



# Calculer le temps musical

Myriam Desainte-Catherine

Université de Bordeaux, LaBRI, IPB, SCRIME

*Journées d'Informatique Musicale 21 Mai 2017*

# Calculer le temps musical

## Questions

- ▶ Comment combiner le temps et les autres dimensions musicales ?
- ▶ Comment structurer le temps ?
- ▶ Comment jouer avec le temps ?

## Plan

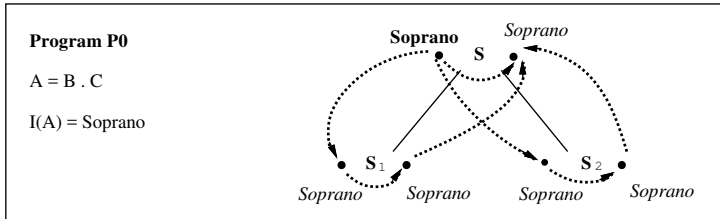
- ▶ Combiner le temps et les autres dimensions musicales : une première approche
- ▶ Structurer le temps pour la composition
- ▶ Structurer le temps pour l'écriture et la performance : temps linéaire et temps arborescent
- ▶ Combiner le temps et le son : vers une combinaison de la forme et de la structure ?

# Combiner le temps et les autres dimensions musicales

## Une première approche

- ▶ Opérateurs de concaténation et superposition
- ▶ Hiérarchies musicales avec règles sémantiques et attributs musicaux
- ▶ Spécification : programme équationnel

$$\begin{aligned} S \longrightarrow S.S \quad & \text{if } l_1(S) \text{ is set then } l_2(S) = l_1(S) \\ & l_1(S_1) = l_1(S) \\ & l_1(S_2) = l_1(S) \\ & \text{else } l_2(S) = \{l_2(S_1), l_2(S_2)\} \end{aligned}$$



# Combiner le temps et les autres dimensions musicales

- ▶ Mira Balaban's Music Structures typed functional language
- ▶ Starting date.
- ▶ Ending date.
- ▶ List of musical sub-pieces (possibly empty) and their Occurrence date.

p = -30, 80, [p1, -20], [p2, -5], [p3, 50]  
p1 = {-10, 55, a1, ..., ak}  
p2 = {5, 55, b1, ..., bk2}  
p3 = {0, 30, g1, ..., gk3}

- ▶ « *Music Structures : a Temporal Hierarchical Representation for Music* », Mira Balaban, Musikometrika, vol.2 pp1-50, 1989
- ▶ « *Time structures : A temporal Ontology based on Interleaving Time and Hierarchy* », 1991
- ▶ « *Hierarchy, Time and Inheritance in Music Modelling* », 1992, Mira Balaban

# Combiner le temps et les autres dimensions musicales

Bilan – Journées d'Informatique Musicale 1994

## ► Analyse musicale :

- Dépendance forte entre expressivité des relations musicales et la décomposition temporelle
- Relations *musico-temporelles* : relations musicales exprimées en chaque noeud de la hiérarchie
- Choix de la décomposition guidée par les relations musicales à représenter
- Une analyse dimensionnelle implique au moins une décomposition temporelle

## ► Expressivité

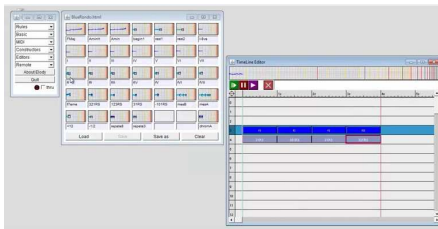
- + Il existe toujours une décomposition possible
- Chevauchements exprimés par décompositions de motifs musicaux

Antoine Bonnet « *Situation : un logiciel de programmation par contraintes pour l'aide à la composition musicale* », JIM'94 Bordeaux

# Structuration du temps pour la composition musicale

## Contexte initial

- ▶ Studio de Création et de Recherche en Musique Électroacoustique (SCRIME)  
1996 – JIM'98
- ▶ GRAME
  - ▶ G-calcul – JIM'94
  - ▶ ELody – JIM'97
- ▶ IRCAM : Patchwork, Open Music (JIM'97)
  - ▶ Paradigme fonctionnel et objet
  - ▶ Langage visuel



- ▶ Horacio Vaggione, « *Vers une approche transformationnelle en CAO* », JIM'96, Tatihou. Interaction et récursion entre écriture et traitement algorithmique

# Structuration du temps pour la composition musicale

## Processus de composition musicale

- ▶ Construction progressive d'un projet
- ▶ Edition : modifications, ajouts, destructions d'éléments de la pièce
- ▶ Gestion de l'incertitude : cohérence d'une pièce en construction
  - ▶ Modifier des éléments en respectant la cohérence
  - ▶ Modifier la cohérence

## Exemple : systèmes basés pistes

- ▶ Structure temporelle fixée
  - ▶ Une pièce : (p1 | p2 | ... | pn)
  - ▶ Une piste : (e1 . e2 . ... ek)
  - ▶ Les éléments  $e_i$  d'une piste sont indépendants des éléments  $e_i$  d'une autre piste
- ▶ Impossible de modifier la structure temporelle
- ▶ Modification possible de tous les éléments, synchronisations non exprimées et non maintenues

# Structuration du temps pour la composition musicale

## Systèmes hiérarchiques

- Modification de la cohérence temporelle : modification du terme
- Fonctionnels : modification des feuilles, évaluation bottom-up
- Basés grammaire : modification possible de tous les noeuds, propagation par héritage et synthèse

## Exemple : édition d'une pièce musicale structurée

- Les notes sont reliées dans un terme
- Une modification d'une note ne modifie pas la structure temporelle
- Exemple : augmenter la durée d'une note respecte la structure mélodique

p1 = {ab5, p, 1/4} - {g5, p, 1/4} -  
{f5, p, 1/2} - {g5, p, 1/4} -  
{d5, p, 1/4} - {eb5, p, 1/4} -  
{b4, p, 1/4} - {c5, p, 1/4}



p1 = {ab5, p, 1/4} - {g5, p, 1/4} -  
{f5, p, 1/4} - {g5, p, 1/4} -  
{d5, p, 1/4} - {eb5, p, 1/4} -  
{b4, p, 1/4} - {c5, p, 1/4}



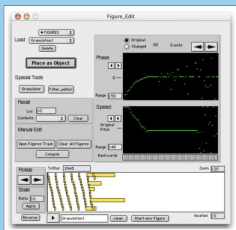


# Structuration du temps pour la composition musicale

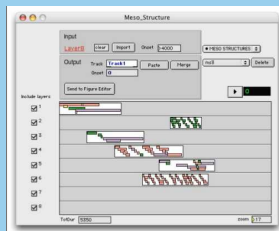
## Gestion de la forme

- ▶ Musique acousmatique : approche temporelle
- ▶ Approche hors pistes et multiéchelle – travail sur la forme

Carlos Caires « Micromontage in Graphical Sound Editing and Mixing Tool » 2004



Éditeur de figures



Éditeur mésostructures

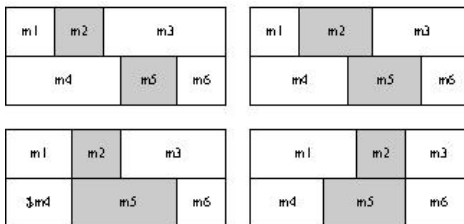
# Structuration du temps pour la composition musicale

## Les opérateurs temporels

- ▶ La sémantique des concaténations horizontales et verticales ne peut pas exprimer toutes les relations temporelles possibles.
- ▶ Par exemple la relation *overlap*

$$(m1 - m2 - m3) \mid (m4 - m5 - m6)$$

- ▶ La structure arborescente impose des relations temporelles liées à la structure pour chaque noeud. Dans l'exemple, il est impossible de relier *m2* et *m5*.

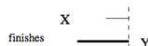
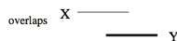


# Structuration du processus de composition

## Les relations temporelles

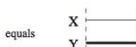
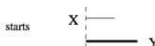
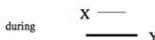
### Relations d'intervalles

- ▶ Variable de durées :  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , ...
- ▶ Relations de Allen :
  - ▶  $Y$  meets  $X$
  - ▶  $X$  starts  $Y$
  - ▶ ...



### Relations de points

- ▶ Variables de dates :  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ...
- ▶ Inégalités, égalités
  - ▶  $x \leq y$
  - ▶  $x = z$
  - ▶ ...



# Structuration du temps pour la composition musicale

## Gestion de l'incertitude

### Modélisation du processus de composition

- ▶ Conception incrémentale : bottom-up ou top-down
- ▶ Processus de composition : modélisé par l'ensemble des pièces potentielles
- ▶ Restriction de l'ensemble des pièces par les choix du compositeur
- ▶ Ensemble de pièces représenté par les solutions d'un problème
  - ▶ Un ensemble de variables temporelles (dates, durées)
  - ▶ Un ensemble de contraintes temporelles (Allen ou points)

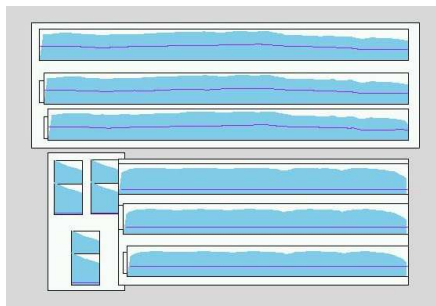
### Système d'édition

- ▶ Types d'éditions
  - ▶ Affectations de variables temporelles
  - ▶ Modifications de relations temporelles
- ▶ Système d'édition : résolution de contraintes
- ▶ Maintenance de la cohérence temporelle : ordre partiel

# Structuration du temps pour la composition musicale

## BOXES

- ▶ Objets temporels : variables de date et de durée
- ▶ Contraintes temporelles : Allen, relations de durées
- ▶ Hiérarchie avec contraintes temporelles et sons spectraux
- ▶ Cadre multiéchelle pour exprimer les relations entre grandeurs et objets musicaux : hauteurs et volumes



Anthony Beurivé « *Un logiciel de composition musicale combinant un modèle spectral, des structures hiérarchiques et des contraintes*, JIM 2000, Bordeaux

# De la composition à la performance

## Le métapiano



*Jean Haury*

- ▶ Clavier réduit et partition dans l'ordinateur
- ▶ Mélange instrument et partition : mélange de deux paradigmes temporels

## Interprétation

- ▶ Variations dynamiques, accentuations, articulations, variations agogiques.

# Deux paradigmes du monde opposés

## Aspects philosophiques

### Heraclite – Exécution – Calcul

- ▶ Fleuve : flot des événements
- ▶ Orientation de l'amont vers l'aval
- ▶ Dynamique : changements
- ▶ Monde sans objets

### Parmenides – Écriture – Données

- ▶ Flèche orientée du passé vers le futur
- ▶ Irréversibilité : chronologie
- ▶ Statique : propriétés éternelles
- ▶ Monde sans changements

# Deux paradigmes du monde opposés

## La partition musicale

- ▶ Paradigme de la flèche (Time-line) : chronologie et relations temporelles
- ▶ La partition est statique
- ▶ Notation structurant des objets musicaux (notes, mesures, etc.)
- ▶ Relations éternelles à respecter lors de l'interprétation

Violino

Viola

All.

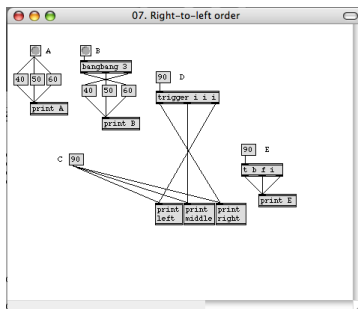
8



# Deux paradigmes du monde opposés

## Le patch MAX

- ▶ Paradigme du fleuve : calcul de haut en bas
- ▶ Chaque objet est plongé dans le fleuve
- ▶ Un patch MAX est dynamique
- ▶ Basé sur les changements : objets peu structurés



# Deux paradigmes du monde opposés

## Structuration du temps musical

### Les séries de Mc Taggart

- ▶ Série A : être passé, être présent, être futur ;
- ▶ Série B : être avant, être pendant, être après ;
- ▶ Série C : chronologique

### Supports temporels

- ▶ Time-flow : série A, événements dynamiques ;
- ▶ Time-line : série B, événements statiques ;
- ▶ Temps granulaire : série C, tout événement ;

Mc Taggart « *The Unreality of Time* », journal Mind, volume 17, pp 457-474, 1908

# Deux paradigmes du monde opposés

## Combinaison des paradigmes

Événements	Phase de composition	Phase de performance
<b>Statiques</b> : Série B Prédictibles	Définis par le compositeur sur la time-line	Joués par l'ordinateur dans le flot du temps
<b>Dynamiques</b> : Série A Non prédictibles	Contraints par le compositeur sur la time-line	Définis par l'interprète Joués par l'interprète
<b>Pièce musicale</b>	Incomplète	Complétée par l'interprète
<b>Modèle</b> des évt	Time-line : Série C Contraintes : Série A - Série B Ordre partiel	Time-line + Flot du temps Série A - Série B - Série C Ordre total

Brian Eno « *Unfinished pieces* », Philippe Manoury « *Virtual Pieces* »

# Deux paradigmes du monde opposés

## Modélisation de l'écriture de l'interaction

### Processus de composition

- ▶ Modélisé par l'ensemble des pièces potentielles
- ▶ Partition musicale : plusieurs interprétations possibles
- ▶ Espace de liberté pour le musicien
- ▶ Modélisation : problème de résolution de contraintes
- ▶ Une interprétation : une solution au problème

### Aspects temporels

- ▶ Modifications agogiques
- ▶ Objets temporels : variables de date et de durée
- ▶ Contraintes temporelles : logiques de points, Allen

# Deux paradigmes du monde opposés

## L'exemple du métapiano



*Jean Haury*

## Partition numérique incomplète

- ▶ Contient hauteurs, relations temporelles et volumiques
- ▶ Manquent les volumes, les attaques et les durées de notes

## Interprétation

- ▶ Variations dynamiques, accentuations, articulations, variations agogiques.

# Deux paradigmes du monde opposés

## Du point de vue du calcul

- ▶ Une pièce interactive en MAX : un programme dédié interactif
- ▶ Programmation → édition de **partition interactive**
- ▶ Lecteur statique → **lecteur interactif**

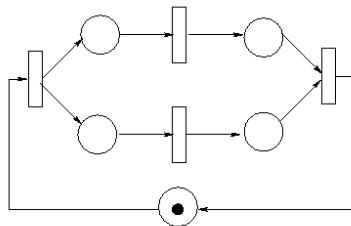
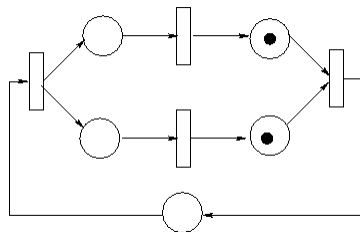
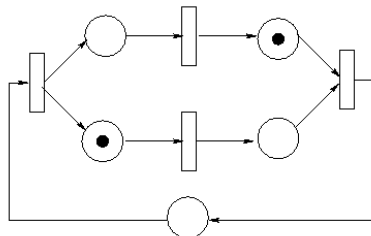
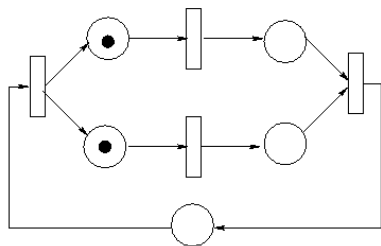
## Machine abstraite ECO

- ▶ Un état de la machine ECO est un quadruplet  $(E, C, O, t)$  où
  - ▶  $E$  est un environnement, qui représente le matériau musical
  - ▶  $C$  est une chaîne de contrôle représentant les événements datés en entrée
  - ▶  $O$  est la chaîne de sortie
  - ▶  $t$  est la date de l'état
- ▶ Transitions d'états synchronisées sur une horloge
- ▶ Modèle de machine à états retenu : **Réseau de Petri**

- ▶ Antoine Allombert « *Aspects temporels d'un système de partitions musicales interactives pour la composition et l'exécution* », Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux, 2009 – Gérard Assayag, Camilo rueda.
- ▶ *Projet ANR Virage* : Georges Gagneré, Pascal Baltazar, Raphaël Marczak, Jean-Michel Couturier

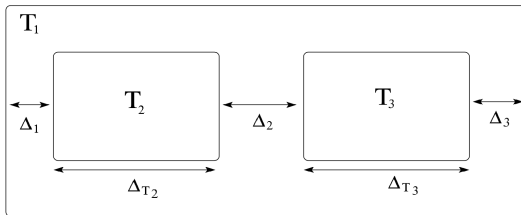
# Deux paradigmes du monde opposés

Du point de vue du calcul – Réseau de Petri

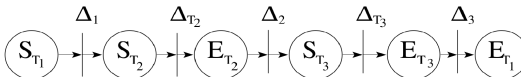


# Deux paradigmes du monde opposés

Du point de vue du calcul – Transformation



(a) Before

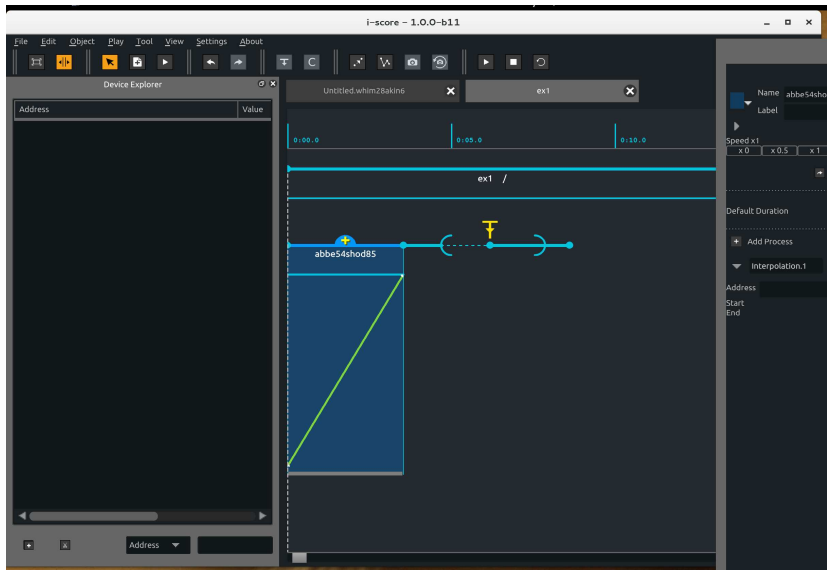


(b) Before Associated Petri Net



# Deux paradigmes du monde opposés

## Séquenceur interactif i-score



# Du temps linéaire souple au temps arborescent

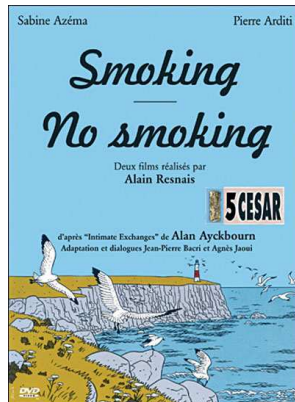
## Le projet OSSIA

### Objectifs du projet ANR OSSIA

- Applications pour la muséographie
- Extension d'i-score vers un modèle comportant des conditions et des boucles
- Conservation de la time-line ?

### Quels modèles ?

- Représentation du scénario multiple
- Modèle d'édition : quels éléments d'interface ?
- Modèle de calcul : quelle sémantique d'exécution ?

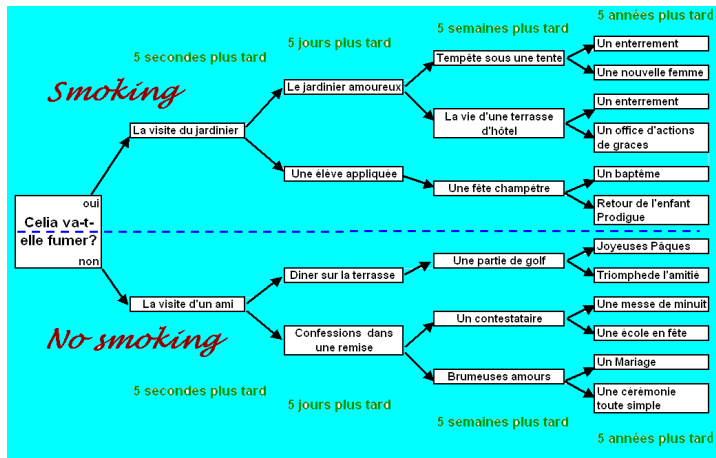


Projet ANR OSSIA : GMEA, Blue Yeti, ENJMIN, LaBRI

Jaime Arias, Pascal Baltazar, Clément Bossut, Jean-Michaël Celerier, Jaime Chao, Jean-Michel Couturier, *Théo De la Hogue*, Camilo Rueda, Mauricio Toro, Nicolas Vuaille.

# Du temps linéaire souple au temps arborescent

## Scénario arborescent - Temps linéaire



# Du temps linéaire souple au temps arborescent

## Quels éléments de base ?

- ▶ Relations logico-temporelles
  - ▶ Relations temporelles additionnées d'une condition booléenne
  - ▶ Relation vérifiée si condition vraie et relation temporelle vérifiée
  - ▶ Relation non vérifiée : invalidation du scénario suivant
    - Problème d'environnement d'évaluation de la condition
    - Pas de modèle opérationnel
- ▶ Scénarios conditionnels : forme **cond**
  - ▶ Sous-scénarios gardés par une condition
  - + Sémantique simple, structure temporelle
  - + Cohérence facilement assurée
  - Sous-scénarios indépendants : pratique de copie pour partager
  - Puissance d'expression insuffisante

Mauricio Toro-Bermudez « *Structured interactive scores : from a structural description of a multimedia scenario to a real-time capable implementation with formal semantics* », Thèse de doctorat de l'université de Bordeaux, 2012

# Du temps linéaire souple au temps arborescent

Quels éléments de base ?

## Le choix des utilisateurs : événement conditionné

- ▶ Condition et relations temporelles
- ▶ Évaluation de la condition
- ▶ Activation des relations temporelles si la condition est vérifiée

Un événement conditionné



Deux événements synchronisés conditionnés



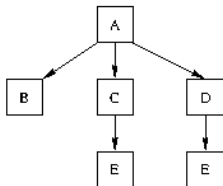
Deux événements synchronisés dont l'un est conditionné



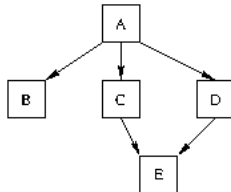
# Du temps linéaire souple au temps arborescent

Quelle représentation du scénario ?

- ▶ Scénario multiple arborescent
- ▶ Scénario multiple non arborescent



Un arbre dont la feuille E est dupliquée



Un DAG partageant la feuille E

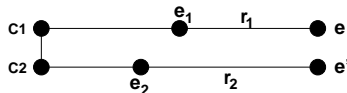
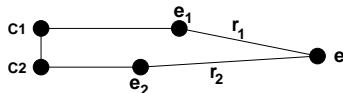
- + Explosion combinatoire des cas dépliés
- + Confort d'édition
- + Puissance d'expression
- Versions mélangées, partage d'événements
- Modèle complexe à maîtriser, passé des événements dynamique

# Du temps linéaire souple au temps arborescent

## Modèle de calcul

### Combinaison des relations convergentes

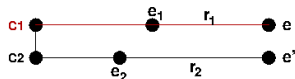
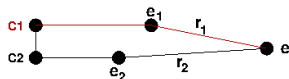
- ▶ Un événement a plusieurs relations antécédentes
- ▶ Certaines relations ne sont éventuellement pas actives
- ▶ Quelle sémantique ? Comment décider de l'activation d'un événement convergent ?
- ▶ La référence : le cas arborescent



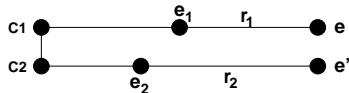
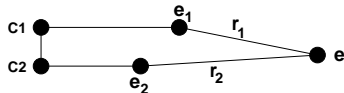
# Du temps linéaire souple au temps arborescent

## Modèle de calcul - Cas critiques

### Conjonction : risques de blocage



### Disjonction : risques d'exécutions multiples





# Du temps linéaire souple au temps arborescent

## Espace-temps et indéterminisme – Théorie des mondes multiples

- ▶ Block univers / partition musicale (Thibault Damour « Si Einstein m'était conté, de la relativité à la théorie des cordes »)
- ▶ Théorie d'Everett, théorie des états relatifs en physique quantique
- ▶ Observations non déterministes / fonction d'onde déterministe
- ▶ Univers neutre comportant toutes les possibilités prévues par la théorie quantique (superposition de configurations physiques d'amplitudes différentes)



# Du temps linéaire souple au temps arborescent

## Le modèle opérationnel – Les mondes multiples

- ▶ Une interaction crée plusieurs branches
- ▶ Tous les cas existent avec une amplitude d'existence
- ▶ Seuls les événements reliés par une relation temporelle active sont dans la même version (en interaction)
- ▶ Toutes les versions s'exécutent mais une seule est perceptible

## Réseau de Petri temporisé coloré hiérarchique

- ▶ Réseau statique – Jetons portant une couleur
  - ▶ Jetons actifs : activent les événements et les relations
  - ▶ Jetons passifs : ne font que passer, sans activer, ni exécuter, ni attendre

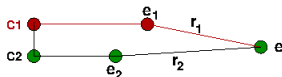
## Conjonction calculée / disjonction perçue

- ▶ Plus de risque de blocage grâce aux jetons passifs
- ▶ Synchronisation temporelle évitant les exécutions multiples
- ▶ Perspectives : conditionner l'activation par le nombre de jetons, paramétrer le seuil de perception

# Du temps linéaire souple au temps arborescent

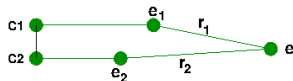
## Modèle de calcul - Cas critiques

### Pas de risques de blocage



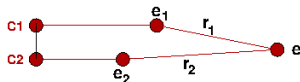
Jetons passifs rouges  
L'événement e est déclenché

### Pas de risques d'exécutions multiples



Synchronisation temporelle en e  
Attente de tous les jetons

### Dernier cas



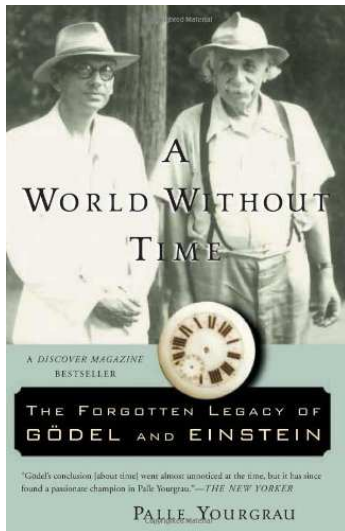
Les jetons passifs traversent  
L'événement e n'est pas déclenché

# Du temps linéaire souple au temps arborescent

## Les boucles

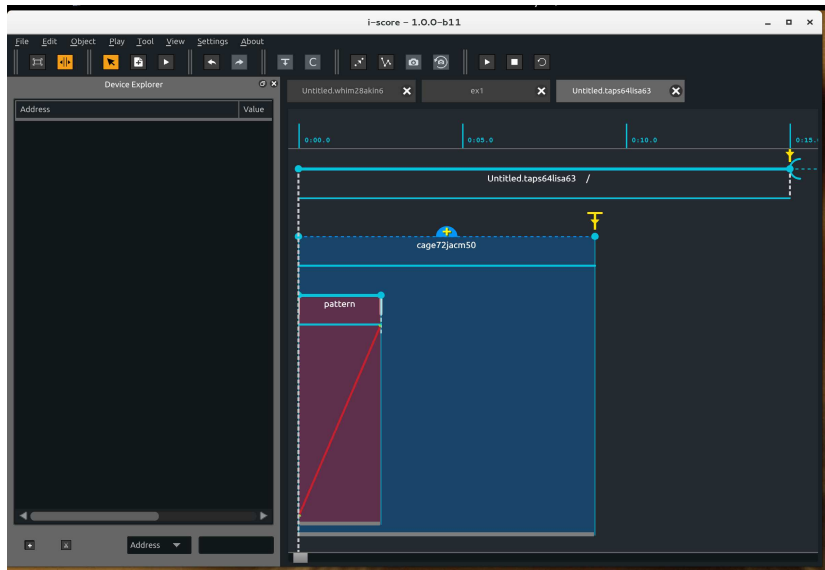
- ▶ Univers de Göedel : solutions de la théorie générale de la relativité avec boucles
- ▶ Écoulement du temps
- ▶ Paradoxes temporels
- ▶ Voyage dans le temps impossible sauf :
  - ▶ Sans changement du passé
  - ▶ L'univers est arborescent (mondes multiples)

- ▶ Du temps absolu au temps relatif : synchronisation par événements
- ▶ Jean-Michaël Celerier JIM'17



# Du temps linéaire souple au temps arborescent

## Les boucles

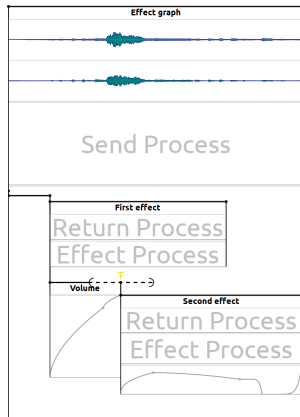


# Combinaison du temps et du son

## Structuration hiérarchique de scénarios de calculs audio

### i-score / LibAudioStream

- ▶ LibAudioStream : combinaison de streams
- ▶ i-score : Automations, interactivité, micromontage
- ▶ Hiérarchie : Groupes de streams audios
- ▶ Send and return streams audios
- ▶ Scénario audio
  - ▶ Sous-scénarios audio
  - ▶ Chaîne d'effets
  - ▶ Entrée son (input ou fichier)
  - ▶ Mixage : matrice de pourcentages



- ▶ Jean-Michaël Celerier, Myriam Desainte-Catherine and Jean-Michel Couturier, « Rethinking the audio workstation : tree-based sequencing with i-score and the LibAudioStream », Sound and Music Computing Conference, Hamburg, Germany, 2016.
- ▶ Jean Bresson « *composition assistée par ordinateur : techniques et outils de programmation visuelle pour la création musicale* » HDR UPMC 2017.

# Combinaison du temps et du son

## Structuration temporelle des calculs audio

### Dataflows et graphe temporel

- ▶ Organisation des compositions de fonctions dans le temps
- ▶ Scénarios temporels de calcul audio
- ▶ Composition fonctionnelle synchrone et asynchrone
- ▶ Proposition pour combiner
  - ▶ La macro-forme temporelle
  - ▶ Et le graphe de calcul
- ▶ Vers une formalisation de combinaison de la forme et de la structure ?

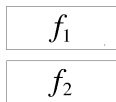
- ▶ Jaime Arias, Myriam Desainte-Catherine and Camilo Rueda, « *Modelling Data Processing for Interactive Scores Using Coloured Petri Nets* », in proceedings of the 14th International Conference on Application of Concurrency to System Design (ACSD), June 2014, Tunis (Tunisia).
- ▶ Projet ANR INEDIT, IRCAM, Grame, LaBRI – Florent Berthaut
- ▶ Jean-Michaël Celerier, Myriam Desainte-Catherine, Jean-Michel Couturier « *Extending dataflows with temporal graphs* », soumis.
- ▶ Jean-Marc Chouvel « *Le musicologue et l'algorithme : écoute et traitement de l'information* », Keynote JIM/16, Albi

# Combinaison du temps et du son

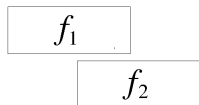
## Graphes audios et temporels

Soient  $f_1$  et  $f_2$  deux process audio composés ( $f_2 \circ f_1$ )

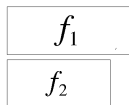
Modèle Dataflow classique : une relation temporelle figée



Extension temporelle : toutes les relations de Allen



$f_1$  overlap  $f_2$



$f_1$  start  $f_2$



$f_1$  before  $f_2$

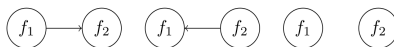




# Combinaison du temps et du son

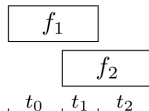
## Graphes audios et temporels – Le calcul

Soient  $f_1$  et  $f_2$  deux process audio, dans le modèle étendu tous les graphes audio et toutes les relations de Allen sont exprimables



## Exemple

- ▶ Soit le graphe audio :  $(f_2 \circ f_1)$
- ▶ Soit la trace temporelle :

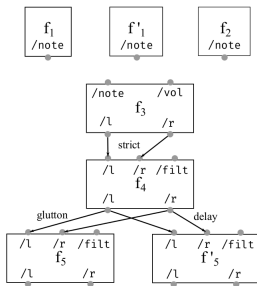


## Relations de composition fonctionnelle temporelle

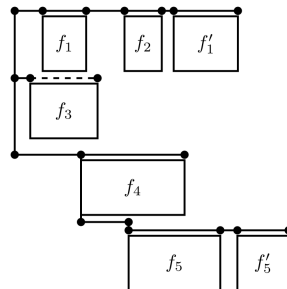
- ▶ Stricte :  $(f_2 \circ f_1)$  durant  $t_1$
- ▶ Gloutonne :  $f_1$  durant  $t_0$ ,  $(f_2 \circ f_1)$  durant  $t_1$ ,  $f_2$  durant  $t_2$
- ▶ Retardée :  $f_2 \circ (\text{delay } f_1 \ t_0)$  durant  $t_1$  et  $t_2$

# Combinaison du temps et du son

## Exemple



Graphe audio

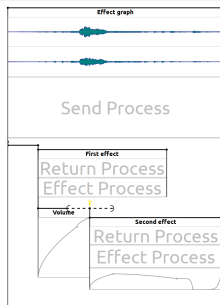


Graphe temporel

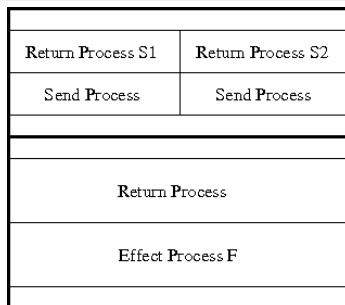
# Combinaison du temps et du son

## Expressivité du modèle

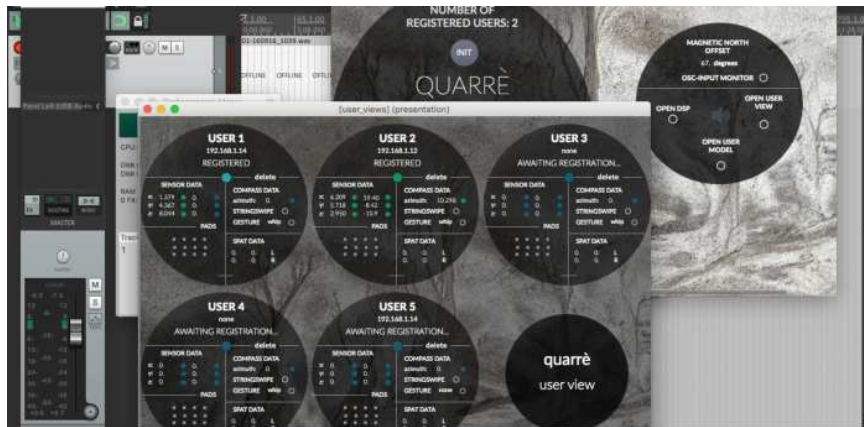
- ▶ Écriture / interaction
- ▶ Structuration hiérarchique
- ▶ Micromontage : réglage de la précision à l'échantillon
- ▶ Structuration temporelle des sons et des calculs audio



Combinaison de process audio



Combinaison de paramètres audio

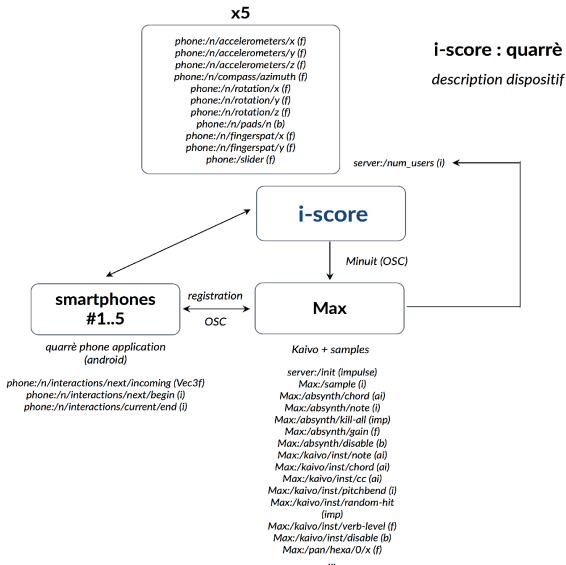


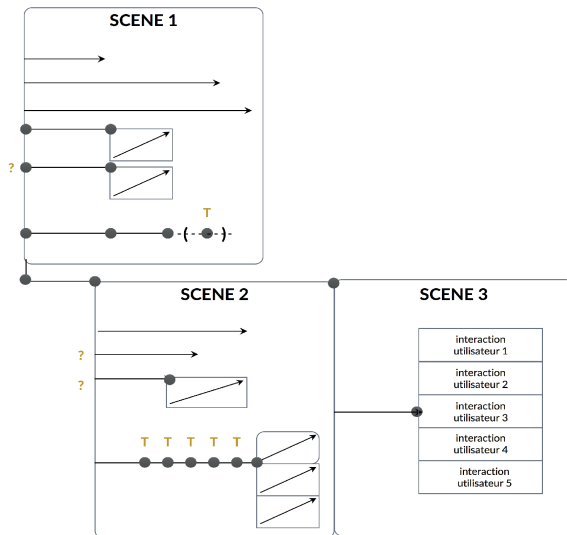
/7/quarré (v. a78)

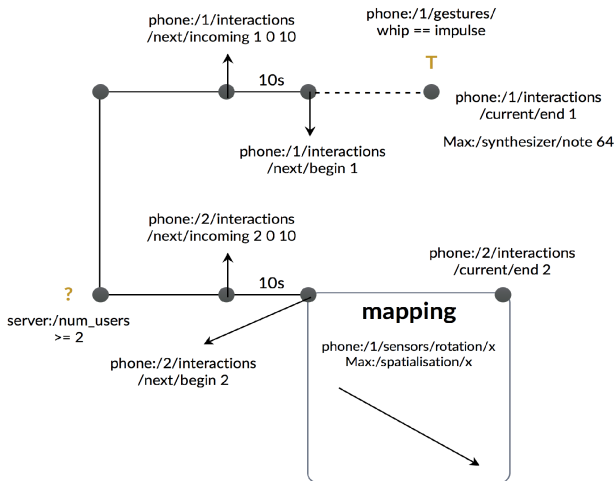
**Pierre Cochard**

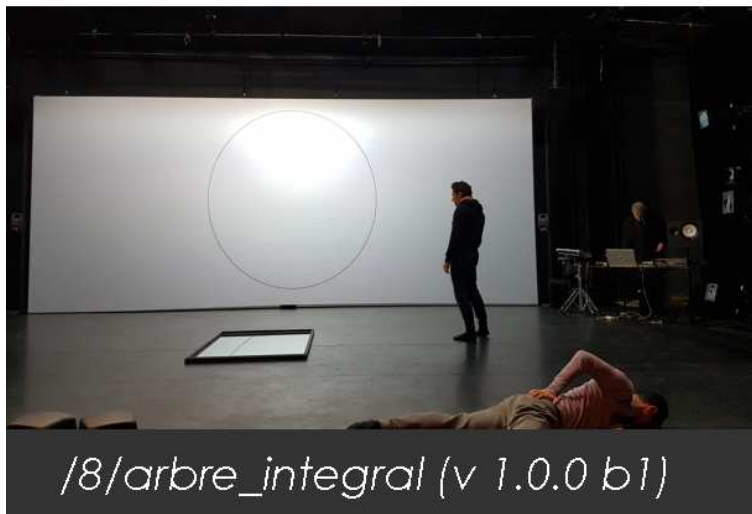
Les + des Campulsations

22-23-26-27 sept. 2016









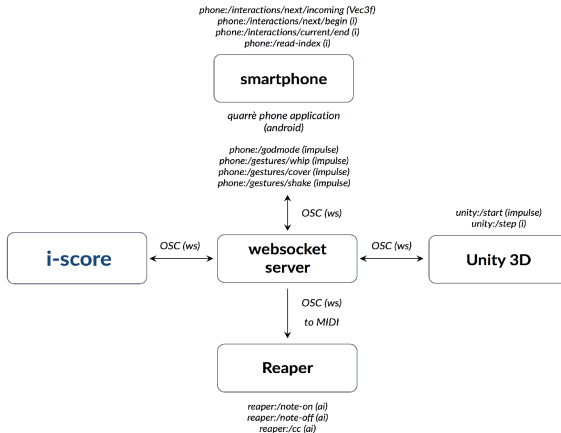
### Le Poème en Volume

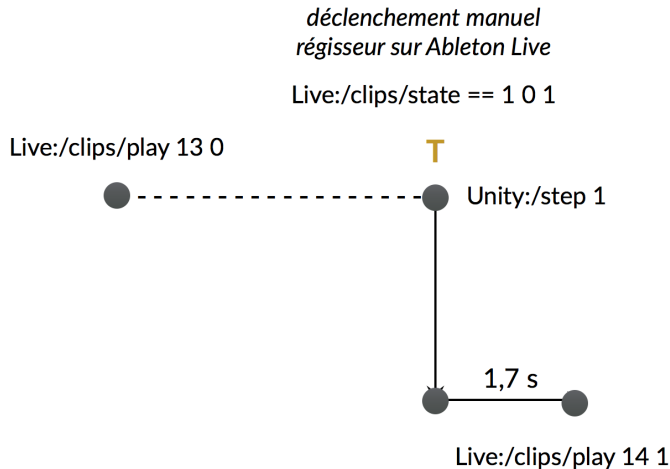
Donatien Garnier, Gaël Domenger, György Kurtág, Julia Al-Abed, Julien Conan, Ax Domenger, Laurent Davaille, Pierre Cochard



### i-score : arbre intégral (v. 2b - ambarès)

#### description dispositif





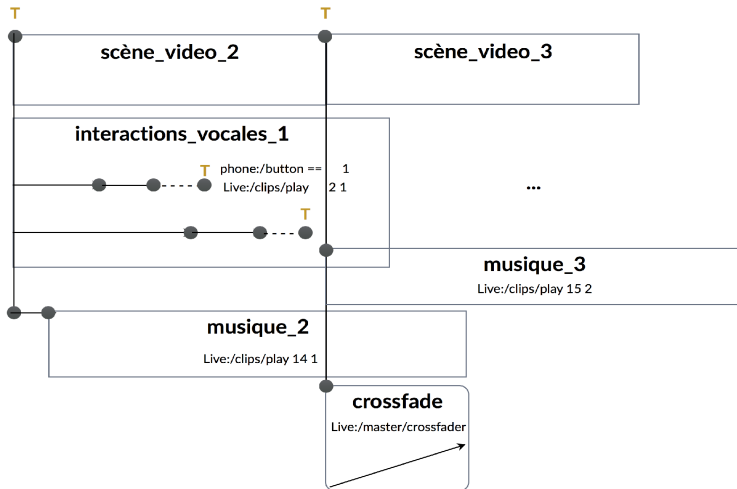
# Expérimentations

## L'arbre intégral - Donatien Garnier

point de synchronisation  
avec Unity 3D

Unity:/step == 2

Unity:/step == 3



# Expérimentations

## L'arbre intégral - Donatien Garnier

