchronisation de séquences (synchronizing sequences)

On s'intéresse ici à une classe d'univers d'événements formés de séquences, pour laquelle existe une représentation parenthésée simple à partir de laquelle on peut résoudre de manière efficace le problème de la synchronisation.

On pose comme première hypothèse que E est un ensemble fini partitionné en k séquences:

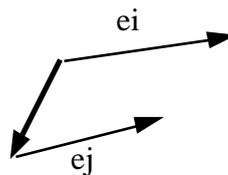
$$E = S_1 \cup \dots \cup S_k$$

chaque séquence étant totalement ordonnée par '&'.

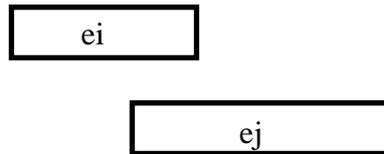
Remarque

Un univers complet dans lequel les événements sont des intervalles temporels (de durées connues) peut toujours être partitionné en séquences. On peut en effet écrire une relation de séquencement entre deux événements quelconques à condition de créer de nouveaux événements qui ne servent qu'à la synchronisation.

Soient par exemple deux événements non séquentiels:



dont les intervalles supports temporels sont dans la relation $\beta_4(e_i, e_j)$:

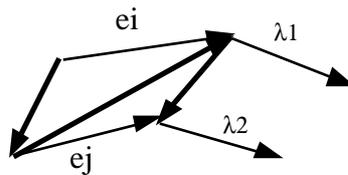


(Voir chapitre IX §5)

On crée deux événements λ_1 et λ_2 tels que:

$$e_i \& \lambda_1, \quad e_j \& \lambda_2, \quad e_j < \lambda_1, \quad \lambda_1 < \lambda_2,$$

ce qui donne la représentation:



qui contient toute l'information sur le séquençement. Les événements e_i et e_j appartiennent maintenant à des séquences. ■

On note chaque séquence S_i comme une chaîne:

$$S_i = e_{i1} \dots e_{ip} \quad \text{telle que} \quad e_{ij} < e_{ik} \iff j < k$$

On note ' \ll ' la relation d'ordre strict sur $\{S_1, \dots, S_k\}$ telle que:

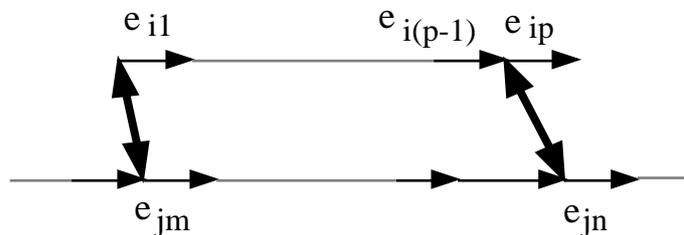
$$S_i \ll S_j \iff$$

$$\forall e_{ip} \in S_i, \forall e_{jq} \in S_j, e_{ip} < e_{jq}$$

On note par ailleurs ' \angle ' la relation d'ordre large sur $\{S_1, \dots, S_k\}$ telle que:

$$S_i \angle S_j \quad \text{avec} \quad S_i = e_{i1} \dots e_{ip} \quad \text{et} \quad S_j = e_{j1} \dots e_{jq} \iff$$

$$\exists m \in [1, p] \mid e_{i1} = e_{jm} \quad \text{et} \quad \exists n \in [1, q] \mid e_{ip} = e_{jn}$$



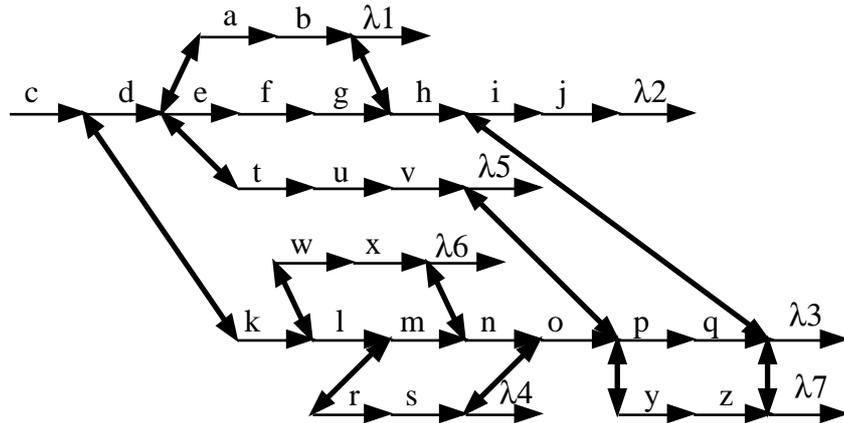
Remarque: l'événement e_{ip} en fin de séquence S_i ne sert qu'à la synchronisation de la séquence. Nous utiliserons plus tard une notation particulière pour cet événement.

9.1 Propriétés imposées aux univers incomplets d'événements (*properties imposed on an incomplete event universe*)

L'ensemble des séquences $\{S_1, \dots, S_k\}$ est tel que:

- 1) l'ordre ' \angle ' est total;
- 2) $S_i \angle S_1$ et $S_j \angle S_1 \Rightarrow$
 $S_i \ll S_j$ ou $S_j \ll S_i$
 ou $(S_i \angle S_j \text{ et } S_j \angle S_i)$.

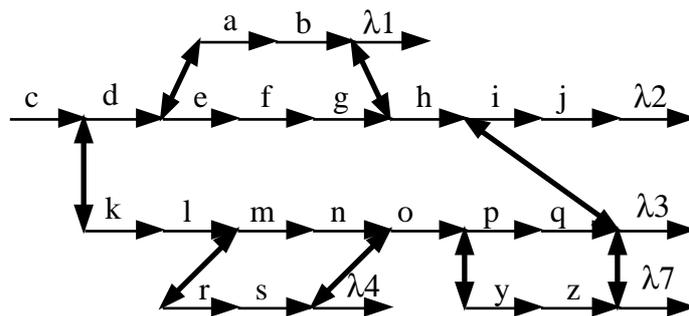
Ces propriétés sont faciles à illustrer graphiquement. Elles ne sont pas vérifiées dans l'univers suivant, bien qu'il soit partitionné en séquences:



En effet, l'ordre ' \angle ' n'est pas total puisqu'aucun couple ordonné par ' \angle ' ne contient la séquence "tuv...". De plus, on devrait avoir la relation ' \ll ' entre "wx..." et "rs", puisqu'on a:

$$\text{"wx..."} \angle \text{"klmnop..."} \text{ et } \text{"rs..."} \angle \text{"klmnop..."}.$$

Les propriétés sont par contre vérifiées dans l'univers suivant:



que l'on peut représenter par une expression parenthésée:

$$c \{ d \{ e f g, a b \} h, k l \{ m n, r s \} o \{ p q, y z \} \} i j$$

On remarque que les événements $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ ne figurent pas dans l'expression. Leur rôle est donc uniquement de “marquer” les fins de séquences.²²²

D'autres expressions équivalentes peuvent être écrites en utilisant la propriété:

$\forall A, B \in E^*, \{A, B\}$ représente la même structure que $\{B, A\}$.

Théorème VII.1

Si l'on peut associer à chaque événement e_i une date symbolique t_i (dans un ensemble strictement et totalement ordonné D) et si l'univers E est partitionné en séquences, alors il possède les propriétés définies ci-dessus.

Preuve

On a vu qu'un univers de points temporels était nécessairement complet.

Soient deux séquences arbitraires:

$$S_i = e_{i1} \dots e_{ip} \text{ et } S_j = e_{j1} \dots e_{jq}$$

Si l'on a $e_{i1} < e_{j1}$, alors on peut remplacer S_j par:

$$\lambda_j e_{j1} \dots e_{jq} \text{ tel que } e_{i1} = \lambda_j .$$

(On procède de manière symétrique si $e_{j1} < e_{i1}$.)²²³

De manière similaire, si $e_{ip} < e_{jq}$ on peut remplacer S_i par:

$$e_{j1} \dots e_{jq} \lambda_i \text{ tel que } e_{ip} = \lambda_i .$$

(De manière symétrique si $e_{jq} < e_{ip}$.)

On a maintenant $S_i < S_j$ et $S_j < S_i$. En transformant ainsi chaque paire de séquences on obtient ainsi un ordre total “ $<$ ” qui respecte les propriétés. ■

Remarque: cette construction est triviale, mais en général il existe d'autres représentations plus pertinentes. On peut par exemple chercher à minimiser le nombre d'événements λ créés.

9.2 Notion de “tempo” (notion of “tempo”)

On décide maintenant d'associer à tout élément e_i d'un univers d'événements E un nombre rationnel strictement positif $V(e_i)$ que l'on appelle son **tempo**. On convient qu'il est possible d'inférer des relations ‘ $<$ ’ et ‘ $=$ ’ entre événements dans le cas suivant:

Règle d'inférence

Soient deux sous-séquences $\sigma_i \subset S_i$ et $\sigma_j \subset S_j$ telles que:

$$\sigma_i = e_i \dots e_{i+p}, \quad \sigma_j = e_j \dots e_{j+p}, \quad e_i = e_j$$

Les propositions suivantes sont vraies:

²²² Voir les objets ‘NIL’ en fin de séquence dans les représentations en tableau de structures polymétriques, §4 ou chapitre IX §2.

²²³ En musique, les λ sont par exemple des silences.

$$\sum_{l=i}^{i+p-1} \frac{1}{\sqrt{e_l}} = \sum_{l=j}^{j+q-1} \frac{1}{\sqrt{e_l}} \Rightarrow e_{i+p} = e_{j+q}$$

$$\sum_{l=i}^{i+p-1} \frac{1}{\sqrt{e_l}} < \sum_{l=j}^{j+q-1} \frac{1}{\sqrt{e_l}} \Rightarrow e_{i+p} < e_{j+q}$$

Remarque

Les conditions de cohérence (voir §8.1) ne sont pas toujours respectées pour des valeurs arbitraires de tempos.

Théorème VII.2

Si tous les tempos des événements d'un univers d'événements E possédant les propriétés définies au §9.1 sont connus, alors le problème de synchronisation est résolu.

Preuve

L'univers étant partitionné en séquences, à chaque séquence est associé un sous-graphe complet de G. Soient deux séquences S_i et S_j telles que $S_i \angle S_j$.

Posons:

$$S_i = e_{i1} \dots e_{ip}, S_j = e_{j1} \dots e_{jq}, m \in [1, q], n \in [1, q], e_{i1} = e_{jm}, e_{ip} = e_{jn}.$$

En posant $\sigma_i = e_{i1}$ et $\sigma_j = e_{jm}$ on peut inférer la relation entre e_{i2} et $e_{j(m+1)}$. Puis on pose $\sigma_i = e_{i1} e_{i2}$ et $\sigma_j = e_{jm} e_{j(m+1)}$, ainsi de suite. Par ailleurs, on prouve facilement que

$$\forall l \in [1, m[, e_{jl} < e_{il}$$

$$\text{et } \forall l \in]n, q] , e_{ip} < e_{jl}.$$

Donc tous les éléments de S_i sont comparables aux éléments de S_j .

Si $S_i \angle S_1$ et $S_j \angle S_1$ alors $S_i \ll S_j$ ou bien $S_j \ll S_i$. Dans les deux cas tous les éléments de S_i sont comparables aux éléments de S_j .

Enfin, si $S_i \angle S_1$ et $S_j \angle S_m$, sachant que la restriction de G aux couples de $S_1 \cup S_m$ est un graphe complet, alors on peut compléter G pour $S_i \cup S_1$ puis pour $S_m \cup S_j$, et enfin, en utilisant les règles de transitivité, pour $S_i \cup S_j$. ■

9.3 Détermination des tempos (*tempo assignment*)

On considère un univers d'événements E possédant les propriétés définies au §9.1. Les règles proposées ici seront illustrées au chapitre VIII dans le cas des structures polymétriques.

9.3.1 Marque explicite

On peut indiquer le tempo d'un événement e_i en le faisant précéder, dans la séquence, d'une marque explicite de tempo, que nous notons '1/n'. Ainsi, si l'on écrit:

$$1/n e_i$$

alors

$$V(e_i) = n$$

On peut montrer qu'en l'absence de marque explicite de tempo, les règles 9.3.2 à 9.3.5 respectent la cohérence de l'univers d'événement.

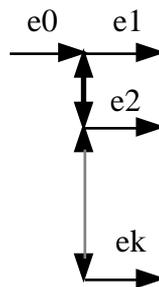
9.3.2 Tempo par défaut

Au début de la séquence maximale pour la relation '∠', sauf indication contraire explicite, le tempo vaut 1.

9.3.3 Propagation après divergence

Si $e_0 e_1$ est une séquence, et si $e_1 = e_2 = \dots = e_k$, alors

$$\exists i \in [1, k] \text{ tel que } V(e_i) = V(e_0) \text{ ou } V(e_i) \text{ est imposé explicitement.}$$



Lorsque plusieurs séquences sont synchronisées, et qu'aucune ne débute par une marque explicite de tempo, on en choisit donc une au moins qui débute avec le tempo du dernier événement précédant la divergence.

Dans les formules polymétriques (chapitre VIII) la séquence choisie est le premier argument de l'expression parenthésée (voir §2.1, convention 6).

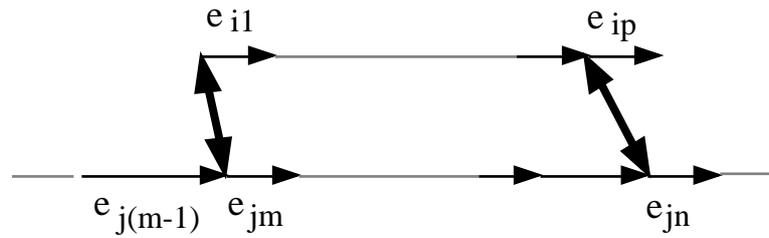
9.3.4 Propagation après convergence

Dans le cas où $S_i \angle S_j$, avec

$$S_i = e_{i1} \dots e_{ip}, S_j = e_{j1} \dots e_{jq}, m \in [1, q], n \in [1, q], e_{i1} = e_{jm}, e_{ip} = e_{jn},$$

on a

$$V(e_{j(m-1)}) = V(e_{jn})$$



9.3.5 Propagation dans une séquence

Si $e_i e_j$ est une séquence, et s'il n'existe pas k tel que $e_j = e_k$, alors

$$V(e_j) = V(e_i)$$

Remarque: e_j n'est pas précédé d'une marque explicite de tempo.

Les règles du §9.3 permettent de déterminer certaines valeurs de tempo, et par conséquent d'inférer des relations '<' et '=' entre événements de E . Pour résoudre le problème de la synchronisation, il est par ailleurs nécessaire de choisir, pour les tempos non déterminés, des valeurs qui respectent la cohérence de E . Le chapitre VIII traite ce cas en considérant des objets temporels ou atemporels, ordonnés par un ensemble de dates symboliques (**structure polymétrique**). Le problème se ramène alors au calcul des dates inconnues, ou, ce qui revient au même, des durées symboliques des objets dans les séquences.

Le chapitre IX s'intéresse à l'**instanciation** (la "mise en temps") des structures polymétriques prenant en compte des descriptions prototypiques des objets sonores et de leurs propriétés **métriques** et **topologiques**. Cette opération tient compte de contraintes de "voisinage" des objets dans les séquences. L'ensemble solution du système de contraintes est en général infini, et l'algorithme proposé permet de trouver, soit la première, soit toutes les solutions d'une partie finie de cet ensemble (**solutions canoniques**).