

# EXÉCUTION RÉPARTIE DE SCÉNARIOS INTERACTIFS

Auteur 1  
Organisme  
Adresse électronique

Auteur 2  
Organisme  
Adresse électronique

Auteur 3  
Organisme  
Adresse électronique

## Résumé

La pratique musicale est souvent une opportunité pour interagir et échanger, avant tout avec d'autres musiciens, et plus récemment avec des algorithmes ou logiciels disposant d'un certain degré d'autonomie et de liberté.

La notation musicale occidentale résout le problème du partage et de la séparation d'information entre musiciens en divisant une partition en portées ; la plupart des logiciels musicaux vont interpréter ces portées sur une seule machine, en gardant la possibilité de pistes avec des réglages indépendants.

Ce travail consiste en une généralisation de cette notion de partage aux scénarios interactifs, en permettant une exécution synchrone ou asynchrone de plusieurs parties d'un scénario sur plusieurs machines. Une implémentation est offerte dans le logiciel i-score, avec pour objectif de mettre en valeur les nouvelles possibilités d'écriture qu'offre une exécution répartie à un compositeur.

## 1. PROBLÉMATIQUE

On cherche à définir une sémantique permettant de décrire l'exécution d'une partition interactive sur plusieurs machines, en prenant en compte les exécutions parallèles, c'est-à-dire que deux machines jouent la même chose, de manière synchronisée ou non, ainsi que les exécutions série : une machine joue puis une autre machine joue la suite.

On parle ici de « jeu » à un niveau abstrait : on s'intéresse au contrôle de tous types de paramètres et non pas uniquement les paramètres musicaux.

On présentera d'abord plusieurs applications et besoins rencontrés par des artistes et auteurs, qui ont motivé ce travail. Puis, les possibilités de répartition étudiées seront présentées dans le détail, en analysant l'impact que peuvent avoir les problèmes connus dans le domaine de l'informatique répartie, sur l'écriture de telles partitions. Pour conclure, les performances du système développé seront présentées.

## 2. ÉTUDES DE CAS

### 2.1. Projet Quarrè

Quarrè (fig. 1) est une installation en son spatialisée réalisée par Pierre Cochard au SCRIME, qui utilise

Max/MSP, i-score, et une application mobile développée pour l'occasion. Elle implique plusieurs participants possédant chacun un téléphone.

Une trame principale d'environ trente minutes se déroule. Durant cette trame, à différents moments, des participants vont pouvoir interagir via l'application mobile, qui les avertit par un compte à rebours. Ils disposent ensuite d'une durée déterminée pour agir : changer un paramètre d'un effet, déclencher des sons, spatialiser un objet sonore... Par exemple, de 1 minute 30 à 2 minutes, deux des participants vont pouvoir changer l'intensité d'un effet de chœur. Les actions possibles varient en fonction du nombre de participants, pouvant aller de un à cinq.



Figure 1 : Quarrè sans participants. Pierre Cochard, 2016.

### 2.2. Support des périphériques embarqués

Actuellement, une des manières principales d'utiliser le logiciel i-score est de lui faire faire du contrôle par réseau.

Néanmoins, sur des périphériques embarqués, cela a un coût :

- Encombrement de la bande passante : certains périphériques ne sont pas en Gigabit Ethernet ; envoyer des quantités importantes de messages OSC sur des intervalles de quelques millisecondes va entraîner des pertes de paquets, des retards, et une augmentation de la latence.
- Gigue <sup>1</sup> sur les messages envoyés qui peut entraîner des effets indésirables comme des trem-

1 . De l'anglais jitter

blements si par exemple on fait se déplacer des objets graphiques par réseau.

- Consommation de ressources pour le décodage des messages réseaux.

De plus, actuellement, il est nécessaire de copier les fichiers de sauvegarde sur le périphérique à chaque modification que l'on veut tester, ce qui est peu ergonomique. On essaye donc par la même occasion d'offrir un système qui permette de partager automatiquement un scénario i-score entre deux machines.

### 2.3. Lecture de médias synchronisée

On désire offrir des possibilités de lecture vidéo permettant à des clips audio ou vidéo de démarrer au même instant sur plusieurs machines, puis de rester synchronisés durant la lecture.

### 2.4. Redondance

Le matériel n'étant pas infallible, la question de la tolérance aux pannes se pose : comment mitiger une panne de l'ordinateur principal pendant une représentation artistique ?

Une des possibilités est d'offrir un système de redondance : si une machine tombe en panne, une autre prend le relais le plus vite possible. La machine prenant le relais doit donc avoir été maintenue en synchronisation avec la machine étant tombée en panne, pour garantir le moins de perturbations possibles lors de la bascule.

### 2.5. État de l'art

#### 2.5.1. Musique répartie

On trouve plusieurs familles de logiciels et outils orientés réseau pour la production musicale. On distingue notamment les applications ayant pour but de synchroniser des flux audio sur plusieurs machines, des applications permettant une collaboration lors de l'écriture et de la composition musicale.

Dans le premier cas, on notera principalement les multiples incarnations de NetJACK[1], ayant pour but de rendre accessible les éléments d'une baie de raccordement JACK sur plusieurs machines. Un recensement plus complet des serveurs de son distribués ayant pour but les performances musicales en réseau est donné dans [2].

Différents logiciels permettant une écriture collaborative, mais non synchronisée, existent : OHMStudio[6] reprend le principe des séquenceurs traditionnels et permet un partage de document à plusieurs utilisateurs, sur internet. Splice[13] suit le même principe, mais est orienté vers la communauté des beat-makers.

#### 2.5.2. Horloges

En raison de la nature temporelle du problème présenté, on s'intéresse avant tout aux mécanismes

possibles pour la gestion du temps entre plusieurs machines.

La littérature sur les systèmes distribués distingue plusieurs familles d'horloges :

- Les horloges physiques marquent l'avancement du temps dans le monde matériel.
- Les horloges logiques marquent l'avancement du temps dans les étapes d'un algorithme réparti, donc sans relation avec du temps en secondes.
- Plus récemment, les horloges hybrides ont été introduites afin de concilier les deux mondes.

Les deux principaux mécanismes pour la synchronisation d'horloges physiques sont Network Time Protocol[10] et Precision Time Protocol[12]. Le premier est disponible sur de nombreuses plate-formes et permet en pratique d'atteindre une précision de synchronisation de quelques milliseconde sur internet. Le second est plus précis et promet une précision proche de la microseconde. Cependant, cela dépend de la précision avec laquelle les paquets sont estampillés<sup>2</sup> et donc de la qualité de l'horloge de l'implémentation PTP. En pratique, l'intérêt de PTP sera plus prononcé lorsque du matériel dédié (Grand Master Clock) est disponible pour réaliser l'estampillage des paquets.

Un des désavantages de l'utilisation des horloges physiques pour l'estampillage est qu'elles ne sont pas monotones : notamment, les secondes intercalaires bouleversent régulièrement les systèmes distribués basés sur ces horloges.

Les horloges logiques ont été introduites par Leslie Lamport [9] afin d'offrir des possibilités de raisonnement et de vérification formelles sur l'écoulement du temps dans les systèmes répartis. Notamment, les estampilles de Lamport permettent d'offrir un ordre partiel entre les messages échangés dans un système réparti.

Ce mécanisme a été par la suite généralisé, d'abord par les horloges vectorielles, puis par les horloges matricielles. Dans le premier cas, chaque message contient un tableau contenant l'horloge de son émetteur ainsi que les horloges connues des autres processus. Dans le second cas, chaque message contient le vecteur contenant les vecteurs d'horloges de chaque processus.

Enfin, des solutions existent pour maintenir un lien entre les horloges logiques et physiques. Par exemple, Google a introduit TrueTime dans le cadre de la base de données distribuée Spanner[5]. TrueTime travaille avec des intervalles plutôt que des dates précises, et requiert une synchronisation très précise des horloges physiques, utilisant des signaux GPS et des horloges atomiques.

Les horloges logiques hybrides[7] offrent des garanties de causalités sur une horloge physique proche de la précision de NTP, avec une granularité proche de la microseconde.

---

2 . timestamped

### 3. APPROCHE

Cette section détaille les choix de haut niveau réalisés.

On souhaite modifier le moins possible le modèle pour les utilisateurs du logiciel, en rajoutant les notions nécessaires et suffisantes pour offrir la finesse de répartition désirée.

La section 4 présente de manière détaillée les possibilités de répartition que l'on offre, en prenant exemple sur des cas simples.

La section 5 définit ces possibilités en utilisant les objets du modèle d'i-score. On notera que cette méthode serait prohibitive à réaliser manuellement : c'est un modèle pour réaliser l'implémentation, qui se fait automatiquement à partir de la spécification que donne le compositeur via les outils présentés en section 4. On prendra donc garde à ne pas confondre la forme de répartition qui existe déjà de fait dans le logiciel, l'objectif premier d'i-score étant de communiquer avec d'autres logiciels, de la répartition entre instances d'i-score partageant un même document.

Enfin, la section 6 présente une évaluation des performances dans le cadre d'une implémentation pratique.

#### 3.1. Rappel du modèle d'i-score

Ce document présente la problématique de répartition dans le cadre du logiciel i-score, qui implémente le modèle OSSIA[4]. Il consiste en un agencement d'éléments permettant de définir des comportements temporels. Les éléments dont nous avons besoin ici sont :

- Contrainte temporelle : décrit un écoulement de temps. Représenté par un trait horizontal.
- Nœud temporel : synchronise le début et la fin de plusieurs contraintes temporelles. Représenté par un trait vertical. Peut porter un point d'interaction, qui décrit l'attente et la résolution d'une condition externe pour stopper les contraintes précédentes et démarrer les suivantes ; les contraintes précédentes seront alors en partie représentées par des pointillés pour exprimer l'incertitude.
- Processus : contenu dans les contraintes temporelles, permet l'exécution d'un comportement à chaque tic d'horloge. Par exemple, une automatisation.
- État : permet d'envoyer un message à un temps donné. Représenté par un point.

Des exemples sont visibles en section 4, par exemple les scénarios 1 et 2.

#### 3.2. Nouvelles notions

Nous nous trouvons en présence de plusieurs machines qui communiquent et partagent un document.

L'ensemble constitué par les instances d'i-score et le document qu'elles partagent est appelé session.

On désigne par client une instance d'i-score connectée à une session, qui peut être sur une machine différente.

On désire s'affranchir des notions propres aux machines physiques et des problématiques de réseau (adresse IP, etc) lors de l'écriture d'un scénario réparti.

Pour ce faire, on introduit la notion de groupe. Un groupe est un ensemble de clients.

Les compositeurs ne manipulent jamais directement les informations relatives à un client, uniquement celle d'un groupe qui peut contenir zéro, un, ou plusieurs clients.

De manière générale, quand plusieurs clients font partie d'un même groupe, cela signifie qu'ils vont réaliser les mêmes tâches, à des degrés de synchronisation variables.

Un des intérêts d'un groupe est la tolérance aux pannes, déconnexions, reconnexions, et changements d'installation. Par exemple, si une machine tombe en panne, on peut la remplacer par une autre simplement en l'assignant au même groupe que la machine en panne sans avoir besoin de mettre à jour le scénario.

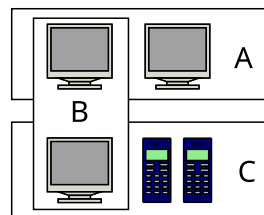


Figure 2 : Plusieurs groupes  $A, B, C$  avec plusieurs clients dans chaque groupe

#### 3.3. Topologie

Maître-esclave pour l'édition.

Pour des raisons de simplicité, la première mise en œuvre se fait via une topologie réseau en étoile : un maître gère le déroulement général de l'exécution. Les différents clients communiquent au travers de ce maître, avec les avantages et inconvénients que cela implique :

- Facilité d'analyse lors du développement : on peut enregistrer tous les messages échangés avec leurs estampilles.
- Intolérance aux pannes : si le maître faillit, aucune récupération n'est possible.

On détaille dans les sections suivantes les cas où des topologies différentes peuvent montrer un intérêt.

#### 3.4. Modèle

i-score se base sur une approche orientée document.

On choisit de répartir nos objets autour d'un même document partagé par toutes les instances du réseau,

à la manière des logiciels d'édition tels que Google Docs.

Cela ne pose pas de problème de mémoire, même sur de l'embarqué tel que Raspberry Pi : l'empreinte mémoire d'un scénario est minime en comparaison de l'occupation des bibliothèques utilisées (quelques dizaines de kilo-octets contre environ 50 méga-octets).

On utilise le protocole TCP pour tous les messages relatifs à la répartition, notamment pour ses garanties d'ordonnancement.

## 4. DESCRIPTION DE L'EXÉCUTION

On sépare les objets offrant une structure temporelle, des objets possédant des données et commandes envoyées à d'autres logiciels (par exemple, une automatisation).

Des groupes et des méthodes de synchronisation sont assignées à ces objets par le compositeur ; en pratique, ces informations sont enregistrées comme une liste de méta-données associées aux objets.

### 4.1. Processus de contenu

On entend par processus de contenu, tous les processus produisant des données, sans se soucier de la structure temporelle. En voici une liste non exhaustive : automation, mapping, code javascript, piano-roll MIDI, audio...

Le processus s'exécute tel quel pour tous les clients auquel il est assigné, et ne s'exécute pas pour les autres.

Ici les processus de contenu sont représentés par une boîte barrée en diagonale, qui représente le cas courant d'une automatisation montante.

### 4.2. Processus Scénario

Le scénario est le processus central d'i-score : il met en relation les différents éléments temporels.

Plusieurs manières de répartir l'exécution d'un scénario, offrant différentes possibilités d'écriture, sont détaillées ci-dessous. On sépare le cas général permettant l'interactivité dans un scénario (le scénario continue après qu'un événement externe  $e$  se soit déclenché, visible par exemple en scénario 2) du cas plus simple où les dates sont fixées, visible en scénario 4.

On travaillera dans les exemples suivants avec trois groupes  $A, B, C$  disposant chacun d'un nombre inconnu de clients. On pourra supposer que les contraintes temporelles portent chacune des processus de contenus, qui ne sont pas représentés ici afin de garder les figures simples. Pour simplifier les schémas, on associe par métonymie les contraintes avec les groupes auxquels ils sont associés.

Dans la sémantique de i-score, le nœud temporel est l'objet permettant de synchroniser le début et la fin de plusieurs éléments. Nous analysons d'abord les choix qui doivent être fait pour traduire ce mécanisme dans

le cas réparti, puis étudions l'impact sur le processus scénario dans son ensemble en présentant les politiques de répartition de haut niveau.

#### 4.2.1. Modes de synchronisation

Il est difficile d'offrir une synchronisation forte (par exemple avec une précision d'une milliseconde, dans un système réparti[14]. Une contrainte additionnelle est le fonctionnement du système sur du matériel non-professionnel, n'offrant donc pas le support de fonctionnalités telles que Ethernet synchrone ou PTP.

On identifie deux possibilités de synchronisation, manifestant leur utilité dans des cas différents :

- Mode synchrone : respecte la sémantique d'i-score : les éléments s'exécutent dans le même ordre que si le scénario n'était pas réparti, au prix d'une latence augmentée en présence d'interactivité.
- Mode asynchrone : ne respecte pas la sémantique d'i-score : une exécution d'un objet peut terminer après que l'exécution de l'objet suivant ait commencé. En revanche, la latence est diminuée.

De plus, on considère la manière dont l'information se propage dans le système :

- Instantanée : lorsqu'une information interactive est disponible dans le système (par exemple «une expression se vérifie»), elle est propagée le plus vite possible aux autres clients qui doivent appliquer le résultat de cette information. Ce mode permet de réduire la latence, au prix de décalages plus importants entre différentes machines.
- Précalculée : lorsqu'une information est disponible dans le système, elle est propagée de manière à ce que la date absolue de réalisation soit la même (pour un observateur externe) pour tous les clients. On prend en compte pour ce faire les horloges et la latence relative de chaque client. C'est utile notamment dans le cas non-interactif : dès qu'une date peut être fixée, elle l'est, et les clients n'attendent pas de message annonçant la fin. Il convient de rappeler qu'il est physiquement impossible d'exécuter les objets avec la même précision temporelle que s'ils étaient exécutés dans un même tic d'horloge sur le même client : l'objectif est de minimiser les décalages temporels.

Les quatre modes possibles permettent de faire des choix à l'écriture en fonction des besoins en terme de consistance et de latence.

Notamment, le mode asynchrone instantané va offrir les plus basses latences au détriment de l'ordre d'exécution des objets. Inversement, le mode synchrone précalculé permet d'offrir une synchronisation forte qui peut être utile pour des processus média. On aurait par exemple tendance à choisir ce mode pour

démarrer des lectures de vidéo synchronisées sur plusieurs machines.

De manière générale, on repose sur une bonne synchronisation des horloges au niveau du système. L'algorithme d'exécution d'i-score compense en effet les délais à chaque tic si l'horloge système se resynchronise. Plus la synchronisation des horloges sera fine entre les clients et plus l'exécution se rapprochera de l'exécution théorique non répartie.

Les différents modes de synchronisation vont impacter :

- L'exécution des points d'interaction.
- La vérification de la validité des conditions.
- Le changement de vitesse d'exécution des contraintes temporelles.

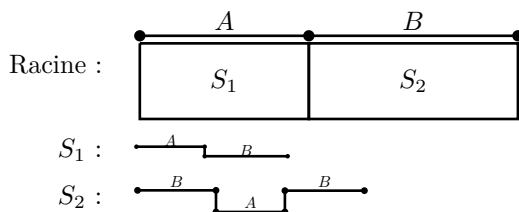
Lorsqu'un choix doit être fait, un consensus peut être pris au niveau du groupe auquel est assigné l'objet. Par exemple, quelle va être la vitesse à laquelle une contrainte temporelle va s'exécuter. Les mécanismes de consensus possibles sont détaillés plus en détail par la suite.

#### 4.2.2. Cas interactif

Trois niveaux de partage :

- Partage complet : il n'y a qu'une seule ligne temporelle partagée pour tous les clients. Les annotations de groupes indiquent l'emplacement d'exécution. Elles servent à indiquer ou non l'exécution d'un processus sur un client, et le groupe devant parvenir à un consensus pour une expression donnée. Si par exemple la vitesse d'exécution d'une contrainte est modifiée en temps réel, cette modification est répercutée sur tous les clients qui l'exécutent.

Cela permet notamment de gérer la répartition d'objets à des niveaux hiérarchiques différents : dans le scénario 1, si le scénario racine est dans ce mode, alors on peut correctement faire exécuter les scénarios enfants en prenant en compte les groupes de leurs objets.



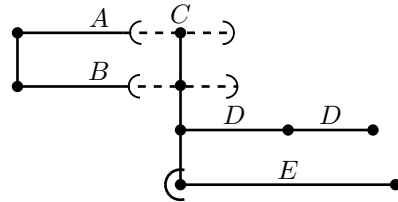
Scénario 1 : Deux contraintes possédant chacune un scénario hiérarchique

- Aucun partage : les clients n'étant pas associées à ce processus ne l'exécutent pas, ceux qui y sont associées l'exécutent tous de manière indépendante. Si par exemple on assigne le groupe  $A$  au scénario 2, tous les clients de  $A$  vont exécuter tous les éléments, sans communiquer sur leurs

résultats. Par exemple, pour deux clients  $A_1$  et  $A_2$ , le point d'interaction pourra se déclencher à des instants différents, et la condition pourra avoir une valeur différente.

Cela implique que les annotations de groupes assignés aux objets du scénario sont ignorés, récursivement : puisque chaque exécution va avoir des temps différents par conception, il ne peut pas vraiment y avoir de synchronisation. La seule politique d'exécution qui pourrait faire sens serait que le premier client à valider un point d'interaction dans un scénario non partagé avertirait les clients suivants.

Ce cas est notamment utile pour avoir des sous-scénarios dont plusieurs participants à une installation artistique peuvent faire l'expérience en même temps, tout en gardant une trame générale de plus haut niveau. Typiquement, on peut imaginer ce cas pour une application mobile.



Scénario 2 : Un scénario interactif avec des interactions et des conditions ;  $A, B, C, D, E$  sont les groupes associés aux éléments du modèle. On suppose l'existence de processus de contenus dans chaque contrainte temporelle.

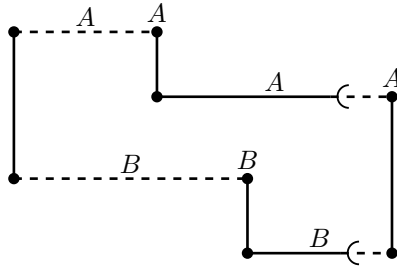
- Mixte : il peut y avoir plusieurs lignes temporelles appartenant à différents groupes dans un même scénario. Ces lignes peuvent ensuite se resynchroniser à un instant donné.

Les annotations donnent l'emplacement d'exécution des contraintes, des processus, et de vérification des expressions.

Considérons le scénario 3. La différence avec le cas «partage complet» tient dans le fait que seuls les clients appartenant au groupe  $A$  vont exécuter la contrainte  $A$ , sans avoir l'obligation de se synchroniser entre eux. L'important est qu'une synchronisation ait lieu pour tous les clients appartenant à  $A$  et  $B$  lors du dernier point d'interaction.

Là encore, en raison de possibilités d'exécutions divergentes du même contenu, il est impossible d'offrir une répartition hiérarchique cohérente.

- Il serait possible d'imaginer une variante au cas mixte : on pourrait synchroniser chaque branche partagée, mais ne pas synchroniser les branches entre elles.



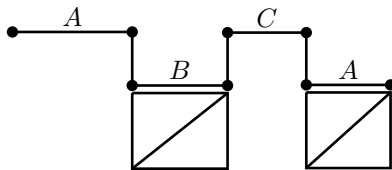
Scénario 3 : Deux branches exécutées chacune par un groupe différent.

#### 4.2.3. Cas non-interactif

On peut utiliser les méthodes de synchronisation décrites précédemment, mais il est possible d'étendre le mode pré-calculé :

Comme on connaît les dates effectives auxquelles les objets sont sensés s'exécuter, on peut les fixer à l'avance sur chaque machine. Un parcours de graphe permet d'obtenir une estimation des dates minimales auxquelles il est possible de fixer des dates d'exécutions des éléments suivant un point d'interaction donné. Ce principe de pré-calcul permet d'offrir dans une certaine mesure une tolérance au partitionnement : s'il y a une déconnexion, l'exécution va continuer à fonctionner au moins jusqu'au prochain point d'interaction. Cela peut laisser du temps à un régisseur pour régler le problème. En revanche, puisqu'il n'y a pas d'ordonnement au moment des points d'interaction, il suffit d'un peu de délai pour que, dans le scénario ??, le début de l'exécution sur *B* survienne avant la fin de l'exécution sur *A*. Il est donc particulièrement important dans ce cas de garder les horloges des machines synchronisées.

On notera que modifier la vitesse d'exécution des éléments en temps réel implique de mettre à jour les estimations de dates sur toutes les autres machines. En autorisant cela, on perd donc une certaine tolérance au partitionnement.



Scénario 4 : Les groupes *A*, *B*, *C* exécutent des contraintes temporelles pouvant contenir des processus les uns à la suite des autres

#### 4.2.4. Expressions et interactivité

Dans le cas où un scénario est exécuté intégralement en parallèle par différentes machines, il n'y a pas de problème : chacune vérifie les expressions en fonction des données dont elle dispose, et les valide à l'instant où elle le souhaite. C'est utile si par exemple on veut

avoir plusieurs téléphones qui font tous tourner un scénario semblable, mais chaque individu peut choisir de faire avancer le scénario au rythme où il le souhaite.

Dans le cas où on a un partage de certaines lignes temporelles par certaines machines, le problème de la synchronisation des expressions et de leurs dates d'évaluation se pose.

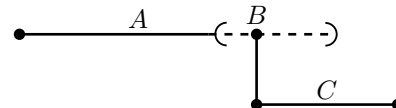
- Prise de décision : s'il n'y a qu'une seule ligne temporelle, chaque expression doit n'avoir qu'une valeur de vérité. Il doit donc y avoir un consensus sur la valeur de cette expression. De même pour la vitesse d'exécution des éléments. Plusieurs manières d'obtenir un consensus sont possibles :

- Dans le cas des conditions, au moins une machine valide ou nie l'expression.
- Dans le cas des points d'interaction, on peut fixer la valeur de l'expression à celle de la première machine qui la vérifie, à l'aide des estampilles.
- Dans le cas des points d'interaction, une majorité de machines valident l'expression.
- Toutes les machines valident ou nient l'expression.
- On peut supposer que des sous-parties d'un scénario pourraient être exécutées entièrement par une machine ou groupe.

On note plusieurs problèmes possibles :

- La déconnexion intempestive d'un client lors d'une prise de décision. Dans ce cas, on peut s'informer de la déconnexion, en effectuant un ping régulier, et prendre la décision avec les participants restants.
- Le cas d'un ex æquo, si un groupe a un nombre pair de participants. Il existe plusieurs possibilités de résolution :
  - Choisir en fonction des estampilles : le premier choix est celui qui est retenu.
  - Nommer un chef de groupe qui permet de départager.
  - Choisir au hasard.

Ordonnement : par estampilles.



Scénario 5 : Des groupes *A* et *C* exécutent les deux contraintes temporelles tandis qu'un groupe *B* atteint un consensus sur l'expression

Le scénario 5 peut se résoudre de plusieurs manières.

- Si l'exécution du nœud est résolue de manière asynchrone, toutes les machines de *B* envoient l'information de déclenchement à toutes les machines de *A* et *C*, sans garantie d'ordre. Les points d'interaction se déclenchent immédiate-

ment.

Note : si on veut garantir un ordre, ne peut-on pas faire :  $C$  stoppe  $A$  qui démarre  $B$  ? Ou bien si la borne max est atteinte,  $A$  stoppe  $C$  et déclenche  $B$ .

- Si l'exécution du nœud est résolue de manière synchrone :
  - Si la condition devient vraie, par consensus. On choisit une date, et on fixe l'arrêt des machines de  $A$  et le départ des machines de  $B$  par rapport à cette date, calculée en fonction des latences relatives. Potentiellement introduire un tick d'écart entre la fin de  $A$  et le démarrage de  $B$  ?
  - Si on atteint la borne max : une machine est nécessairement la première à atteindre cette borne.

#### 4.2.5. Consensus

Comme mentionné précédemment, nous nous trouvons face à plusieurs cas ou plusieurs clients doivent s'accorder sur le résultat d'une expression.

Paxos et ses variantes[8], ainsi que Raft[11] sont des algorithmes permettant de garantir un consensus sur une information dans un système réparti.

On sépare la synchronisation du consensus du mécanisme d'exécution qui suit la résolution de ce consensus :

1. Les nœuds impliqués dans l'expression décident de la valeur de vérité.
2. Une fois cette valeur connue, tous les nœuds précédant, suivant, et impliquant l'expression sont inclus dans la décision de la date d'exécution.

#### 4.3. Récapitulatif

On choisit pour la répartition un modèle de document partagé : toutes les machines voient le même document, mais peuvent chacune en interpréter des sous-parties différemment à la discrétion du compositeur.

On introduit une notion de client (potentiellement une machine physique) et de groupe. Un groupe peut contenir plusieurs clients, et un client peut être présent dans plusieurs groupes.

Différents objets du modèle d'i-score peuvent être assignés à un ou plusieurs groupes :

- Les processus
- Les expressions
- Les contraintes temporelles

Donner un groupe à une contrainte temporelle propage ce groupe à tous ses processus enfants.

Pour le cas du processus scénario, la répartition peut avoir lieu de manière synchrone ou asynchrone, avec ou sans partage d'informations entre clients.

On remarquera que le problème de la répartition peut se voir comme deux cas :

- Exécutions en parallèle (les éléments d'un même groupe).
- Exécutions en série (les éléments d'un scénario qui se suivent).

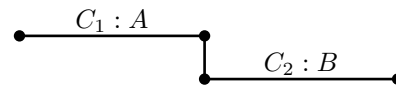
## 5. SÉMANTIQUE

On décrit ici la sémantique des différentes méthodes de synchronisation vues précédemment.

On fait le choix de décrire ce modèle via la sémantique existante de i-score ; en effet, on dispose déjà de primitives de synchronisation et d'envoi de message.

### 5.1. Cas non-interactif

Le premier cas (scénario 6) étudié est celui du déplacement : deux contraintes  $C_1$ ,  $C_2$  se suivent, on veut que la première s'exécute sur les clients d'un groupe  $A$ , et que la seconde s'exécute sur les clients d'un groupe  $B$ . on applique les transformations suivantes :



Scénario 6 : Deux contraintes temporelles se suivent

1. On crée une bifurcation au niveau du premier nœud temporel, avant  $C_1$ .
2. On introduit une contrainte temporelle  $C_{1 \rightarrow 2}$ .
3. On déplace  $C_2$  à la suite de cette contrainte temporelle.
4. Si on se trouve dans le cas asynchrone : on crée un message  $M_1$  qui ira déclencher  $T_1$  et on rend  $C_{1 \rightarrow 2}$  souple. Dès qu'une machine de  $A$  arrivera à  $M_1$ , le message sera envoyé.
5. Si on se trouve dans le cas pré-calculé : la durée calculée sera celle de  $C_{1 \rightarrow 2}$ . Les machines du groupe  $A$  et  $B$  peuvent être déconnectées après le début de la lecture et continueront à fonctionner comme prévu.

Quand il n'y a pas de point d'interaction, le cas simultané n'offre pas d'avantages par rapport au cas précalculé.

### 5.2. Cas interactif

On prend ici le scénario 4, qui possède un point d'interaction, géré par le groupe  $B$ .

- $T_B$  : consensus du groupe sur l'expression  $B$
- $T_A : M_A$ ,  $T_D : M_D$ ,  $T_C : M_C$

Dans le cas asynchrone non-ordonné,  $M_A$ ,  $M_D$ ,  $M_C$  sont des messages qui vont déclencher les point d'interaction  $T_A$ ,  $T_D$ ,  $T_C$  dès qu'ils sont reçus.

Dans le cas asynchrone ordonné : les messages partent le plus tôt possible, mais  $C$ ,  $D$ , ne peuvent se déclencher avant la fin de  $A$ .

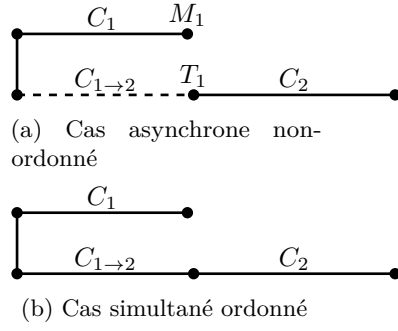


Figure 3 : Transformations pour l'exécution de deux contraintes en série sur deux machines séparées

Dans le cas simultané, la structure est la même que dans le cas asynchrone non-ordonné. La différence est dans les messages qui sont envoyés :  $M_A, M_D, M_C$  fixent la date à laquelle  $T_A, T_D, T_C$  doivent partir.

On notera qu'il serait possible d'exprimer des variantes plus fines : par exemple rendre simultanés les fins de  $A, D$  mais pas le début de  $C$ . Néanmoins, ce travail a pour objectif de ne pas encombrer le compositeur d'une finesse trop peu souvent nécessaire, en lui offrant un accès facile à des concepts de haut-niveau dont la nécessité est apparue lors des études de cas.

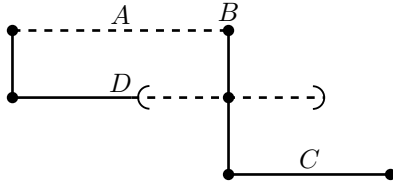


Figure 4 : Un scénario possédant un point d'interaction que l'on veut répartir sur les clients des groupes  $A, B, C, D$

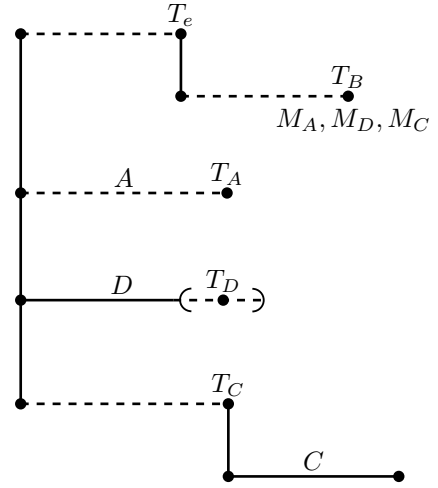


Figure 5 : Répartition du scénario (a) dans le cas asynchrone non-ordonné : les contraintes associées aux groupes  $A, D$  et la contrainte associée au groupe  $C$  s'arrêteront et démarreront sans ordre prévisible.



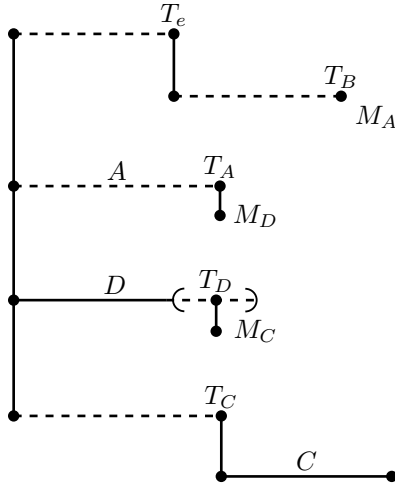


Figure 6 : Répartition du scénario (a) dans le cas asynchrone ordonné : les contraintes associées aux groupes  $A$ ,  $D$  et la contrainte associée au groupe  $C$  s'arrêteront dans l'ordre, avec un délai potentiel entre la fin de  $A$ ,  $D$  et le début de  $C$ .

## 6. ÉVALUATION

- Comparaison de l'algorithme "simple" et de l'algorithme avec retard
- Latence : prendre moyenne et écart-type sur les dix dernières valeurs ? Ou juste dernière valeur ? En LAN gigabit on est en général  $<$  à une milliseconde.

## 7. CONCLUSION

## Références

- [1] Alexander Carôt, Torben Hohn et Christian Werner. Netjack-Remote music collaboration with electronic sequencers on the Internet. 2009.
- [2] Alexander Carôt, Pedro Rebelo et Alain Renaud. "Networked music performance : State of the art". In : Audio engineering society conference : 30th international conference : intelligent audio environments. Audio Engineering Society. 2007.
- [3] Jean-Michaël Celerier, Myriam Desainte-Catherine et Jean-Michel Couturier. "Rethinking the audio workstation : tree-based sequencing with i-score and the LibAudioStream". In : Sound and Music Computing Conference. 2016.
- [4] Jean-Michaël Celerier et al. "OSSIA : Towards a unified interface for scoring time and interaction". In : TENOR2015. 2015.
- [5] James C Corbett et al. "Spanner : Google's globally distributed database". In : ACM Transactions on Computer Systems (TOCS) 31.3 (2013), p. 8.
- [6] Martin K Koszolk. "Crowdsourcing, jamming and remixing : a qualitative study of contemporary music production practices in the cloud". In : Journal on the Art of Record Production 10 (2015).
- [7] Sandeep S Kulkarni et al. "Logical physical clocks". In : International Conference on Principles of Distributed Systems. Springer. 2014, p. 17–32.
- [8] Leslie Lamport. "The part-time parliament". In : ACM Transactions on Computer Systems (TOCS) 16.2 (1998), p. 133–169.
- [9] Leslie Lamport. "Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system". In : Communications of the ACM 21.7 (1978), p. 558–565.
- [10] David L Mills. "Internet time synchronization : the network time protocol". In : Communications, IEEE Transactions on 39.10 (1991), p. 1482–1493.
- [11] Diego Ongaro et John Ousterhout. "In search of an understandable consensus algorithm". In : 2014 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 14). 2014, p. 305–319.
- [12] Yu Peng-Fei et al. "The research of precision time protocol IEEE1588". In : the international conference on Electrical Engineering. 2009.
- [13] Joseph Michael Pignato et Grace M Begany. "deterritorialized, multilocalized and distributed : Musical space, poietic domains and cognition in distance collaboration". In : Journal of Music, Technology & Education 8.2 (2015), p. 111–128.
- [14] Justin Sheehy. "There is no now". In : Communications of the ACM 58.5 (2015), p. 36–41.