



HAL
open science

Ré-identification sans coordination dans les types de données répliquées sans conflits (CRDTs)

Matthieu Nicolas

► **To cite this version:**

Matthieu Nicolas. Ré-identification sans coordination dans les types de données répliquées sans conflits (CRDTs). Algorithme et structure de données [cs.DS]. Université de Lorraine, 2022. Français. NNT : 2022LORR0375 . tel-04312434

HAL Id: tel-04312434

<https://theses.hal.science/tel-04312434>

Submitted on 28 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Ré-identification sans coordination dans les types de données répliquées sans conflits (CRDTs)

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 20 Décembre 2022

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine
(mention informatique)

par

Matthieu Nicolas

Composition du jury

<i>Président :</i>	Stephan Merz	Directeur de Recherche, Inria Nancy - Grand Est
<i>Rapporteurs :</i>	Hanifa Boucheneb Davide Frey	Professeure, Polytechnique Montréal Chargé de recherche, HdR, Inria Rennes Bretagne-Atlantique
<i>Examineur :</i>	Hala Skaf-Molli	Professeure des Universités, Nantes Université, LS2N
<i>Encadrants :</i>	Olivier Perrin Gérald Oster	Professeur des Universités, Université de Lorraine, LORIA Maître de conférences, Université de Lorraine, LORIA

Mis en page avec la classe thesul.

Remerciements

Cette thèse a été rendue possible par les personnes qui m’ont accompagné au cours de ces dernières années. Cette page est une tentative maladroite pour leur adresser les remerciements qui leur sont dûs.

En premier lieu, je remercie mes directeurs de thèse, Olivier Perrin et Gérald Oster. Ils ont su m’apporter leur soutien tout au long de cette thèse, particulièrement lors des périodes difficiles. Ils ont aussi su me partager leur perspicacité, et m’ont aidé par leurs conseils à grandir en tant que chercheur.

Je pense ensuite aux membres de mon jury de thèse, que je remercie pour l’intérêt qu’ils ont montré pour mes travaux et pour leurs remarques et questions constructives. En particulier, je remercie Hanifa Boucheneb et Davide Frey pour avoir accepté le rôle de rapporteur-riche et le temps qu’iels ont consacré à l’étude de mon manuscrit. Je remercie également Stephan Merz pour son investissement dans son rôle de référent scientifique.

Je remercie celles et ceux que j’ai eu la chance de cotoyer quotidiennement lors de ces dernières années, c.-à-d. les membres de l’équipe Coast¹. Ainsi, je pense tout d’abord à Victorien Elvinger. Tu es un exemple pour moi, de par ta rigueur, ta curiosité et les valeurs que tu défends si passionnément ; je ne trouve tout simplement pas de mots pour te remercier pour tout ce que tu m’as apporté. Je remercie également Quentin Laporte-Chabasse, pour avoir été à mon écoute à de si nombreuses reprises ; Abir Ismaili-Alaoui, pour nos longues discussions cathartiques sur nos questions existentielles respectives ; Cédric Enclos, pour son aide à la réalisation de mes travaux ; Vinh Dang, pour m’avoir fait comprendre mon envie d’entreprendre une thèse ; et Claudia-Lavinia Ignat et François Charoy, pour les efforts qu’ils m’ont consacré et pour leur patience. De manière plus informelle, je remercie Philippe Kalitine, Luc André, Jordi Martori, Medhi Ahmed-Nacer, Amina Ahmed-Nacer, Sophie Drouot, Martine Gautier, Brigitte Wrobel-Dautcourt, Hoai Le Nguyen, Hoang Long Nguyen, Guillaume Rosinosky, Gêrôme Canals, Kahina Bessai, Chahrazed Labba, Siavash Atarodi, Jean-Philippe Eisenbach, Riyadh Abdmeziem, Béatrice Linot, Anis Ahmed-Nacer, Sylvie Musilli, Ishara Chan-Tung, Alexandre Bourbeillon, Clélie Amiot, Claude Godart, Linda Ouchaou, Pierre Antoine Rault, Tom Mendez-Porcel et Baptiste Hubert pour le temps que nous avons partagé.

Je remercie également le personnel d’accueil, d’entretien et de restauration du Loria, qui rendent possible les excellentes conditions de travail au sein du laboratoire. Tout particulièrement, je remercie Isabelle, Caro et Floriane pour leur soutien, notamment en pâtisseries et café.

Je remercie mes amis, Alexandre Merlin, Clément Parisot, Jonathan Delamare, Jonathan Senky, Alexandre Delamare, Glasfeu, Gogeon et Haken pour leur présence et pour les bouffées d’air frais qu’ils m’ont offert en marge de ma thèse.

Je remercie ma famille pour avoir contribué à la personne que je suis et pour m’avoir toujours soutenu. Je pense en particulier à mes parents, Sandrine Nicolas et Michel Nicolas ; à mon frère, Guillaume Nicolas ; et à mes grands-parents, Claudine Volff et Jean-Marie Volff.

Je remercie les créateur-rices de contenus Ysangwen, Modiie et Shisheyu, et les artistes

1. Au sens large.

Masayoshi Soken, Masashi Hamauzu, Darren Korb et Andrew Prahlow, pour m'avoir accompagné, diverti et galvanisé tout au long de ces années.

Finalement, je remercie celles et ceux que j'ai malheureusement oublié lors de la rédaction de ces lignes.

À mes grands-parents

Table des matières

Chapitre 1	
Introduction	1
1.1	Contexte 1
1.2	Questions de recherche et contributions 6
1.2.1	Ré-identification sans coordination synchrone pour les Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs) pour le type Séquence 6
1.2.2	Éditeur de texte collaboratif pair-à-pair (P2P) temps réel chiffré de bout en bout 7
1.3	Plan du manuscrit 8
Chapitre 2	
État de l’art	11
2.1	Modèle du système 12
2.2	Types de données répliquées sans conflits 13
2.2.1	Sémantiques en cas de conflits 17
2.2.2	Modèles de synchronisation 21
2.3	Séquences répliquées sans conflits 30
2.3.1	Approche à pierres tombales 34
2.3.2	Approche à identifiants densément ordonnés 42
2.3.3	Synthèse 50
2.4	LogootSplit 53
2.4.1	Identifiants 53
2.4.2	Aggrégation dynamique d’éléments en blocs 54
2.4.3	Modèle de données 56
2.4.4	Modèle de livraison 58
2.4.5	Limites de LogootSplit 61
2.5	Mitigation du surcoût des séquences répliquées sans conflits 63

2.5.1	Mécanisme de Garbage Collection des pierres tombales	63
2.5.2	Ré-équilibrage de l'arbre des identifiants de position	64
2.5.3	Ralentissement de la croissance des identifiants de position	64
2.5.4	Synthèse	65
2.6	Synthèse	66
2.7	Proposition	67

Chapitre 3	
Renommage dans une séquence répliquée	69

3.1	Introduction de l'opération de renommage	71
3.1.1	Opération de renommage proposée	71
3.1.2	Gestion des opérations d'insertion et de suppression concurrentes au renommage	73
3.1.3	Évolution du modèle de livraison des opérations	77
3.2	Gestion des opérations de renommage concurrentes	79
3.2.1	Conflits en cas de renommages concurrents	79
3.2.2	Relation de priorité entre renommages	80
3.2.3	Algorithme d'annulation de l'opération de renommage	82
3.3	Mécanisme de Garbage Collection des anciens états obsolètes	88
3.4	Validation	91
3.4.1	Complexité en temps des opérations	91
3.4.2	Expérimentations	96
3.4.3	Résultats	97
3.5	Discussion	105
3.5.1	Stratégie de génération des opérations de renommage	105
3.5.2	Stockage des états précédents sur disque	107
3.5.3	Compression et limitation de la taille de l'opération de renommage	107
3.5.4	Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements . .	108
3.5.5	Report de la transition vers la nouvelle époque cible	109
3.5.6	Utilisation de l'opération de renommage comme mécanisme de com- pression du journal des opérations	110
3.5.7	Implémentation alternative de l'intégration de l'opération de renom- mage basée sur le journal des opérations	112
3.6	Comparaison avec les approches existantes	114
3.6.1	Ré-équilibrage de l'arbre des identifiants de position	114

3.6.2	Ralentissement de la croissance des identifiants de position	115
3.7	Conclusion	115

Chapitre 4

MUTE, un éditeur de texte web collaboratif P2P temps réel chiffré de bout en bout **117**

4.1	Présentation	118
4.1.1	Objectifs	118
4.1.2	Fonctionnalités	119
4.1.3	Architecture système	120
4.1.4	Architecture logicielle	122
4.2	Couche interface utilisateur	124
4.3	Couche réplication	125
4.3.1	Modèle de données du document texte	125
4.3.2	Collaborateur-rices	126
4.3.3	Curseurs	131
4.4	Couche livraison	131
4.4.1	Livraison des opérations en exactement un exemplaire	132
4.4.2	Livraison de l'opération <i>remove</i> après l'opération <i>insert</i>	134
4.4.3	Livraison des opérations après l'opération <i>rename</i> introduisant leur époque	136
4.4.4	Livraison des opérations à terme	138
4.5	Couche réseau	140
4.5.1	Établissement d'un réseau P2P entre navigateurs	140
4.5.2	Topologie réseau et protocole de diffusion des messages	142
4.6	Couche sécurité	143
4.7	Conclusion	145

Chapitre 5

Conclusions et perspectives **147**

5.1	Résumés des contributions	147
5.1.1	Réflexions sur l'état de l'art des CRDTs	147
5.1.2	Ré-identification sans coordination pour les CRDTs pour le type Séquence	149
5.1.3	Éditeur de texte collaboratif P2P chiffré de bout en bout	151

5.2	Perspectives	153
5.2.1	Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements . .	153
5.2.2	Étude comparative des différents modèles de synchronisation pour CRDTs	155
5.2.3	Proposition d'un framework pour la conception de CRDTs synchro- nisés par opérations	156

Annexe A
Liste des publications

Annexe B
Entrelacement d'insertions concurrentes dans Treedoc

Annexe C
Algorithmes RENAMEID

Annexe D
Algorithmes REVERTRENAMEID

Bibliographie

Table des figures

1.1	Représentation d'une architecture décentralisée	2
1.2	Représentation d'une architecture distribuée	4
1.3	Évaluation d'applications et de technologies vis-à-vis des 7 propriétés visées par les applications Local-First Softwares	5
2.1	Spécification algébrique du type abstrait usuel Ensemble	15
2.2	Modifications concurrentes d'un Ensemble répliqué provoquant un conflit suite à l'ajout et la suppression d'un même élément	15
2.3	Résolution du conflit en utilisant la sémantique <i>Last-Writer-Wins</i> (LWW)	18
2.4	Résolution du conflit en utilisant la sémantique <i>Multi-Value</i> (MV)	18
2.5	Résolution du conflit en utilisant soit la sémantique <i>Add-Wins</i> (AW), soit la sémantique <i>Remove-Wins</i> (RW)	20
2.6	Résolution du conflit en utilisant la sémantique <i>Causal-Length</i> (CL)	20
2.7	Modifications en concurrence d'un Ensemble répliqué par les noeuds A et B	21
2.8	Synchronisation des noeuds A et B en adoptant le modèle de synchronisation par états	23
2.9	Synchronisation des noeuds A et B en adoptant le modèle de synchronisation par opérations	25
2.10	Synchronisation des noeuds A et B en adoptant le modèle de synchronisation par différences d'états	28
2.11	Représentation de la séquence "HELLO"	31
2.12	Spécification algébrique du type abstrait usuel Séquence	31
2.13	Modifications concurrentes d'une séquence	32
2.14	Modifications concurrentes d'une séquence répliquée WOOT	35
2.15	Modifications concurrentes d'une séquence répliquée Replicated Growable Array (RGA)	39
2.16	Entrelacement d'éléments insérés de manière concurrente	41
2.17	Arbre pour générer des identifiants de positions	43
2.18	Identifiants de position avec désambiguateurs	43
2.19	Modifications concurrentes d'une séquence répliquée Treedoc	44
2.20	Modifications concurrentes d'une séquence répliquée Logoot	48
2.21	Représentation d'une séquence LogootSplit contenant les éléments "HLO"	55
2.22	Spécification algébrique du type abstrait LogootSplit	56
2.23	Modifications concurrentes d'une séquence répliquée LogootSplit	57

2.24	Résurgence d'un élément supprimé suite à la relivraison de son opération <i>insert</i>	59
2.25	Non-effet de l'opération <i>remove</i> car reçue avant l'opération <i>insert</i> correspondante	60
2.26	Insertion menant à une augmentation de la taille des identifiants	61
2.27	Insertion menant à une augmentation de la taille des identifiants	62
2.28	Taille du contenu comparé à la taille de la séquence LogootSplit	63
3.1	Renommage de la séquence sur le noeud <i>A</i>	72
3.2	Modifications concurrentes menant à une anomalie	73
3.3	Renommage de la modification concurrente avant son intégration en utilisant <code>renameId</code> afin de maintenir l'ordre souhaité	75
3.4	Livraison d'une opération <i>insert</i> sans avoir reçu l'opération <i>rename</i> précédente	77
3.5	Livraison désordonnée d'une opération <i>rename</i> et de l'opération <i>insert</i> qui la précède	79
3.6	Opérations <i>rename</i> concurrentes menant à des états divergents	79
3.7	<i>Arbre des époques</i> correspondant au scénario décrit dans la figure 3.6	80
3.8	Sélectionner l'époque cible d'une exécution d'opérations <i>rename</i> concurrentes	81
3.9	Annulation d'une opération <i>rename</i> intégrée précédemment en présence d'un identifiant inséré en concurrence	82
3.10	Annulation d'une opération <i>rename</i> intégrée précédemment en présence d'identifiants insérés postérieurement	86
3.11	Suppression des époques obsolètes et récupération de la mémoire des <i>anciens états</i> associés	90
3.12	Évolution de la taille du document en fonction du CRDT utilisé et du nombre de <i>renaming bots</i> dans la collaboration	98
3.13	Temps d'intégration des opérations standards	100
3.14	Progression du nombre d'opérations du journal rejouées en fonction du temps	103
3.15	Livraison d'une opération <i>rename</i> d'un noeud	108
4.1	Capture d'écran d'une session d'édition collaborative avec MUTE	120
4.2	Capture d'écran de la liste des documents.	121
4.3	Architecture système de l'application MUTE	121
4.4	Architecture logicielle de l'application MUTE	123
4.5	Entrelacement de balises Markdown produisant une anomalie de style	126
4.6	Exécution du mécanisme de détection des défaillances par le noeud <i>C</i> pour tester le noeud <i>B</i>	127
4.7	Gestion de la livraison en exactement un exemplaire des opérations	133
4.8	Gestion de la livraison des opérations <i>remove</i> après les opérations <i>insert</i> correspondantes	135
4.9	Gestion de la livraison des opérations après l'opération <i>rename</i> qui introduit leur époque	137
4.10	Gestion de la livraison des opérations à terme	139
4.11	Architecture système pour la couche réseau de MUTE	141

4.12	Topologie réseau entièrement maillée	142
4.13	Architecture système pour la couche sécurité de MUTE	144
B.1	Entrelacement d'insertions concurrentes dans une séquence Treedoc	163

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Contexte	1
1.2	Questions de recherche et contributions	6
1.2.1	Ré-identification sans coordination synchrone pour les CRDTs pour le type Séquence	6
1.2.2	Éditeur de texte collaboratif P2P temps réel chiffré de bout en bout	7
1.3	Plan du manuscrit	8

1.1 Contexte

L'évolution des technologies du web a conduit à l'avènement de ce qui est communément appelé le Web 2.0. La principale caractéristique de ce média est la possibilité aux utilisateur-rices non plus seulement de le consulter, mais aussi d'y contribuer.

Cette évolution a permis l'apparition d'applications incitant les utilisateur-rices à créer et partager leur propre contenu, ainsi que d'échanger avec d'autres utilisateur-rices à ce sujet. Un cas particulier de ces applications proposent aux utilisateur-rices de travailler ensemble pour la création d'un même contenu, en d'autres termes de collaborer. Nous appelons ces applications des *systèmes collaboratifs* :

Définition 1 (Système collaboratif). Un système collaboratif est un système supportant ses utilisateur-rices dans leurs processus de collaboration pour la réalisation de tâches.

De nos jours, ces systèmes font parties des applications les plus populaires du paysage internet, e.g. la suite logicielle dont fait partie GoogleDocs compte 2 milliards d'utilisateur-rices [1], Wikipedia 788 millions [2], Quora 300 millions [3] ou encore GitHub 60 millions [4]. De leur côté, d'autres plateformes fédèrent leur communautés en organisant ponctuellement des collaborations éphémères impliquant des millions d'utilisateur-rices, e.g. r/Place [5] ou TwitchPlaysPokemon [6].

En raison de leur popularité, les systèmes collaboratifs doivent assurer plusieurs propriétés pour garantir leur bon fonctionnement et qualité de service : une haute disponibilité, tolérance aux pannes et capacité de passage à l'échelle.

Définition 2 (Disponibilité). La disponibilité d'un système indique sa capacité à répondre à tout moment à une requête d'un-e utilisateur-riche.

Définition 3 (Tolérance aux pannes). La tolérance aux pannes d'un système indique sa capacité à continuer à répondre aux requêtes malgré l'absence de réponse d'un ou plusieurs de ses composants.

Définition 4 (Capacité de passage à l'échelle). La capacité de passage à l'échelle d'un système indique sa capacité à traiter un volume toujours plus conséquent de requêtes.

Pour cela, la plupart de ces systèmes adoptent une architecture décentralisée, que nous illustrons par la figure 1.1. Dans cette figure, les noeuds aux extrémités du graphe correspondent à des clients, les noeuds internes à des serveurs et les arêtes du graphe représentent les connexions entre appareils.

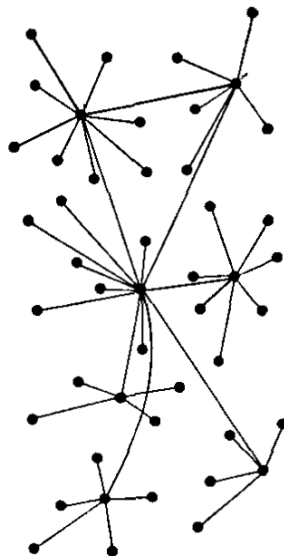


FIGURE 1.1 – Représentation d'une architecture décentralisée [7]

Dans ce type d'architecture, les responsabilités, tâches et la charge travail sont réparties entre un ensemble de serveurs. Malgré ce que le nom de cette architecture peut suggérer, il convient de noter que les serveurs jouent toujours un rôle central dans ces systèmes. En effet, ces systèmes reposent toujours sur leurs serveurs pour authentifier les utilisateur-rices, stocker leurs données ou encore fusionner les modifications effectuées.

Bien que cette architecture système permette de répondre aux problèmes d'ordre technique que nous présentons précédemment, elle souffre néanmoins de limites. Notamment, de part le rôle prédominant que jouent les serveurs dans les systèmes décentralisés, ces derniers échouent à assurer un second ensemble de propriétés que nous jugeons néanmoins fondamentales :

Définition 5 (Confidentialité des données). La confidentialité des données d'un système indique sa capacité à garantir à ses utilisateur-rices que leurs données ne seront pas accessibles par des tiers non autorisés ou par le système lui-même.

Définition 6 (Souveraineté des données). La souveraineté des données d'un système indique sa capacité à garantir à ses utilisateur-rices leur maîtrise de leurs données, c.-à-d. leur capacité à les consulter, modifier, partager, exporter ; supprimer ou encore à décider de l'usage qui en est fait.

Définition 7 (Pérennité). La pérennité d'un système indique sa capacité à garantir à ses utilisateur-rices son fonctionnement continu dans le temps.

Définition 8 (Résistance à la censure). La résistance à la censure d'un système indique sa capacité à garantir à ses utilisateur-rices son fonctionnement malgré des actions de contrôle de l'information par des autorités.

De plus, les serveurs ne sont pas une ressource libre. En effet, ils sont déployés et maintenus par la ou les organisations qui proposent le système collaboratif. Ces organisations font alors office d'*autorités centrales* du système, e.g. en se portant garantes de l'identité des utilisateur-rices, de l'authenticité d'un contenu ou encore de la disponibilité dudit contenu.

De part le fait que les autorités centrales possèdent les serveurs hébergeant le système, elles ont tout pouvoir sur ces derniers. Ainsi, les utilisateur-rices de systèmes collaboratifs prennent, de manière consciente ou non, le risque que les propriétés présentées précédemment soient transgressées par les autorités auxquelles appartiennent ces applications ou par des tiers avec lesquelles ces autorités interagissent, e.g. des gouvernements. Plusieurs faits d'actualités nous ont malheureusement montré de tels faits, e.g. la censure de Wikipedia par des gouvernements [8], la fermeture de services par les entreprises les proposant [9] ou encore la mise à disposition des données hébergées par des applications aux services de renseignement de différentes nations [10, 11]. Cependant, le coût conséquent de l'infrastructure nécessaire pour déployer des systèmes à large échelle équivalents entrave la mise en place d'alternatives, plus respectueuses de leurs utilisateur-rices.

Ainsi, il nous paraît fondamental de proposer des moyens technologiques rendant accessible la conception et le déploiement des systèmes collaboratifs alternatifs. Ces derniers devraient minimiser le rôle des autorités centrales, voire l'éliminer, de façon à protéger et privilégier les intérêts de leurs utilisateur-rices.

Dans cette optique, une piste de recherche que nous jugeons intéressante est celle des systèmes collaboratifs pair-à-pair (P2P). Cette architecture système, que nous illustrons par la figure 1.2, place les utilisateur-rices au centre du système et relègue les éventuels serveurs à un simple rôle de support de la collaboration, e.g. la mise en relation des pairs.

Récemment, la conception de systèmes collaboratifs P2P a gagné en traction suite à [12]. Dans cet article, les auteurs définissent un ensemble de propriétés qui correspondent à celles que nous avons établies précédemment, de la Définition 1 à la Définition 8. En

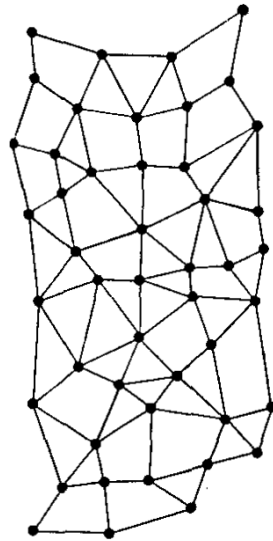


FIGURE 1.2 – Représentation d'une architecture distribuée [7]

utilisant ces propriétés comme critères, les auteurs comparent les fonctionnalités et garanties offertes par les différents types d'applications, notamment les applications lourdes et les applications basées sur le cloud.

La figure 1.3 détaille le résultat de cette comparaison : alors que les applications basées sur le cloud permettent de nouveaux usages, notamment la collaboration entre utilisateur-rices ou la synchronisation automatique entre appareils, elles retirent à leurs utilisateur-rices toute garantie de pérennité, confidentialité des données et souveraineté des données. Ces dernières propriétés sont pourtant communément offertes par les applications lourdes.

Malgré ce que ce résultat pourrait suggérer, les auteurs affirment que les nouveaux usages offerts par les applications basées sur le cloud ne sont pas antinomiques avec les propriétés de confidentialité, souveraineté, pérennité.

Ainsi, ils proposent un nouveau paradigme de conception d'applications collaboratives P2P, nommées Local-First Software (LFS). Ce paradigme vise à la conception d'applications offrant le meilleur des approches existantes, c.-à-d. des applications cochant l'intégralité des critères de la figure 1.3. Nous partageons cette vision.

Cependant, de nombreuses problématiques de recherche identifiées dans [12] sont encore non résolues et entravent la démocratisation des applications LFS, notamment celles à large échelle. Spécifiquement, les applications LFS se doivent de répliquer les données entre les appareils pour permettre :

- (i) Le fonctionnement en mode hors-ligne et le fonctionnement avec une faible latence.
- (ii) Le partage de contenu entre appareils d'un-e même utilisateur-ric-e.
- (iii) Le partage de contenu entre utilisateur-rices pour la collaboration.

Toutefois, compte tenu des propriétés visées par les applications LFS, plusieurs contraintes restreignent le choix des méthodes de réplification possibles. Ainsi, pour permettre le fonctionnement en mode hors-ligne de l'application, c.-à-d. la consultation et la modification

Technology	Section	1. Fast (§ 2.1)	2. Multi-device (§ 2.2)	3. Offline (§ 2.3)	4. Collaboration (§ 2.4)	5. Longevity (§ 2.5)	6. Privacy (§ 2.6)	7. User control (§ 2.7)
<i>Applications employed by end users</i>								
Files + email attachments	§ 3.1.1	✓	—	✓	●	✓	—	✓
Google Docs	§ 3.1.2	—	✓	—	✓	—	●	—
Trello	§ 3.1.2	—	✓	—	✓	—	●	●
Pinterest	§ 3.1.2	●	✓	●	✓	●	●	●
Dropbox	§ 3.1.3	✓	—	—	●	✓	—	✓
Git + GitHub	§ 3.1.4	✓	—	✓	—	✓	—	✓
<i>Technologies employed by application developers</i>								
Thin client (web apps)	§ 3.2.1	●	✓	●	✓	●	●	●
Thick client (mobile apps)	§ 3.2.2	✓	—	✓	●	—	●	●
Backend-as-a-service	§ 3.2.3	—	✓	✓	—	●	●	●
CouchDB	§ 3.2.4	—	—	✓	●	—	—	—

FIGURE 1.3 – Évaluation d’applications et de technologies vis-à-vis des 7 propriétés visées par les applications Local-First Softwares [12]. ✓, — et ● indiquent respectivement que l’application ou la technologie satisfait pleinement, partiellement ou aucunement le critère évalué.

de contenu, les applications LFS doivent obligatoirement relaxer la propriété de cohérence des données.

Définition 9 (Cohérence). La cohérence d’un système indique sa capacité à présenter une vue uniforme de son état à chacun de ses utilisateur-rices à un moment donné.

Ainsi, les applications LFS doivent autoriser les noeuds possédant une copie de la donnée à diverger temporairement, c.-à-d. à posséder des copies dans des états différents à un moment donné. Pour permettre cela, les applications LFS doivent adopter des méthodes de réplication dites optimistes [13], c.-à-d. qui permettent la consultation et la modification de la donnée sans coordination au préalable avec les autres noeuds². Un mécanisme de synchronisation permet ensuite aux noeuds de partager les modifications effectuées et de les intégrer de façon à converger [14], c.-à-d. obtenir de nouveau des états équivalents.

Il convient de noter que les méthodes de réplication optimistes autorisent la génération en concurrence de modifications provoquant un conflit, e.g. la modification et la suppression d’une même page dans un wiki. Un mécanisme de résolution de conflits est alors nécessaire pour assurer la cohérence à terme des noeuds.

2. Les méthodes de réplication optimistes s’opposent aux méthodes de réplication dites pessimistes qui nécessitent une coordination préalable entre les noeuds avant toute modification de la donnée et interdisent ainsi toute divergence

De nouveau, le modèle du système des applications que nous visons, c.-à-d. des applications LFS à large échelle, limitent les choix possibles concernant les mécanismes de résolution de conflits. Notamment, ces applications ne disposent d'aucun contrôle sur le nombre de noeuds qui compose le système, c.-à-d. le nombre d'appareils utilisés par l'ensemble de leurs utilisateur-rices. Ce nombre de noeuds peut croître de manière non bornée. Les mécanismes de résolution de conflits choisis devraient donc rester efficaces, indépendamment de l'évolution de ce paramètre.

De plus, les noeuds composant le système n'offrent aucune garantie sur leur stabilité. Des noeuds peuvent donc rejoindre et participer au système, mais uniquement de manière éphémère. Ce phénomène est connu sous le nom de *churn* [15]. Ainsi, de part l'absence de garantie sur le nombre de noeuds connectés de manière stable, les applications LFS à large échelle ne peuvent pas utiliser des mécanismes de résolution de conflits reposant sur une coordination synchrone d'une proportion des noeuds du système, c.-à-d. des mécanismes nécessitant une communication ininterrompue entre un ensemble de noeuds du système pour prendre une décision, e.g. des algorithmes de consensus [16, 17].

Ainsi, pour permettre la conception d'applications LFS à large échelle, il convient de disposer de mécanismes de résolution de conflits pour l'ensemble des types de données avec une complexité algorithmique efficace peu importe le nombre de noeuds et ne nécessitant pas de coordination synchrone entre une proportion des noeuds du système.

1.2 Questions de recherche et contributions

1.2.1 Ré-identification sans coordination synchrone pour les CRDTs pour le type Séquence

Les Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs)³ [18, 19] sont des nouvelles spécifications des types de données usuels, e.g. l'Ensemble ou la Séquence. Ils sont conçus pour permettre à un ensemble de noeuds d'un système de répliquer une donnée et pour leur permettre de la consulter, de la modifier sans aucune coordination préalable et d'assurer à terme la convergence des copies. Dans ce but, les CRDTs incorporent des mécanismes de résolution de conflits automatiques directement au sein leur spécification.

Cependant, ces mécanismes induisent un surcoût, aussi bien en termes de métadonnées et de calculs que de bande-passante. Ces surcoûts sont néanmoins jugés acceptables par la communauté pour une variété de types de données, e.g. le Registre ou l'Ensemble. Cependant, le surcoût des CRDTs pour le type Séquence constitue toujours une problématique de recherche.

En effet, la particularité des CRDTs pour le type Séquence est que leur surcoût croît de manière monotone au cours de la durée de vie de la donnée, c.-à-d. au fur et à mesure des modifications effectuées. Le surcoût introduit par les CRDTs pour ce type de données se révèle donc handicapant dans le contexte de collaborations sur de longues durées ou à large échelle.

De manière plus précise, le surcoût des CRDTs pour le type Séquence provient de la croissance des métadonnées utilisées par leur mécanisme de résolution de conflits automa-

3. Conflict-free Replicated Data Type (CRDT) : Type de données répliquées sans conflits

tique. Ces métadonnées correspondent à des identifiants qui sont associés aux éléments de la Séquence. Ces identifiants permettent d'intégrer les modifications, e.g. en précisant quel est l'élément à supprimer ou en spécifiant la position d'un nouvel élément à insérer par rapport aux autres.

Plusieurs approches ont été proposées pour réduire le coût induit par ces identifiants. Notamment, [20, 21] proposent un mécanisme de ré-assignation des identifiants pour réduire leur coût a posteriori. Ce mécanisme génère toutefois des conflits en cas de modifications concurrentes de la séquence, c.-à-d. l'insertion ou la suppression d'un élément. Les auteurs résolvent ce problème en proposant un mécanisme de transformation des modifications concurrentes par rapport à l'effet du mécanisme de ré-assignation des identifiants.

Cependant, l'exécution en concurrence du mécanisme de ré-assignation des identifiants par plusieurs noeuds provoque elle-même un conflit. Pour éviter ce dernier type de conflit, les auteurs choisissent de subordonner à un algorithme de consensus l'exécution du mécanisme de ré-assignation des identifiants. Ainsi, le mécanisme de ré-assignation des identifiants ne peut être déclenché en concurrence par plusieurs noeuds du système.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, reposer sur un algorithme de consensus qui requiert une coordination synchrone entre une proportion de noeuds du système est une contrainte incompatible avec les systèmes P2P à large échelle sujets au churn.

Notre problématique de recherche est donc la suivante : *pouvons-nous proposer un mécanisme sans coordination synchrone de réduction du surcoût des CRDTs pour le type Séquence, c.-à-d. adapté aux applications LFS ?*

Pour répondre à cette problématique, nous proposons dans cette thèse RenamableLogootSplit [22, 23, 24], un nouveau CRDT pour le type Séquence. Ce CRDT intègre un mécanisme de ré-assignation des identifiants, dit de renommage, directement au sein de sa spécification. Nous associons au mécanisme de renommage un mécanisme de résolution de conflits automatique additionnel pour gérer ses exécutions concurrentes. Finalement, nous définissons un mécanisme de Garbage Collection (GC)⁴ des métadonnées du mécanisme de renommage pour supprimer à terme son propre surcoût. De cette manière, nous proposons un CRDT pour le type Séquence dont le surcoût est périodiquement réduit, tout en n'introduisant aucune contrainte de coordination synchrone entre les noeuds du système.

1.2.2 Éditeur de texte collaboratif P2P temps réel chiffré de bout en bout

Comme évoqué précédemment, la conception d'applications LFS à large échelle présente un ensemble de problématiques issues de domaines variés, e.g.

- (i) Comment permettre aux utilisateur-rices de collaborer en l'absence d'autorités centrales pour résoudre les conflits de modifications ?
- (ii) Comment authentifier les utilisateur-rices en l'absence d'autorités centrales ?

4. Garbage Collection (GC) : Récupération de la mémoire

- (iii) Comment structurer le réseau de manière efficace, c.-à-d. en limitant le nombre de connexions par pair ?

Cet ensemble de questions peut être résumé en la problématique suivante : *pouvons-nous concevoir une application LFS à large échelle, sûre et sans autorités centrales ?*

Pour étudier cette problématique, l'équipe Coast développe l'application Multi User Text Editor (MUTE)⁵ [25]. Il s'agit d'un Proof of Concept (PoC)⁶ d'éditeur de texte web collaboratif P2P temps réel chiffré de bout en bout. Ce projet permet à l'équipe de présenter ses travaux de recherche portant sur les mécanismes de résolutions de conflits automatiques pour le type Séquence [26, 27, 24] et les mécanismes d'authentification des pairs dans les systèmes sans autorités centrales [28, 29].

De plus, en inscrivant ses travaux dans le cadre d'un système complet, ce projet permet à l'équipe d'identifier de nouvelles problématiques en relation avec les nombreux domaines de recherche nécessaires à la conception d'un tel système, e.g. le domaine des protocoles d'appartenance aux groupes [30, 31], des topologies réseaux P2P [32] ou encore des protocoles d'établissement de clés de chiffrement de groupe [33].

Dans le cadre de cette thèse, nous avons contribué au développement de ce projet. Nous avons notamment implémenté plusieurs travaux de la littérature : le CRDT pour le type Séquence LogootSplit [26] et le protocole d'appartenance au réseau SWIM [30]. À l'issue de nos travaux sur la réduction du surcoût des CRDTs pour le type Séquence dans les systèmes pair-à-pair, nous avons aussi implémenté notre proposition : le CRDT RenamableLogootSplit [24].

1.3 Plan du manuscrit

Ce manuscrit de thèse est organisé de la manière suivante :

Dans le chapitre 2, nous introduisons le modèle du système que nous considérons, c.-à-d. les systèmes P2P à large échelle sujets au churn et sans autorités centrales. Puis nous présentons dans ce chapitre l'état de l'art des CRDTs et plus particulièrement celui des CRDTs pour le type Séquence. À partir de cet état de l'art, nous identifions et motivons notre problématique de recherche, c.-à-d. l'absence de mécanisme adapté aux systèmes P2P à large échelle sujets au churn permettant de réduire le surcoût induit par les mécanismes de résolution de conflits automatiques pour le type Séquence.

Dans le chapitre 3, nous présentons notre approche pour réaliser un tel mécanisme, c.-à-d. un mécanisme de résolution de conflits automatiques pour le type Séquence auquel nous associons un mécanisme de Garbage Collection (GC) de son surcoût ne nécessitant pas de coordination synchrone entre les noeuds du système. Nous détaillons le fonctionnement de notre approche, sa validation par le biais d'une évaluation empirique puis comparons notre approche par rapport aux approches existantes. Finalement, nous concluons la présentation de notre approche en identifiant et en détaillant plusieurs de ses limites.

5. Disponible à l'adresse : <https://mutehost.loria.fr>

6. Proof of Concept (PoC) : Preuve de concept

Dans le chapitre 4, nous présentons MUTE, l'éditeur de texte collaboratif temps réel P2P chiffré de bout en bout que notre équipe de recherche développe dans le cadre de ses travaux de recherche. Nous présentons les différentes couches logicielles formant un pair et les services tiers avec lesquels les pairs interagissent, et détaillons nos travaux dans le cadre de ce projet, c.-à-d. l'intégration de notre mécanisme de résolution de conflits automatiques pour le type Séquence et le développement de la couche de livraison des messages associée. Pour chaque couche logicielle, nous identifions ses limites et présentons de potentielles pistes d'améliorations.

Finalement, nous récapitulons dans le chapitre 5 les contributions réalisées dans le cadre de cette thèse. Puis nous cloturons ce manuscrit en introduisant plusieurs des pistes de recherches que nous souhaiterons explorer dans le cadre de nos travaux futurs.

Chapitre 2

État de l’art

Sommaire

2.1	Modèle du système	12
2.2	Types de données répliquées sans conflits	13
2.2.1	Sémantiques en cas de conflits	17
2.2.2	Modèles de synchronisation	21
2.3	Séquences répliquées sans conflits	30
2.3.1	Approche à pierres tombales	34
2.3.2	Approche à identifiants densément ordonnés	42
2.3.3	Synthèse	50
2.4	LogootSplit	53
2.4.1	Identifiants	53
2.4.2	Aggrégation dynamique d’éléments en blocs	54
2.4.3	Modèle de données	56
2.4.4	Modèle de livraison	58
2.4.5	Limites de LogootSplit	61
2.5	Mitigation du surcoût des séquences répliquées sans conflits	63
2.5.1	Mécanisme de Garbage Collection des pierres tombales	63
2.5.2	Ré-équilibrage de l’arbre des identifiants de position	64
2.5.3	Ralentissement de la croissance des identifiants de position	64
2.5.4	Synthèse	65
2.6	Synthèse	66
2.7	Proposition	67

Dans ce chapitre, nous définissons le modèle du système que nous considérons (section 2.1). Puis nous présentons le fonctionnement de LogootSplit, le Conflict-free Replicated Data Type (CRDT) pour le type Séquence qui sert de base pour nos travaux (section 2.4). Ensuite, nous présentons les approches proposées pour réduire le surcoût des CRDTs pour le type Séquence et identifions leurs limites (sous-section 2.5.2 et sous-section 2.5.3). Finalement, nous introduisons l’approche que nous proposons (section 2.7) pour répondre à notre première problématique de recherche (cf. sous-section 1.2.1, page 6), que nous présentons en détails par la suite dans le chapitre 3.

Néanmoins, afin d'offrir une vision plus globale de notre domaine de recherche, nous complétons notre état de l'art de plusieurs points. Dans la section 2.2, nous rappelons la notion de CRDTs, c.-à-d. de types de données répliquées sans conflits. Ce rappel se compose d'une section présentant la notion de sémantique pour un mécanisme de résolution de conflits automatiques (sous-section 2.2.1) et d'une section présentant les différents modèles de synchronisation pour CRDTs définis dans la littérature, c.-à-d. la synchronisation par états, la synchronisation par opérations et la synchronisation par différences d'états (sous-section 2.2.2). À notre connaissance, nous présentons une des études les plus complètes comparant ces modèles de synchronisation en guise de synthèse de cette même section.

De manière similaire, nous rappelons les différents CRDTs pour le type Séquence définis dans la littérature dans la section 2.3. Ce rappel prend la forme d'un historique des CRDTs pour le type Séquence, catégorisés en fonction de l'approche sur laquelle se base leur mécanisme de résolution de conflits, c.-à-d. l'approche à pierres tombales ou l'approche à identifiants densément ordonnés. De nouveau, ce rappel aboutit à notre connaissance à l'une des études les plus précises comparant ces deux approches (sous-section 2.3.3).

2.1 Modèle du système

Le système que nous considérons est un système pair-à-pair (P2P) à large échelle. Il est composé d'un ensemble de noeuds dynamique. En d'autres termes, un noeud peut rejoindre ou quitter le système à tout moment. Certains noeuds peuvent participer au système que de manière éphémère, e.g. le temps d'une session.

Du point de vue d'un noeud du système, les autres noeuds sont soit connectés, c.-à-d. joignables par le biais des connexions P2P disponibles, soit déconnectés, c.-à-d. injoignable. Lorsqu'un noeud se déconnecte, nous considérons possible qu'il se déconnecte de manière définitive sans indication au préalable. Du point de vue des autres noeuds du système, il est donc impossible de déterminer le statut d'un noeud déconnecté. Ce dernier peut être déconnecté de manière temporaire ou définitive. Toutefois, nous assimilons les noeuds déconnectés de manière définitive à des noeuds ayant quittés le système, ceux-ci ne participant plus au système.

Dans ce système, nous considérons comme confondus les noeuds et clients. Un noeud correspond alors à un appareil d'un-e utilisateur-riche du système. Un-e même utilisateur-riche peut prendre part au système au travers de différents appareils, nous considérons alors chaque appareil comme un noeud distinct.

Le système consiste en une application permettant de répliquer une donnée. Chaque noeud du système possède en local une copie de la donnée. Les noeuds peuvent consulter et éditer leur copie locale à tout moment, sans se coordonner entre eux. Les modifications sont appliquées à la copie locale immédiatement et de manière atomique. Les modifications sont ensuite transmises aux autres noeuds de manière asynchrone par le biais de messages, afin qu'ils puissent à leur tour intégrer les modifications à leur copie. L'application garantit la cohérence à terme [14] des copies.

Définition 10 (Cohérence à terme). La cohérence à terme est une propriété de sûreté indiquant que l'ensemble des noeuds du système ayant intégré le même ensemble de modifications obtiendront des états équivalents⁷.

Les noeuds communiquent entre eux par l'intermédiaire d'un réseau non-fiable. Les messages envoyés peuvent être perdus, ré-ordonnés et/ou dupliqués. Le réseau est aussi sujet à des partitions, qui séparent les noeuds en des sous-groupes disjoints. Aussi, nous considérons que les noeuds peuvent initier de leur propre chef des partitions réseau : des groupes de noeuds peuvent décider de travailler de manière isolée pendant une certaine durée, avant de se reconnecter au réseau.

Pour compenser les limitations du réseau, les noeuds reposent sur une couche de livraison de messages. Cette couche permet de garantir un modèle de livraison donné des messages à l'application. En fonction des garanties du modèle de livraison sélectionné, cette couche peut ré-ordonner les messages reçus avant de les livrer à l'application, dé-dupliquer les messages, et détecter et ré-échanger les messages perdus. Nous considérons a minima que la couche de livraison garantit la livraison à terme des messages.

Définition 11 (Livraison à terme). La livraison à terme est un modèle de livraison garantissant que l'ensemble des messages du système seront livrés à l'ensemble des noeuds du système à terme.

Finalement, nous supposons que les noeuds du système sont honnêtes. Les noeuds ne peuvent dévier du protocole de la couche de livraison des messages ou de l'application. Les noeuds peuvent cependant rencontrer des défaillances. Nous considérons que les noeuds disposent d'une mémoire durable et fiable. Ainsi, nous considérons que les noeuds peuvent restaurer le dernier état valide, c.-à-d. pas en cours de modification, qu'il possédait juste avant la défaillance.

2.2 Types de données répliquées sans conflits

Afin d'offrir une haute disponibilité à leurs clients et afin d'accroître leur tolérance aux pannes [34], les systèmes distribués peuvent adopter le paradigme de la réplication optimiste [13]. Ce paradigme consiste à ce que chaque noeud composant le système possède une copie de la donnée répliquée. Chaque noeud possède le droit de la consulter et de la modifier, sans coordination préalable avec les autres noeuds. Les noeuds peuvent alors temporairement diverger, c.-à-d. posséder des états différents. Un mécanisme de synchronisation leur permet ensuite de partager leurs modifications respectives et d'obtenir de nouveau des états équivalent, c.-à-d. de converger [14].

Pour permettre aux noeuds de converger, les protocoles de réplication optimiste ordonnent généralement les événements se produisant dans le système distribué. Pour les

7. Nous considérons comme équivalents deux états pour lesquels chaque observateur du type de données renvoie un même résultat, c.-à-d. les deux états sont indifférenciables du point de vue des utilisatrices du système.

ordonner, la littérature repose généralement sur la relation de causalité entre les événements, qui est définie par la relation *happens-before* [35]. Nous l'adaptions ci-dessous à notre contexte, en ne considérant que les modifications⁸ effectuées et celles intégrées :

Définition 12 (Relation *happens-before*). La relation *happens-before* indique qu'une modification m_1 a eu lieu avant une modification m_2 , notée $m_1 \rightarrow m_2$, si et seulement si une des conditions suivantes est satisfaite :

- (i) m_1 a été effectuée avant m_2 sur le même noeud.
- (ii) m_1 a été intégrée par le noeud auteur⁹ de m_2 avant qu'il n'effectue m_2 .
- (iii) Il existe une modification m telle que $m_1 \rightarrow m \wedge m \rightarrow m_2$.

Dans le cadre d'un système distribué, nous notons que la relation *happens-before* ne permet pas d'établir un ordre total entre les modifications. En effet, deux modifications m_1 et m_2 peuvent être effectuées en parallèle par deux noeuds différents, sans avoir connaissance de la modification de leur pair respectif. De telles modifications sont alors dites *concurrentes* :

Définition 13 (Concurrence). Deux modifications m_1 et m_2 sont concurrentes, noté $m_1 \parallel m_2$, si et seulement si $m_1 \nrightarrow m_2 \wedge m_2 \nrightarrow m_1$.

Lorsque les modifications possibles sur un type de données sont commutatives, l'intégration des modifications effectuées par les autres noeuds, même concurrentes, ne nécessite aucun mécanisme particulier. Cependant, les modifications permises par un type de données ne sont généralement pas commutatives car de sémantiques contraires, e.g. l'ajout et la suppression d'un élément dans une Collection. Ainsi, une exécution distribuée peut mener à la génération de modifications concurrentes non commutatives. Nous parlons alors de conflits.

Avant d'illustrer notre propos avec un exemple, nous introduisons la spécification algébrique du type Ensemble dans la figure 2.1 sur laquelle nous nous basons.

Un Ensemble est une collection dynamique non-ordonnée d'éléments de type E . Cette spécification définit que ce type dispose d'un constructeur, *empty*, permettant de générer un ensemble vide.

La spécification définit deux modifications sur l'ensemble :

- (i) *add*(s, e), qui permet d'ajouter un élément donné e à un ensemble s . Cette modification renvoie un nouvel ensemble construit de la manière suivante :

$$add(s, e) = s \cup \{e\}$$

- (ii) *remove*(s, e), abrégée en *rmv* dans nos figures, qui permet de retirer un élément donné e d'un ensemble s . Cette modification renvoie un nouvel ensemble construit de la manière suivante :

$$remove(s, e) = s \setminus \{e\}$$

8. Nous utilisons le terme *modifications* pour désigner les *opérations de modifications* des types abstraits de données afin d'éviter une confusion avec le terme *opération* introduit ultérieurement.

9. Nous dénotons par le terme *auteur* le noeud à l'origine d'une modification.

payload		
$S \in \text{Set}\langle E \rangle$		
 constructor		
$empty$:	$\longrightarrow S$
 mutators		
add	:	$S \times E \longrightarrow S$
$remove$:	$S \times E \longrightarrow S$
 queries		
$length$:	$S \longrightarrow \mathbb{N}$
$read$:	$S \longrightarrow S$

FIGURE 2.1 – Spécification algébrique du type abstrait usuel Ensemble

Elle définit aussi deux observateurs :

- (i) $length(s)$, qui permet de récupérer le nombre d'éléments présents dans un ensemble s .
- (ii) $read(s)$, qui permet de consulter l'état d'ensemble s . Dans le cadre de nos exemples, nous considérons qu'une consultation de l'état est effectuée de manière implicite à l'aide de $read$ après chaque modification¹⁰.

Dans le cadre de ce manuscrit, nous travaillons sur des ensembles de caractères. Cette restriction du domaine se fait sans perte en généralité. En se basant sur cette spécification, nous présentons dans la figure 2.2 un scénario où des noeuds effectuent en concurrence des modifications provoquant un conflit.

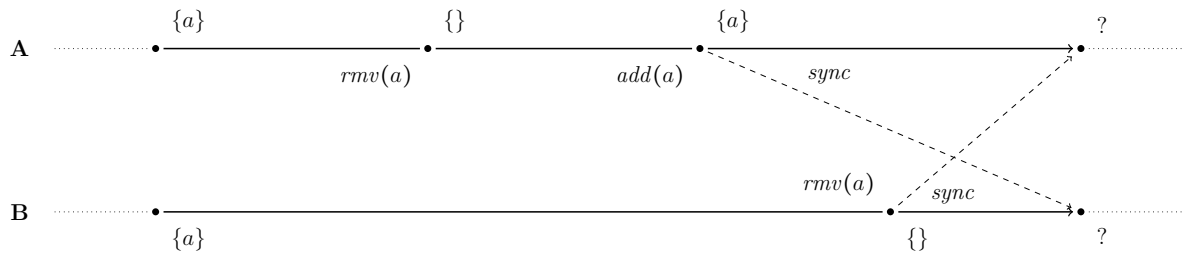


FIGURE 2.2 – Modifications concurrentes d'un Ensemble répliqué provoquant un conflit suite à l'ajout et la suppression d'un même élément

Dans cet exemple, deux noeuds A et B répliquent et partagent une même structure de données de type Ensemble. Les deux noeuds possèdent le même état initial : $\{a\}$. Le noeud A retire l'élément a de l'ensemble, en procédant à la modification $remove(a)$. Puis, le noeud A ré-ajoute l'élément a dans l'ensemble via la modification $add(a)$. En

¹⁰. Cette hypothèse nous permettra de préciser le modèle de cohérence assuré par le système [36] en fonction des valeurs observées.

concurrency, le noeud B retire lui aussi l'élément a de l'ensemble. Les deux noeuds se synchronisent ensuite.

À l'issue de ce scénario, l'état à produire n'est pas trivial : le noeud A a exprimé son intention d'ajouter l'élément a à l'ensemble, tandis que le noeud B a exprimé son intention contraire de retirer l'élément a de ce même ensemble. Ainsi, les états $\{a\}$ et $\{\}$ semblent tous les deux corrects et légitimes dans cette situation. Il est néanmoins primordial que les noeuds choisissent et convergent vers un même état pour leur permettre de poursuivre leur collaboration. Pour ce faire, il est nécessaire de mettre en place un mécanisme de résolution de conflits, potentiellement automatique.

Les Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs) [19, 37, 38] répondent à ce besoin.

Définition 14 (Conflict-free Replicated Data Type). Les CRDTs sont de nouvelles spécifications des types de données existants, e.g. l'Ensemble ou la Séquence. Ces nouvelles spécifications sont conçues pour être utilisées dans des systèmes distribués adoptant la réplication optimiste. Ainsi, elles offrent les deux propriétés suivantes :

- (i) Les CRDTs peuvent être modifiés sans coordination avec les autres noeuds.
- (ii) Les CRDTs garantissent la *cohérence forte à terme* [19].

Définition 15 (Cohérence forte à terme). La cohérence forte à terme est une propriété de sûreté indiquant que l'ensemble des noeuds d'un système ayant intégrés le même ensemble de modifications obtiendront des états équivalents, sans échange de message supplémentaire.

Pour offrir la propriété de *cohérence forte à terme*, la spécification des CRDTs reposent sur la théorie des treillis [39] :

Définition 16 (Spécification des CRDTs). Les CRDTs sont spécifiés de la manière suivante :

- (i) Les différents états possibles d'un CRDT forment un sup-demi-treillis, possédant une relation d'ordre partiel \leq .
- (ii) Les modifications génèrent par inflation un nouvel état supérieur ou égal à l'état original d'après \leq .
- (iii) Il existe une fonction de fusion qui, pour toute paire d'états, génère l'état minimal supérieur d'après \leq aux deux états fusionnés. Nous parlons alors de borne supérieure ou de Least Upper Bound (LUB) pour catégoriser l'état résultant de cette fusion.

Malgré leur spécification différente, les CRDTs partagent la même sémantique, c.-à-d. le même comportement, et la même interface que les types séquentiels¹¹ correspondants du point de vue des utilisateur-rices. Ainsi, les CRDTs partagent le comportement des types séquentiels dans le cadre d'exécutions séquentielles. Cependant, ils définissent aussi une sémantique additionnelle pour chaque type de conflit ne pouvant se produire que dans le cadre d'une exécution distribuée.

11. Nous dénotons comme *types séquentiels* les spécifications usuelles des types de données supposant une exécution séquentielle de leurs modifications.

Plusieurs sémantiques valides peuvent être proposées pour résoudre un type de conflit. Un CRDT se doit donc de préciser quelle sémantique il choisit.

L'autre aspect définissant un CRDT donné est le modèle qu'il adopte pour propager les modifications. Au fil des années, la littérature a établi et défini plusieurs modèles dit de synchronisation, chacun ayant ses propres besoins et avantages. De fait, plusieurs CRDTs peuvent être proposés pour un même type donné en fonction du modèle de synchronisation choisi.

Ainsi, ce qui définit un CRDT est sa ou ses sémantiques en cas de conflits et son modèle de synchronisation. Dans les prochaines sections, nous présentons les différentes sémantiques possibles pour un type donné, l'Ensemble, en guise d'exemple. Nous présentons ensuite les différents modèles de synchronisation proposés dans la littérature, et détaillons leurs contraintes et impact sur les CRDT les adoptant, toujours en utilisant le même exemple.

2.2.1 Sémantiques en cas de conflits

Plusieurs sémantiques peuvent être proposées pour résoudre les conflits. Certaines de ces sémantiques ont comme avantage d'être générique, c.-à-d. applicable à l'ensemble des types de données. En contrepartie, elles souffrent de cette même généralité, en ne permettant que des comportements simples en cas de conflits.

À l'inverse, la majorité des sémantiques proposées dans la littérature sont spécifiques à un type de données. Elles visent ainsi à prendre plus finement en compte l'intention des modifications pour proposer des comportements plus précis.

Dans la suite de cette section, nous présentons ces sémantiques génériques ainsi que celles spécifiques à l'Ensemble et, à titre d'exemple, les illustrons à l'aide du scénario présenté dans la figure 2.2.

Sémantique *Last-Writer-Wins*

Une manière simple pour résoudre un conflit consiste à trancher de manière arbitraire et de sélectionner une modification parmi l'ensemble des modifications en conflit. Pour faire cela de manière déterministe, une approche est de reproduire et d'utiliser l'ordre total sur les modifications qui serait instauré par une horloge globale pour choisir la modification à prioriser.

Cette approche, présentée dans [40], correspond à la sémantique nommée *Last-Writer-Wins* (LWW). De par son fonctionnement, cette sémantique est générique et est donc utilisée par une variété de CRDTs pour des types différents. La figure 2.3 illustre son application à l'Ensemble pour résoudre le conflit de la figure 2.2.

Comme indiqué précédemment, le scénario illustré dans la figure 2.3 présente un conflit entre les modifications concurrentes $add(a)$ et $remove(a)$ générées de manière concurrente respectivement par les noeuds A et B. Pour le résoudre, la sémantique LWW associe à chaque modification une estampille. L'ordre créé entre les modifications par ces dernières permet de déterminer quelle modification désigner comme prioritaire. Ici, nous considérons que $add(a)$ a eu lieu plus tôt que $remove(a)$. La sémantique LWW désigne donc $remove(a)$

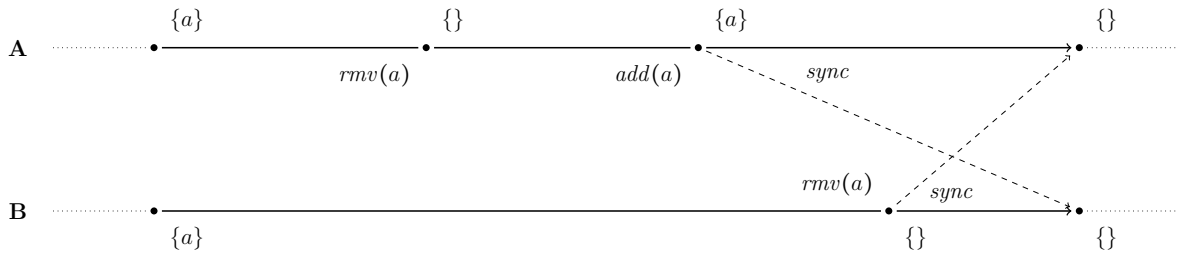


FIGURE 2.3 – Résolution du conflit en utilisant la sémantique LWW

comme prioritaire et ignore $add(a)$. L'état obtenu à l'issue de cet exemple par chaque noeud est donc $\{\}$.

Il est à noter que si la modification $remove(a)$ du noeud B avait eu lieu plus tôt que la modification $add(a)$ du noeud A dans notre exemple, l'état final obtenu aurait été $\{a\}$. Ainsi, des exécutions reproduisant le même ensemble de modifications produiront des résultats différents en fonction de l'ordre créé par les estampilles associées à chaque modification. Ces estampilles étant des métadonnées du mécanisme de résolution de conflits, elles sont dissimulées aux utilisateur-rices. Le comportement de cette sémantique peut donc être perçu comme aléatoire et s'avérer perturbant pour les utilisateur-rices.

La sémantique LWW repose sur l'horloge de chaque noeud pour attribuer une estampille à chacune de leurs modifications. Les horloges physiques étant sujettes à des imprécisions et notamment des décalages, utiliser les estampilles qu'elles fournissent peut provoquer des anomalies vis-à-vis de la relation *happens-before*. Les systèmes distribués préfèrent donc généralement utiliser des horloges logiques [35].

Sémantique *Multi-Value*

Une seconde sémantique générique¹² est la sémantique *Multi-Value* (MV). Cette approche propose de gérer les conflits de la manière suivante : plutôt que de prioriser une modification par rapport aux autres modifications concurrentes, la sémantique MV maintient l'ensemble des états résultant possibles. Nous présentons son application à l'Ensemble dans la figure 2.4.

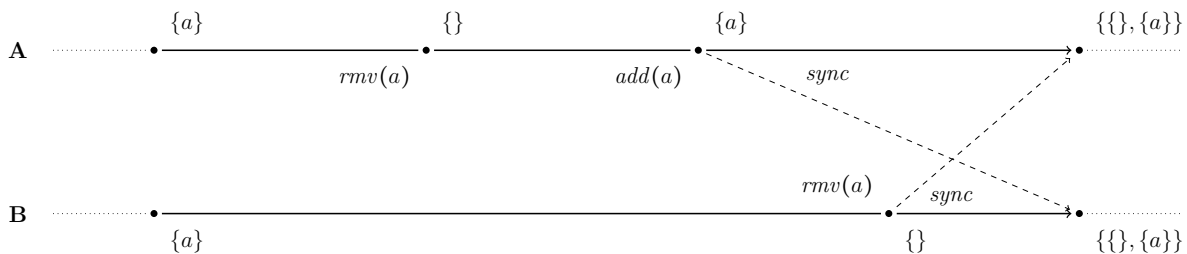


FIGURE 2.4 – Résolution du conflit en utilisant la sémantique MV

La figure 2.4 présente la gestion du conflit entre les modifications concurrentes $add(a)$ et $remove(a)$ par la sémantique MV. Devant ces modifications contraires, chaque noeud

¹². Bien qu'unique associée au type *Registre* dans le domaine des CRDTs généralement.

calculé chaque état possible, c.-à-d. un état sans l'élément a , $\{\}$, et un état avec ce dernier, $\{a\}$. Le CRDT maintient alors l'ensemble de ces états en parallèle. L'état obtenu est donc $\{\{\}, \{a\}\}$.

Ainsi, la sémantique MV expose les conflits aux utilisateur-rices lors de leur prochaine consultation de l'état du CRDT. Les utilisateur-rices peuvent alors prendre connaissance des intentions de chacun-e et résoudre le conflit manuellement. Dans la figure 2.4, résoudre le conflit revient à re-effectuer une modification $add(a)$ ou $remove(a)$ selon l'état choisi. Ainsi, si plusieurs personnes résolvent en concurrence le conflit de manière contraire, la sémantique MV exposera de nouveau les différents états proposés sous la forme d'un conflit.

Il est intéressant de noter que cette sémantique mène à un changement du domaine du CRDT considéré : en cas de conflit, la valeur retournée par le CRDT correspond à un Ensemble de valeurs du type initialement considéré. Par exemple, si nous considérons que le type correspondant au CRDT dans la figure 2.4 est le type $Set\langle V \rangle$, nous observons que la valeur finale obtenue a pour type $Set\langle Set\langle V \rangle \rangle$. Il s'agit à notre connaissance de la seule sémantique opérant ce changement.

Sémantiques *Add-Wins* et *Remove-Wins*

Comme évoqué précédemment, d'autres sémantiques sont spécifiques au type de données concerné. Ainsi, nous abordons à présent des sémantiques spécifiques au type de l'Ensemble.

Dans le cadre de l'Ensemble, un conflit est provoqué lorsque des modifications add et $remove$ d'un même élément sont effectuées en concurrence. Ainsi, deux approches peuvent être proposées pour résoudre le conflit :

- (i) Une sémantique où la modification add d'un élément prend la précedence sur les modifications concurrentes $remove$ du même élément, nommée *Add-Wins* (AW). L'élément est alors présent dans l'état obtenu à l'issue de la résolution du conflit.
- (ii) Une sémantique où la modification $remove$ d'un élément prend la précedence sur les opérations concurrentes add du même élément, nommée *Remove-Wins* (RW). L'élément est alors absent de l'état obtenu à l'issue de la résolution du conflit.

La figure 2.5 illustre l'application de chacune de ces sémantiques sur notre exemple.

Sémantique *Causal-Length*

Une nouvelle sémantique pour l'Ensemble fut proposée [41] récemment. Cette sémantique se base sur les observations suivantes :

- (i) add et $remove$ d'un élément prennent place à tour de rôle, chaque modification invalidant la précédente.
- (ii) add (resp. $remove$) concurrents d'un même élément représentent la même intention. Prendre en compte une de ces modifications concurrentes revient à prendre en compte leur ensemble.

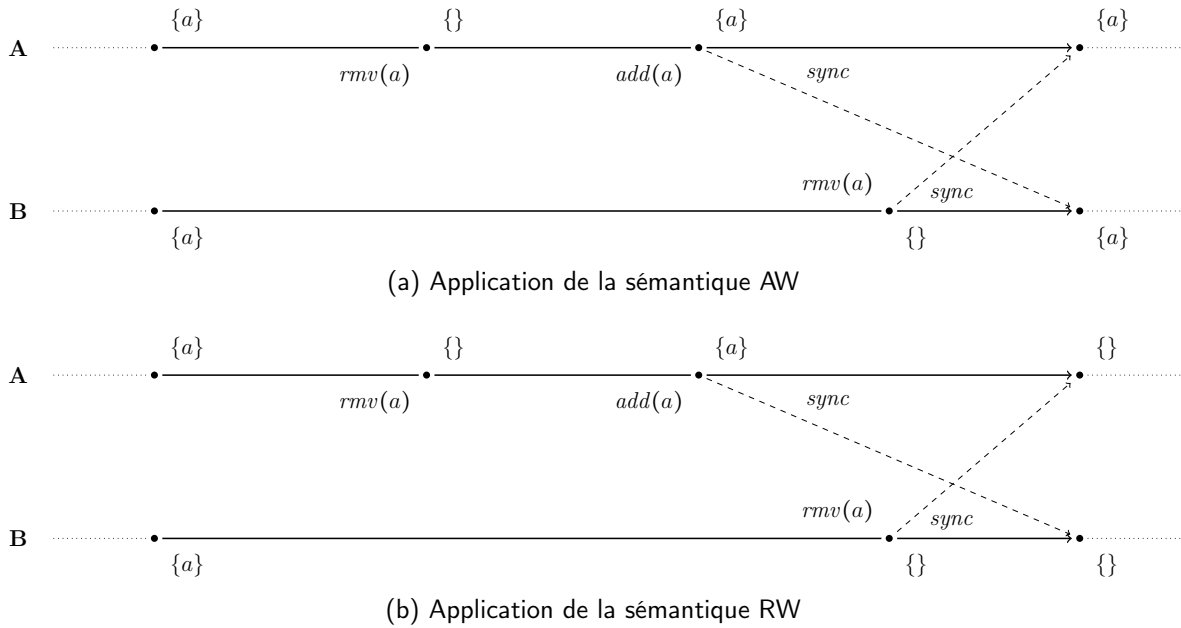


FIGURE 2.5 – Résolution du conflit en utilisant soit la sémantique AW, soit la sémantique RW

À partir de ces observations, YU et al. [41] proposent de déterminer pour chaque élément la chaîne d'ajouts et retraits la plus longue. C'est cette chaîne, et précisément son dernier maillon, qui indique si l'élément est présent ou non dans l'ensemble final. La figure 2.6 illustre son fonctionnement.

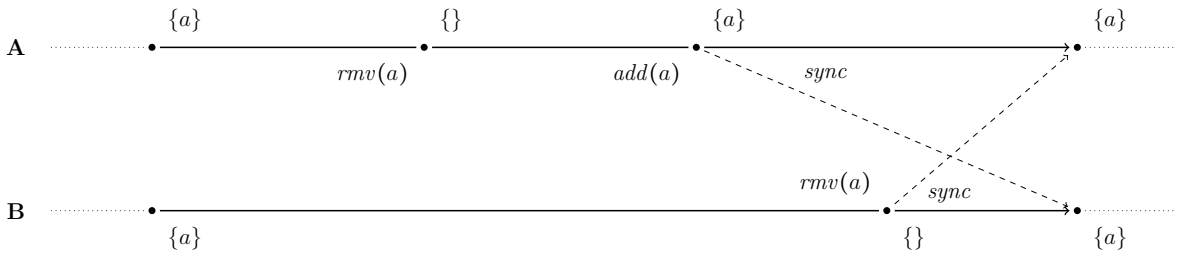


FIGURE 2.6 – Résolution du conflit en utilisant la sémantique CL

Dans notre exemple, la modification $rmv(a)$ effectuée par B est en concurrence avec une modification identique effectuée par A. La sémantique CL définit que ces deux modifications partagent la même intention. Ainsi, A ayant déjà appliqué sa propre modification préalablement, il ne prend pas en compte *de nouveau* cette modification lorsqu'il la reçoit de B. Son état reste donc inchangé.

À l'inverse, la modification $add(a)$ effectuée par A fait suite à sa modification $remove(a)$. La sémantique CL définit alors qu'elle fait suite à toute autre modification $remove(a)$ concurrente. Ainsi, B intègre cette modification lorsqu'il la reçoit de A. Son état évolue donc pour devenir $\{a\}$.

Synthèse

Dans cette section, nous avons mis en lumière l'existence de solutions différentes pour résoudre un même conflit. Chacune de ces solutions correspond à une sémantique spécifique de résolution de conflits. Ainsi, pour un même type de données, différents CRDTs peuvent être spécifiés. Chacun de ces CRDTs est spécifié par la combinaison de sémantiques qu'il adopte, chaque sémantique servant à résoudre un des types de conflits du type de données.

Il est à noter qu'aucune sémantique n'est intrinsèquement meilleure et préférable aux autres. Il revient aux concepteur-rices d'applications de choisir les CRDTs adaptés en fonction des besoins et des comportements attendus en cas de conflits.

Par exemple, pour une application collaborative de listes de courses, l'utilisation d'un MV-Registre pour représenter le contenu de la liste se justifie : cette sémantique permet d'exposer les modifications concurrentes aux utilisateur-rices. Ainsi, les personnes peuvent détecter et résoudre les conflits provoqués par ces éditions concurrentes, e.g. l'ajout de l'élément *lait* à la liste, pour cuisiner des crêpes, tandis que les *oeufs* nécessaires à ces mêmes crêpes sont retirés. En parallèle, cette même application peut utiliser un LWW-Registre pour représenter et indiquer aux utilisateur-rices la date de la dernière modification effectuée.

2.2.2 Modèles de synchronisation

Dans le modèle de réplication optimiste, les noeuds divergent momentanément lorsqu'ils effectuent des modifications locales. Pour ensuite converger vers des états équivalents, les noeuds doivent propager et intégrer l'ensemble des modifications. La figure 2.7 illustre ce point.

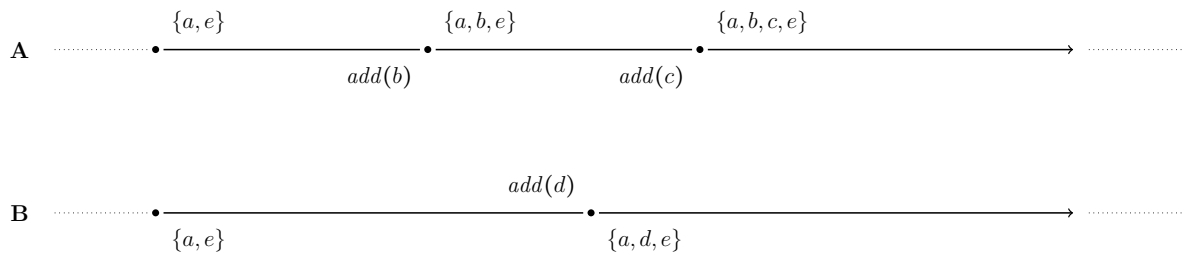


FIGURE 2.7 – Modifications en concurrence d'un Ensemble répliqué par les noeuds A et B

Dans cet exemple, deux noeuds A et B partagent et éditent un même Ensemble à l'aide d'un CRDT. Les deux noeuds possèdent le même état initial : $\{a, e\}$.

Le noeud A effectue les modifications $add(b)$ puis $add(c)$. Il obtient ainsi l'état $\{a, b, c, e\}$. De son côté, le noeud B effectue la modification suivante : $add(d)$. Son état devient donc $\{a, d, e\}$. Ainsi, les noeuds doivent encore s'échanger leur modifications pour converger vers l'état souhaité¹³, c.-à-d. $\{a, b, c, d, e\}$.

13. Le scénario ne comportant uniquement des modifications add , aucun conflit n'est produit malgré la concurrence des modifications.

Dans le cadre des CRDTs, le choix de la méthode pour synchroniser les noeuds n'est pas anodin. En effet, ce choix impacte la spécification même du CRDT et ses prérequis.

Initialement, deux approches ont été proposées : une méthode de synchronisation par états [19, 42] et une méthode de synchronisation par opérations [19, 42, 43, 44]. Une troisième approche, nommée synchronisation par différence d'états [45, 46], fut spécifiée par la suite. Le but de cette dernière est d'allier le meilleur des deux approches précédentes.

Dans la suite de cette section, nous présentons ces approches ainsi que leurs caractéristiques respectives. Pour les illustrer, nous complétons l'exemple décrit ici. Cependant, nous nous focalisons dans nos représentations uniquement sur les messages envoyés par les noeuds. Les métadonnées introduites par chaque modèle de synchronisation sont uniquement évoquées à l'écrit, par souci de clarté et de simplicité de nos exemples.

Synchronisation par états

L'approche de la synchronisation par états propose que les noeuds diffusent leurs modifications en transmettant leur état. Les CRDTs adoptant cette approche doivent définir une fonction `merge`. Cette fonction correspond à la fonction de fusion mentionnée précédemment (cf. Définition 16, page 16) : elle prend en paramètres une paire d'états et génère en retour leur LUB, c.-à-d. l'état correspondant à la borne supérieure des deux états en paramètres. Cette fonction doit être associative, commutative et idempotente [19].

Ainsi, lorsqu'un noeud reçoit l'état d'un autre noeud, il fusionne ce dernier avec son état courant à l'aide de la fonction `merge`. Il obtient alors un nouvel état intégrant l'ensemble des modifications ayant été effectuées sur les deux états.

La nature croissante des états des CRDTs couplée aux propriétés d'associativité, de commutativité et d'idempotence de la fonction `merge` permettent de reposer sur la couche de livraison sans lui imposer de contraintes fortes : les messages peuvent être perdus, réordonnés ou même dupliqués. Les noeuds convergeront tant que la couche de livraison garantit que les noeuds seront capables de transmettre leur état aux autres à terme. Il s'agit là de la principale force des CRDTs synchronisés par états.

Néanmoins, la définition de la fonction `merge` offrant ces propriétés peut s'avérer complexe et a des répercussions sur la spécification même du CRDT. Notamment, les états doivent conserver une trace de l'existence des éléments et de leur suppression afin d'éviter qu'une fusion d'états ne les fassent ressurgir. Ainsi, les CRDTs synchronisés par états utilisent régulièrement des pierres tombales.

Définition 17 (Pierre tombale). Une pierre tombale est un marqueur de la présence passée d'un élément.

Dans le contexte des CRDTs, un identifiant est généralement associé à chaque élément. Dans ce contexte, l'utilisation de pierres tombales correspond au comportement suivant : la suppression d'un élément peut supprimer de manière effective ce dernier, mais doit cependant conserver son identifiant dans la structure de données.

En plus de l'utilisation de pierres tombales, la taille de l'état peut croître de manière non-bornée dans le cas de certains types de données, e.g. l'Ensemble ou la Séquence. Ainsi, ces structures peuvent atteindre à terme des tailles conséquentes. Dans de tels cas, diffuser

l'état complet à chaque modification induirait alors un coût rédhibitoire. L'approche de la synchronisation par états s'avère donc inadaptée aux systèmes nécessitant une diffusion et intégration instantanée des modifications, c.-à-d. les systèmes temps réel. Ainsi, les systèmes utilisant des CRDTs synchronisés par états reposent généralement sur une synchronisation périodique des noeuds, c.-à-d. chaque noeud diffuse périodiquement son état.

Nous illustrons le fonctionnement de cette approche avec la figure 2.8. Dans cet exemple, après que les noeuds aient effectués leurs modifications respectives, le mécanisme de synchronisation périodique de chaque noeud se déclenche. Le noeud A (resp. B) diffuse alors son état $\{a, b, c, e\}$ (resp. $\{a, d, e\}$) à B (resp. A).

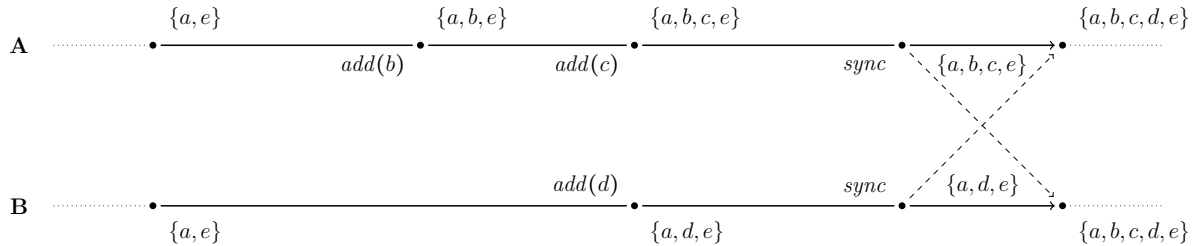


FIGURE 2.8 – Synchronisation des noeuds A et B en adoptant le modèle de synchronisation par états

À la réception de l'état, chaque noeud utilise la fonction `merge` pour intégrer les modifications de l'état reçu dans son propre état. Dans le cadre de l'Ensemble répliqué, cette fonction consiste généralement à faire l'union des états, en prenant en compte l'estampille et le statut (présent ou non) associé à chaque élément. Ainsi la fusion de leur état respectif, $\{a, b, c, e\} \cup \{a, d, e\}$, permet aux noeuds de converger à l'état souhaité : $\{a, b, c, d, e\}$.

Avant de conclure, il est intéressant de noter que les CRDTs adoptant ce modèle de synchronisation respectent de manière intrinsèque le modèle de cohérence causale [47, 48].

Définition 18 (Modèle de cohérence causale). Le modèle de cohérence causale définit que, pour toute paire de modifications m_1 et m_2 d'une exécution, si $m_1 \rightarrow m_2$, alors l'ensemble des noeuds doit intégrer la modification m_1 avant d'intégrer la modification m_2 .

En effet, ce modèle de synchronisation assure l'intégration soit de toutes les modifications connues d'un noeud, soit d'aucune. Par exemple, dans la figure 2.8, le noeud B ne peut pas recevoir et intégrer l'élément c sans l'élément b . Ainsi, ce modèle permet naturellement d'éviter ce qui pourrait être interprétées comme des anomalies par les utilisateur-rices.

Synchronisation par opérations

L'approche de la synchronisation par opérations propose quant à elle que les noeuds diffusent leurs modifications sous la forme d'opérations. Pour chaque modification possible, les CRDTs synchronisés par opérations doivent définir deux fonctions : `prepare` et `effect` [44].

La fonction `prepare` a pour but de générer une opération correspondant à la modification effectuée, et commutative avec les potentielles opérations concurrentes. Cette fonction prend en paramètres la modification ainsi que ses paramètres, et l'état courant du noeud. Cette fonction n'a pas d'effet de bord, c.-à-d. ne modifie pas l'état courant, et génère en retour l'opération à diffuser à l'ensemble des noeuds.

Une opération est un message. Son rôle est d'encoder la modification sous la forme d'un ou plusieurs éléments irréductibles du sup-demi-treillis.

Définition 19 (Élément irréductible). Un élément irréductible d'un sup-demi-treillis est un élément atomique de ce dernier. Il ne peut être obtenu par la fusion d'autres états.

Il est à noter que pour certains CRDTs, leurs modifications s'avèrent indépendantes de l'état courant (e.g. l'Ensemble LWW). Pour ces CRDTs synchronisés par opérations, les modifications estampillées avec leur information de causalité correspondent à des éléments irréductibles, c.-à-d. à des opérations. La fonction `prepare` peut donc être omise pour cette sous-catégorie de CRDTs synchronisés par opérations. Ces CRDTs sont nommés CRDTs purs synchronisés par opérations [44].

La fonction `effect` permet quant à elle d'intégrer les effets d'une opération générée ou reçue. Elle prend en paramètre l'état courant et l'opération, et retourne un nouvel état. Ce nouvel état correspond à la LUB entre l'état courant et le ou les éléments irréductibles encodés par l'opération.

La diffusion des modifications par le biais d'opérations présentent plusieurs avantages. Tout d'abord, la taille des opérations est généralement fixe et inférieure à la taille de l'état complet du CRDT, puisque les opérations servent à encoder un de ses éléments irréductibles. Ensuite, l'expressivité des opérations permet de proposer plus simplement des algorithmes efficaces pour leur intégration par rapport aux modifications équivalentes dans les CRDTs synchronisés par états. Par exemple, la suppression d'un élément dans un Ensemble se traduit en une opération de manière presque littérale, tandis que pour les CRDTs synchronisés par états, c'est l'absence de l'élément dans l'état qui va rendre compte de la suppression effectuée. Ces avantages rendent possible la diffusion et l'intégration une à une des modifications et rendent ainsi plus adaptés les CRDTs synchronisés par opérations pour construire des systèmes temps réels.

Il est à noter que la seule contrainte imposée aux CRDTs synchronisés par opérations est que leurs opérations concurrentes soient commutatives [19]. Ainsi, il n'existe aucune contrainte sur la commutativité des opérations liées causalement. De la même manière, aucune contrainte n'est définie sur l'idempotence des opérations. Ces libertés impliquent qu'il peut être nécessaire que les opérations soient livrées au CRDT en respectant un ordre donné et en garantissant leur livraison en exactement une fois pour garantir la convergence [38]. Ainsi, un intergiciel chargé de la diffusion et de la livraison des opérations est usuellement associé aux CRDTs synchronisés par opérations pour respecter ces contraintes. Il s'agit de la couche de livraison de messages que nous avons introduit dans le cadre de notre modèle du système (cf. section 2.1, page 12).

Généralement, les CRDTs synchronisés par opérations sont présentés dans la littérature comme nécessitant une livraison causale des opérations.

Définition 20 (Modèle de livraison causale). Le modèle de livraison causale définit que, pour toute paire de messages m_1 et m_2 d'une exécution, si $m_1 \rightarrow m_2$, alors la couche de livraison de l'ensemble des noeuds doit livrer le message m_1 à l'application avant de livrer le message m_2 .

Ce modèle de livraison permet de respecter le modèle de cohérence causale.

Ce modèle de livraison introduit néanmoins plusieurs effets négatifs. Tout d'abord, ce modèle peut provoquer un délai dans l'intégration des modifications. En effet, la perte d'une opération par le réseau provoque la mise en attente de la livraison des opérations suivantes. Les opérations mises en attente ne pourront en effet être livrées qu'une fois l'opération perdue re-diffusée et livrée.

De plus, il nécessite que des informations de causalité précises soient attachées à chaque opération. Pour cela, les systèmes reposent généralement sur l'utilisation de vecteurs de versions [49, 50]. Or, la taille de cette structure de données croît de manière linéaire avec le nombre de noeuds du système. Les métadonnées de causalité peuvent ainsi représenter la majorité des données diffusées sur le réseau¹⁴ [52]. Cependant, nous observons que la livraison dans l'ordre causal de toutes les opérations n'est pas toujours nécessaire pour la convergence. Par exemple, l'ordre d'intégration de deux opérations d'ajout d'éléments différents dans un Ensemble n'a aucun impact sur le résultat obtenu. Nous pouvons alors nous affranchir du modèle de livraison causale pour accélérer la vitesse d'intégration des modifications et pour réduire les métadonnées envoyées.

Pour compenser la perte d'opérations par le réseau et ainsi garantir la livraison à terme des opérations, la couche de livraison des opérations doit mettre en place un mécanisme d'anti-entropie, c.-à-d. un mécanisme permettant de détecter et ré-échanger les messages perdus. Plusieurs mécanismes de ce type ont été proposés dans la littérature [53, 54, 55, 56] et proposent des compromis variés entre complexité en temps, complexité spatiale et consommation réseau.

Nous illustrons le modèle de synchronisation par opérations à l'aide de la figure 2.9. Dans ce nouvel exemple, les noeuds diffusent les modifications qu'ils effectuent sous la forme d'opérations. Nous considérons que le CRDT utilisé est un CRDT pur synchronisé par opérations, c.-à-d. que les modifications et opérations sont confondues, et qu'il autorise une livraison dans le désordre des opérations *add*.

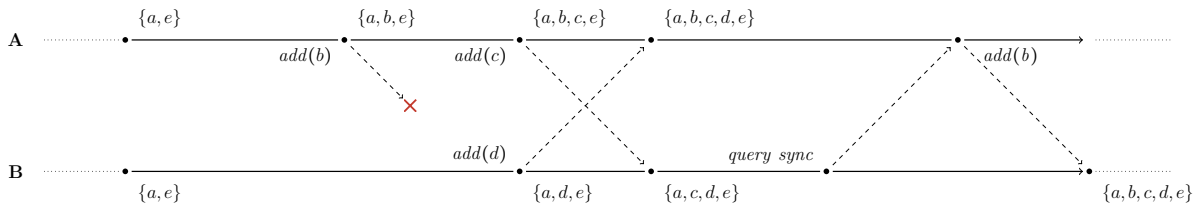


FIGURE 2.9 – Synchronisation des noeuds A et B en adoptant le modèle de synchronisation par opérations

14. La relation de causalité étant transitive, les opérations et leurs relations de causalité forment un DAG. [51] propose d'ajouter en dépendances causales d'une opération seulement les opérations correspondant aux extrémités du DAG au moment de sa génération. Ce mécanisme plus complexe permet de réduire la consommation réseau, mais induit un surcoût en calculs et en mémoire utilisée.

Le noeud A diffuse donc les opérations $add(b)$ et $add(c)$. Il reçoit ensuite l'opération $add(d)$ de B, qu'il intègre à sa copie. Il obtient alors l'état $\{a, b, c, d, e\}$.

De son côté, le noeud B ne reçoit initialement pas l'opération $add(b)$ suite à une perte de message. Il génère et diffuse $add(d)$ puis reçoit l'opération $add(c)$. Comme indiqué précédemment, nous considérons que la livraison causale des opérations add n'est pas obligatoire dans cet exemple, cette opération est alors intégrée sans attendre. Le noeud B obtient alors l'état $\{a, c, d, e\}$.

Ensuite, le mécanisme d'anti-entropie du noeud B se déclenche. Le noeud B envoie alors à A une demande de synchronisation contenant un résumé de son état, e.g. son vecteur de versions. À partir de cette donnée, le noeud A détermine que B n'a pas reçu l'opération $add(a)$. Il génère alors une réponse contenant cette opération et lui envoie. À la réception de l'opération, le noeud B l'intègre. Il obtient l'état $\{a, b, c, d, e\}$ et converge ainsi avec A.

Avant de conclure, nous noterons qu'il est nécessaire pour les noeuds de maintenir leur journal des opérations. En effet, les noeuds l'utilisent pour renvoyer les opérations manquées lors de l'exécution du mécanisme d'anti-entropie évoqué ci-dessus. Ceci se traduit par une augmentation perpétuelle des métadonnées des CRDTs synchronisés par opérations. Pour y pallier, des travaux [44, 57] proposent de tronquer le journal des opérations pour en supprimer les opérations connues de tous. Les noeuds reposent alors sur la notion de stabilité causale [58] pour déterminer les opérations supprimables de manière sûre.

Définition 21 (Stabilité causale). Une opération est stable causalement lorsqu'elle a été intégrée par l'ensemble des noeuds du système. Ainsi, toute opération future dépend causalement des opérations causalement stables, c.-à-d. les noeuds ne peuvent plus générer d'opérations concurrentes aux opérations causalement stables.

Un mécanisme d'instantané [59] doit néanmoins être associé au mécanisme de troncature du journal pour générer un état équivalent à la partie tronquée. Ce mécanisme est en effet nécessaire pour permettre un nouveau noeud de rejoindre le système et d'obtenir l'état courant à partir de l'instantané et du journal tronqué.

Pour résumer, cette approche permet de mettre en place un système en composant un CRDT synchronisé par opérations avec une couche de livraison des messages. Mais comme illustré ci-dessus, chaque CRDT synchronisé par opérations établit les propriétés de ses différentes opérations et délègue potentiellement des responsabilités à la couche de livraison. Une partie de la complexité de cette approche réside ainsi dans l'ajustement du couple $\langle CRDT, couche\ livraison \rangle$ pour régler finement et optimiser leur fonctionnement en tandem. Des travaux [44, 57] ont proposé un patron de conception pour modéliser ces deux composants et leurs interactions.

Cependant, ce patron repose sur l'hypothèse d'une livraison causale des opérations. Nous avons toutefois montré que la livraison causale des opérations peut ne pas être nécessaire pour la convergence (e.g. opérations d'ajout d'éléments dans un Ensemble). Ce patron implique donc l'ajout de métadonnées de causalité aux opérations, c.-à-d. des vecteurs de version, de manière parfois superflue. Ce patron n'est donc pas optimal.

Synchronisation par différences d'états

ALMEIDA et al. [45] introduisent un nouveau modèle de synchronisation pour CRDTs. La proposition de ce modèle est nourrie par les observations suivantes :

- (i) Les CRDTs synchronisés par opérations sont sujets aux défaillances du réseau et nécessitent généralement pour pallier ce problème une couche de livraison des messages garantissant la livraison en exactement un exemplaire des opérations et réordonnant les opérations pour satisfaire le modèle de livraison causal.
- (ii) Les CRDTs synchronisés par états pâtissent du surcoût induit par la diffusion de leurs états complets, généralement croissant de manière monotone.

Pour pallier les faiblesses de chaque approche et allier le meilleur des deux mondes, les auteurs proposent les CRDTs synchronisés par différences d'états [45, 46, 52]. Il s'agit en fait d'une sous-famille des CRDTs synchronisés par états. Ainsi, comme ces derniers, ils disposent d'une fonction `merge` associative, commutative et idempotente qui permet de produire la LUB de deux états, c.-à-d. l'état correspond à la borne supérieure de ces deux états.

La spécificité des CRDTs synchronisés par différences d'états est qu'une modification locale produit en retour un delta. Un delta encode la modification effectuée sous la forme d'un état du lattice. Par exemple, dans le cas de l'Ensemble, la différence d'état provoquée par l'ajout d'un élément (e.g. `add(a)`) est représentée par l'ensemble contenant uniquement cet élément (e.g. `{a}`).

Les deltas étant des états, ils peuvent être diffusés puis intégrés par les autres noeuds à l'aide de la fonction `merge`. Ceci permet de bénéficier des propriétés d'associativité, de commutativité et d'idempotence offertes par cette fonction. Les CRDTs synchronisés par différences d'états offrent ainsi :

- (i) Une diffusion des modifications avec un surcoût pour le réseau proche de celui des CRDTs synchronisés par opérations.
- (ii) Une résistance aux défaillances réseaux similaire celle des CRDTs synchronisés par états.

Cette définition des CRDTs synchronisés par différences d'états, introduite dans [45, 46], fut ensuite précisée dans [52]. Dans cet article, les auteurs précisent qu'utiliser des éléments irréductibles (cf. Définition 19, page 24) comme deltas est optimal du point de vue de la taille des deltas produits.

Concernant la diffusion des modifications, les CRDTs synchronisés par différences d'états autorisent un large éventail de possibilités. Par exemple, les deltas peuvent être diffusés et intégrés de manière indépendante. Une autre approche possible consiste à tirer avantage du fait que les deltas sont des états : il est possible d'agréger plusieurs deltas à l'aide de la fonction `merge`, éliminant leurs éventuelles redondances. Ainsi, la fusion de deltas permet ensuite de diffuser un ensemble de modifications par le biais d'un seul et unique delta, minimal. Et en dernier recours, les CRDTs synchronisés par différences d'états peuvent adopter le même schéma de diffusion que les CRDTs synchronisés par états, c.-à-d. diffuser leur état complet de manière périodique. Chacune de ces approches propose un compromis entre délai d'intégration des modifications, surcoût en métadonnées, calculs et bande-passante [52]. Ainsi, il est possible pour un système utilisant des

CRDTs synchronisés par différences d'états de sélectionner la technique de diffusion des modifications la plus adaptée à ses besoins, ou même d'alterner entre plusieurs en fonction de son état courant.

Nous illustrons cette approche avec la figure 2.10. Dans cet exemple, nous considérons que les noeuds adoptent la seconde approche évoquée, c.-à-d. que périodiquement les noeuds agrègent les deltas issus de leurs modifications et diffusent le delta résultant.

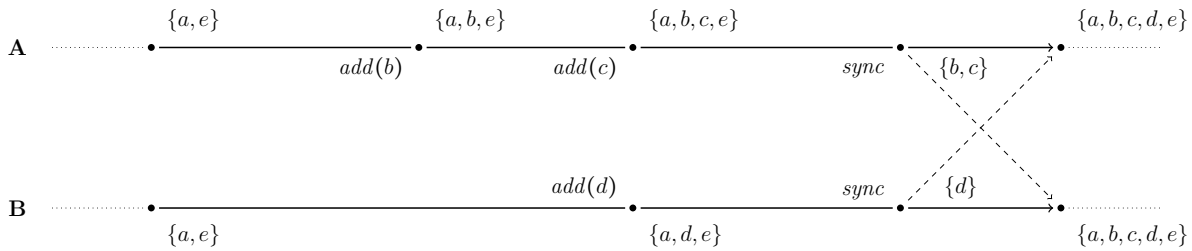


FIGURE 2.10 – Synchronisation des noeuds A et B en adoptant le modèle de synchronisation par différences d'états

Le noeud A effectue les modifications $add(b)$ et $add(c)$, qui retournent respectivement les deltas $\{b\}$ et $\{c\}$. Le noeud A agrège ces deltas et diffuse donc le delta suivant $\{b, c\}$. Quant au noeud B, il effectue la modification $add(d)$ qui produit le delta $\{d\}$. S'agissant de son unique modification, il diffuse ce delta inchangé.

Quand A (resp. B) reçoit le delta $\{d\}$ (resp. $\{b, c\}$), il l'intègre à sa copie en utilisant la fonction `merge`. Les deux noeuds convergent alors à l'état $\{a, b, c, d, e\}$.

La synchronisation par différences d'états permet donc de réduire la taille des messages diffusés sur le réseau par rapport à la synchronisation par états. Cependant, il est important de noter que la décomposition en deltas entraîne la perte d'une des propriétés intrinsèques des CRDTs synchronisés par états : le respect du modèle de cohérence causale. En effet, sans mécanisme supplémentaire, la perte ou le ré-ordonnement de deltas par le réseau peut mener à une intégration dans le désordre des modifications par l'un des noeuds. S'ils souhaitent toujours satisfaire le modèle de cohérence causal, les CRDTs synchronisés par différences d'états doivent donc définir et ajouter à leur spécification un mécanisme similaire à la couche de livraison des CRDTs synchronisés par opérations.

Ainsi, les CRDTs synchronisés par différences d'états sont une évolution prometteuse des CRDTs synchronisés par états. Ce modèle de synchronisation rend ces CRDTs utilisables dans les systèmes temps réels sans introduire de contraintes sur la fiabilité du réseau. Mais pour cela, il ajoute une couche supplémentaire de complexité à la spécification des CRDTs synchronisés par états, c.-à-d. le mécanisme dédié à la livraison des deltas.

Synthèse

Ainsi, plusieurs modèles de synchronisation ont été proposés pour permettre aux noeuds utilisant un CRDT pour répliquer une donnée de diffuser leurs modifications et d'intégrer celles des autres. Nous récapitulons dans cette section les principales propriétés et différences entre ces modèles.

Tout d'abord, rappelons que chaque approche repose sur l'utilisation d'un sup-demi-treillis pour assurer la cohérence forte à terme, c.-à-d. pour assurer que les noeuds ayant intégrés le même ensemble de modifications obtiendront des états équivalents (cf. Définition 15, page 16). Dans le cadre des CRDTs synchronisés par états et des CRDTs synchronisés par différences d'états, ce sont les états du CRDTs même qui forment un sup-demi-treillis.

Ce n'est pas exactement le cas dans le cadre des CRDTs synchronisés par opérations. Comme indiqué précédemment, les CRDTs synchronisés par opérations demandent à la couche de livraison des messages qui leur est associée qu'elle satisfasse un ensemble de contraintes. Si la couche de livraison ne garantit pas ces contraintes, e.g. les opérations sont livrées dans le désordre, l'état des noeuds peut diverger définitivement. Ainsi, pour être précis, c'est le couple $\langle \text{états du CRDT}, \text{états de la couche livraison} \rangle$ qui forme un sup-demi-treillis dans le cadre de ce modèle de synchronisation.

La principale différence entre les modèles de synchronisation proposés réside dans l'unité utilisée lors d'une synchronisation. Le modèle de synchronisation par états, de manière équivoque, utilise les états complets. L'intégration des modifications effectuées par un noeud dans la copie locale d'un second se fait alors en diffusant l'état du premier au second et en fusionnant cet état avec l'état du second.

Le modèle de synchronisation par opérations repose sur des opérations pour diffuser les modifications. Les opérations encodent les modifications sous la forme d'un ou plusieurs états spécifiques du sup-demi-treillis : les éléments irréductibles (cf. Définition 19, page 24). L'intégration des modifications d'un noeud par un second se fait alors en diffusant les opérations correspondant aux modifications et en intégrant chacune d'entre elle à la copie locale du second.

Le modèle de synchronisation par différences d'états permet quant à lui d'intégrer les modifications soit par le biais d'éléments irréductibles, soit par le biais d'états complets. Dans les deux cas, les CRDTs synchronisés par différences d'états reposent sur la fonction de fusion du sup-demi-treillis pour intégrer les modifications.

De cette différence d'unité de synchronisation découle l'ensemble des différences entre ces modèles. La capacité d'intégrer les modifications par le biais d'une fusion d'états permet aux CRDTs synchronisés par états et différences d'états de résister aux défaillances du réseau. En effet, la perte, le ré-ordonnement ou la duplication de messages, c.-à-d. d'états ou de différences d'états, n'empêche pas la convergence des noeuds. Tant que deux noeuds peuvent à terme échanger leur états respectifs et les fusionner, la fonction de fusion garantit qu'ils obtiendront à terme des états équivalents.

À l'inverse, la perte, le ré-ordonnement ou la duplication de messages, c.-à-d. d'opérations, peut entraîner une divergence des noeuds dans le cadre du modèle de synchronisation par opérations. Pour éviter ce problème, la couche de livraison de messages associée au CRDT doit satisfaire le modèle de livraison requis par ce dernier.

Un autre aspect impacté par l'unité de synchronisation est la fréquence de synchronisation. La synchronisation par états nécessite de diffuser son état complet pour diffuser ses modifications. En fonction du type de données, le coût réseau pour diffuser chaque modification dès qu'elle est effectuée peut s'avérer prohibitif. Ce modèle de synchronisation repose donc généralement sur une synchronisation périodique, c.-à-d. chaque noeud diffuse son état périodiquement.

À l'inverse, la synchronisation par éléments irréductibles, que ça soit sous la forme d'opérations ou leur forme primaire, induit un coût réseau raisonnable : les éléments sont généralement petits et de taille fixe. Les modèles de synchronisation par opérations et par différences d'états permettent donc de diffuser des modifications dès leur génération. Ceci permet aux noeuds du système d'intégrer les modifications effectuées par les autres noeuds de manière plus fréquente, voire en temps réel.

Finalement, la dernière différence entre ces modèles concerne le modèle de cohérence causale (cf. Définition 18, page 23). Par nature, le modèle de synchronisation par états garantit le respect du modèle de cohérence causale. En effet, un état correspond à l'intégration d'un ensemble de modifications. De manière similaire, le résultat de la fusion de deux états correspond à l'intégration de l'union de leur ensemble respectif de modifications. Ce modèle de synchronisation empêche donc l'intégration d'une modification sans avoir intégré aussi les modifications l'ayant précédé d'après la relation *happens-before*.

À l'inverse, par défaut, les modèles de synchronisation par opérations ou différences d'états permettent l'intégration d'un élément irréductible sans avoir intégré au préalable les éléments irréductibles l'ayant précédé d'après la relation *happens-before*. Pour satisfaire le modèle de cohérence causale, les CRDTs adoptant ces modèles de synchronisation doivent être associés à une couche de livraison de messages garantissant leur livraison causale (cf. Définition 20, page 24).

Nous récapitulons le contenu de cette discussion sous la forme du tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Récapitulatif comparatif des différents modèles de synchronisation pour CRDTs

	Sync. par états	Sync. par opérations	Sync. par diff. d'états
Forme un sup-demi-treillis	✓	✓	✓
Intègre modifications par fusion d'états	✓	✗	✓
Intègre modifications par élts irréductibles	✗	✓	✓
Résiste nativ. aux défaillances réseau	✓	✗	✓
Adapté pour systèmes temps réel	✗	✓	✓
Offre nativ. modèle de cohérence causale	✓	✗	✗

2.3 Séquences répliquées sans conflits

Dans le cadre des travaux de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur les CRDTs pour un type de donnée précis : la *Séquence*.

La Séquence, aussi appelée *Liste*, est un type abstrait de données représentant une collection ordonnée et de taille dynamique d'éléments. Dans une séquence, un même élément peut apparaître à de multiples reprises. Chacune des occurrences de cet élément est alors considérée comme distincte.

Dans le cadre de ce manuscrit, nous représentons des séquences de caractères. Cette restriction du domaine se fait sans perte de généralité. Nous illustrons par la figure 2.11 notre représentation des séquences que nous utiliserons dans nos exemples.

Dans la figure 2.12, nous présentons la spécification algébrique du type Séquence que nous utilisons.

H	E	L	L	O
0	1	2	3	4

FIGURE 2.11 – Représentation de la séquence "HELLO"

payload		
$S \in Seq\langle E \rangle$		
constructor		
$empty$:	$\longrightarrow S$
mutators		
$insert$:	$S \times \mathbb{N} \times E \longrightarrow S$
$remove$:	$S \times \mathbb{N} \longrightarrow S$
queries		
$length$:	$S \longrightarrow \mathbb{N}$
$read$:	$S \longrightarrow Array\langle E \rangle$

FIGURE 2.12 – Spécification algébrique du type abstrait usuel Séquence

Celle-ci définit deux modifications :

- (i) $insert(s, i, e)$, abrégée en *ins* dans nos figures, qui permet d'insérer un élément donné e à un index donné i dans une séquence s de taille m . Cette modification renvoie une nouvelle séquence construite de la manière suivante :

$$\forall s \in S, e \in E, i \in [0, m] \mid m = length(s), s = \langle e_0, \dots, e_{i-1}, e_i, \dots, e_{m-1} \rangle \cdot \\ insert(s, i, e) = \langle e_0, \dots, e_{i-1}, e, e_i, \dots, e_{m-1} \rangle$$

- (ii) $remove(s, i)$, abrégée en *rmv* dans nos figures, qui permet de retirer l'élément situé à l'index i dans une séquence s de taille m . Cette modification renvoie une nouvelle séquence construite de la manière suivante :

$$\forall s \in S, e \in E, i \in [0, m[\mid m = length(s), s = \langle e_0, \dots, e_{i-1}, e_i, e_{i+1}, \dots, e_{m-1} \rangle \cdot \\ remove(s, i) = \langle e_0, \dots, e_{i-1}, e_{i+1}, \dots, e_{m-1} \rangle$$

Les modifications définies dans la figure 2.12, *insert* et *remove*, ne permettent respectivement que l'insertion ou la suppression d'un élément à la fois. Cette simplification du type se fait cependant sans perte de généralité, la spécification pouvant être étendue pour insérer successivement plusieurs éléments à partir d'un index donné ou retirer plusieurs éléments consécutifs.

La spécification définit aussi deux observateurs :

- (i) $length(s)$, qui permet de récupérer le nombre d'éléments présents dans une séquence s .

- (ii) $read(s)$, qui permet de consulter l'état d'une séquence s . L'état de la séquence est retournée sous la forme d'un Tableau, c.-à-d. une collection ordonnée de taille fixe d'éléments. Comme pour le type Ensemble, nous considérons que $read$ est utilisé de manière implicite après chaque modification dans nos exemples.

Cette spécification du type Séquence est une spécification séquentielle. Les modifications sont définies pour être effectuées l'une après l'autre. Si plusieurs noeuds répliquent une même séquence et la modifient en concurrence, l'intégration de leurs opérations respectives dans des ordres différents résulte en des états différents. Nous illustrons ce point avec la figure 2.13.

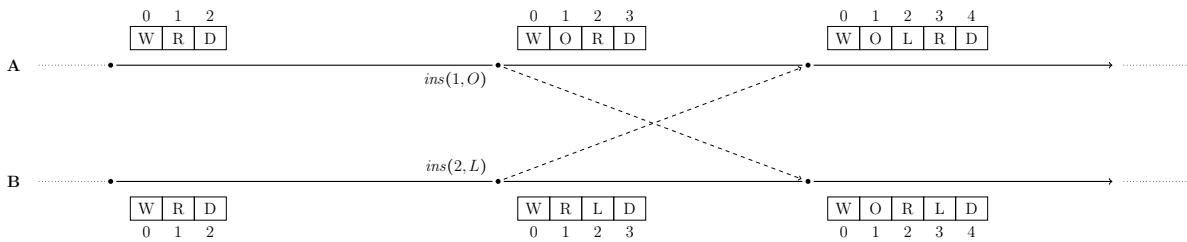


FIGURE 2.13 – Modifications concurrentes d'une séquence

Dans cet exemple, deux noeuds A et B partagent et éditent collaborativement une même séquence. Celle-ci correspond initialement à la chaîne de caractères "WRD". Le noeud A insère le caractère "O" à l'index 1, obtenant ainsi la séquence "WORD". En concurrence, le noeud B insère lui le caractère "L" à l'index 2 pour obtenir "WRLD".

Les deux noeuds diffusent ensuite leur opération respective puis intègre celle de leur pair. Nous constatons alors une divergence. En effet, l'intégration de la modification $insert(2, L)$ par le noeud A ne produit pas l'effet escompté, c.-à-d. produire la chaîne "WORLD", mais la chaîne "WOLRD".

Cette divergence est due au fait que la modification $insert$ ne commute pas avec elle-même. En effet, celle-ci se base sur un index pour déterminer où placer le nouvel élément. Cependant, les index sont eux-mêmes modifiés par $insert$. Ainsi, l'intégration dans des ordres différents de modifications $insert$ sur un même état initial résulte en des états différents. Plus généralement, nous observons que chaque paire possible de modifications du type Séquence, c.-à-d. $\langle insert, insert \rangle$, $\langle insert, remove \rangle$ et $\langle remove, remove \rangle$, ne commute pas.

La non-commutativité des modifications du type Séquence fut l'objet de nombreux travaux de recherche dans le domaine de l'édition collaborative. Pour résoudre ce problème, l'approche Operational Transformation (OT) [60, 61] fut initialement proposée. Cette approche propose de transformer une modification par rapport aux modifications concurrentes intégrées pour tenir compte de leur effet. Elle se décompose en deux parties :

- (i) Un algorithme de contrôle [62, 63, 64], qui définit par rapport à quelles modifications une nouvelle modification distante doit être transformée avant d'être intégrée à la copie.
- (ii) Des fonctions de transformations [60, 62, 65, 66], qui définissent comment une modification doit être transformée par rapport à une autre modification pour tenir compte de son effet.

Cependant, bien que de nombreuses fonctions de transformations pour le type Séquence ont été proposées, seule la correction des Tombstone Transformation Functions (TTF) [66] a été éprouvée pour les systèmes P2P à notre connaissance. De plus, les algorithmes de contrôle compatibles reposent sur une livraison causale des modifications, et donc l'utilisation de vecteurs d'horloges. Cette approche est donc inadaptée aux systèmes P2P dynamiques.

Néanmoins, une contribution importante de l'approche OT fut la définition d'un modèle de cohérence que doivent respecter les systèmes d'édition collaboratif : le modèle Convergence, Causality preservation, Intention preservation (CCI) [67].

Définition 22 (Modèle Convergence, Causality preservation, Intention preservation). Le modèle de cohérence Convergence, Causality preservation, Intention preservation définit qu'un système d'édition collaboratif doit respecter les critères suivants :

Définition 22.1 (Convergence). Le critère de *Convergence* indique que des noeuds ayant intégrés le même ensemble de modifications convergent à un état équivalent.

Définition 22.2 (Préservation de la causalité). Le critère de *Préservation de la causalité* indique que si une modification m_1 précède une autre modification m_2 d'après la relation *happens-before*, c.-à-d. $m_1 \rightarrow m_2$, m_1 doit être intégrée avant m_2 par les noeuds du système.

Définition 22.3 (Préservation de l'intention). Le critère de *Préservation de l'intention* indique que l'intégration d'une modification par un noeud distant doit reproduire l'effet de la modification sur la copie du noeud d'origine, indépendamment des modifications concurrentes intégrées.

De manière similaire à [68], nous considérons qu'un système collaboratif doit, en plus du modèle CCI, assurer sa *capacité de passage à l'échelle* (cf. Définition 4, page 2). Nous précisons notre définition de cette propriété ci-dessous :

Définition 23 (Capacité de passage à l'échelle). Le capacité d'un passage à l'échelle d'un système indique que son nombre de noeuds n'a qu'un impact limité, c.-à-d. idéalement constant ou logarithmique, sur sa complexité en temps, en espace et sur le nombre et la taille des messages.

Nous constatons cependant que le critère 22.2 et la propriété 23 peuvent être contradictoires. En effet, pour respecter le modèle de cohérence causale, un système peut nécessiter une livraison causale des modifications, e.g. un CRDT synchronisé par opérations dont seules les opérations concurrentes sont commutatives. La livraison causale requiert l'ajout de vecteurs de version aux opérations, ou le calcul et l'ajout aux opérations de leurs dépendances causales. La livraison causale implique ainsi un surcoût qui est fonction du nombre de participants du système et qui concerne soit la taille des messages, soit les métadonnées maintenues et les calculs effectuées par les noeuds [69]. Ainsi, dans le cadre de nos travaux sur la conception de systèmes collaboratifs P2P à large échelle, nous cherchons à nous affranchir du modèle de livraison causale des modifications, ce qui peut nécessiter de relaxer le modèle de cohérence causale.

C'est dans une optique similaire que fut proposé WOOT [70], un modèle de séquence répliquée qui pose les fondations des CRDTs. Depuis, plusieurs CRDTs pour le type

Séquence furent définies [71, 72, 68]. Ces CRDTs peuvent être répartis en deux approches : l'approche à pierres tombales [70, 71] et l'approche à identifiants densément ordonnés [72, 68]. L'état d'une séquence pouvant croître de manière infinie, ces CRDTs sont synchronisés par opérations pour limiter la taille des messages diffusés. À notre connaissance, seul [27] propose un CRDT pour le type Séquence synchronisé par différence d'états.

Dans la suite de cette section, nous présentons les différents CRDTs pour le type Séquence de la littérature.

2.3.1 Approche à pierres tombales

WOOT

WOOT [70] est considéré a posteriori comme le premier CRDT synchronisé par opérations pour le type Séquence¹⁵. Conçu pour l'édition collaborative P2P, son but est de surpasser les limites de l'approche OT évoquées précédemment, c.-à-d. le coût du mécanisme de livraison causale.

L'intuition de WOOT est la suivante : WOOT modifie la sémantique de la modification *insert* pour qu'elle corresponde à l'insertion d'un nouvel élément entre deux autres, et non plus à l'insertion d'un nouvel élément à une position donnée. Par exemple, l'insertion de l'élément "K" dans la séquence "SY" pour obtenir l'état "SKY", c.-à-d. $insert(1, K)$, devient $insert(S < K < Y)$, où $<$ représente l'ordre créé entre ces éléments.

Afin de préciser quels éléments correspondent aux prédécesseur et successeur de l'élément inséré, WOOT repose sur un système d'identifiants. WOOT associe ainsi un identifiant unique à chaque élément de la séquence.

Définition 24 (Identifiant WOOT). Un identifiant WOOT est un couple $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$ avec

- (i) $nodeId$, l'identifiant du noeud qui génère cet identifiant WOOT. Il est supposé unique.
- (ii) $nodeSeq$, un entier propre au noeud, servant d'horloge logique. Il est incrémenté à chaque génération d'identifiant WOOT.

Dans le cadre de ce manuscrit, nous utiliserons pour former les identifiants WOOT le nom du noeud (e.g. A) comme $nodeId$ et un entier naturel, en démarrant à 1, comme $nodeSeq$. Nous les représenterons de la manière suivante $nodeId\ nodeSeq$, e.g. $A1$ ¹⁶.

Les modifications *insert* et *remove* génèrent dès lors des opérations tirant profit des identifiants. Par exemple, considérons une séquence WOOT représentant "SY" et qui associe respectivement les identifiants $A1$ et $A2$ aux éléments "S" et "Y". L'insertion de l'élément "E" dans cette séquence pour obtenir l'état "SKY", c.-à-d. $insert(S < K < Y)$, produit par exemple l'opération $insert(A1 < \langle B1, K \rangle < A2)$. De manière similaire, la suppression de l'élément "K" dans cette séquence pour obtenir l'état "SA", c.-à-d. $remove(1)$, produit $remove(B1)$.

¹⁵. [18] n'ayant formalisé les CRDTs qu'en 2007.

¹⁶. Notons qu'un identifiant WOOT est bel et bien unique, deux noeuds ne pouvant utiliser le même $nodeId$ et un noeud n'utilisant jamais deux fois le même $nodeSeq$.

WOOT utilise des pierres tombales pour que les opérations *insert*, qui nécessite la présence des deux éléments entre lesquels nous insérons un nouvel élément, et *remove* commutent. Ainsi, lorsqu'un élément est retiré, une pierre tombale est conservée dans la séquence pour indiquer sa présence passée. Les données de l'élément sont elles supprimées.

Finalement, WOOT définit $<_{id}$, un ordre strict total sur les identifiants associés aux éléments. En effet, la relation $<$ n'est pas définie pour deux éléments insérés en concurrence et qui possèdent les mêmes prédecesseur et successeur, e.g. $insert(S < K < Y)$ et $insert(S < L < Y)$. Pour que tous les noeuds convergent, ils doivent choisir comment ordonner ces éléments de manière déterministe et indépendante de l'ordre de réception des modifications. Ils utilisent pour cela $<_{id}$.

Définition 25 (Relation $<_{id}$). La relation $<_{id}$ définit que, étant donné deux identifiants $id_1 = \langle nodeId_1, nodeSeq_1 \rangle$ et $id_2 = \langle nodeId_2, nodeSeq_2 \rangle$, nous avons :

$$id_1 <_{id} id_2 \quad \text{iff} \quad (nodeId_1 < nodeId_2) \quad \vee \\ (nodeId_1 = nodeId_2 \wedge nodeSeq_1 < nodeSeq_2)$$

Notons que l'ordre définit par $<_{id}$ correspond à l'ordre lexicographique sur les composants des identifiants.

De cette manière, WOOT offre une spécification de la Séquence dont les opérations commutent. Nous récapitulons son fonctionnement à l'aide de la figure 2.14.

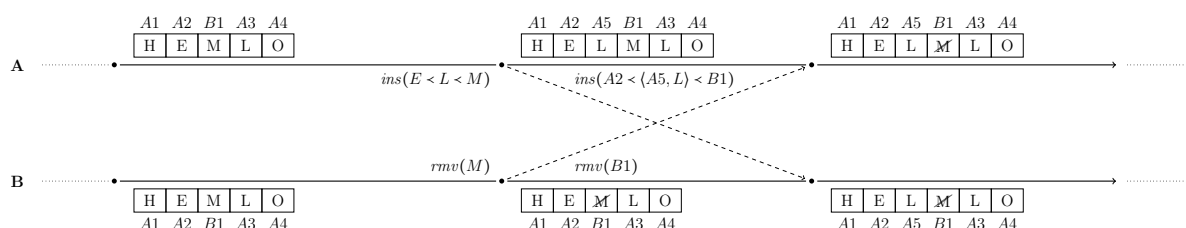


FIGURE 2.14 – Modifications concurrentes d'une séquence répliquée WOOT

Dans cet exemple, deux noeuds A et B partagent et éditent collaborativement une séquence répliquée WOOT. Initialement, ils possèdent le même état : la séquence contient les éléments "HEMLO", et à chaque élément est associé un identifiant, e.g. $A1, B1, A2...$

Le noeud A insère l'élément "L" entre les éléments "E" et "M", c.-à-d. $insert(E < L < M)$. WOOT convertit cette modification en opération $insert(A2 < \langle A5, L \rangle < B1)$. L'opération est intégrée à la copie locale, ce qui produit l'état "HELMLO", puis diffusée sur le réseau.

En concurrence, le noeud B supprime l'élément "M" de la séquence, c.-à-d. $remove(M)$. De la même manière, WOOT génère l'opération correspondante $remove(B1)$. Comme expliqué précédemment, l'intégration de cette opération ne supprime pas l'élément "M" de l'état mais se contente de le masquer. L'état produit est donc "HEMLO". L'opération est ensuite diffusée.

A (resp. B) reçoit ensuite l'opération de B, $remove(B1)$ (resp. A, $insert(A2 < \langle A5, L \rangle < B1)$), et l'intègre à sa copie. Les opérations de WOOT étant commutatives, les noeuds obtiennent le même état final : "HELMLO".

Grâce à la commutativité de ses opérations, WOOT s'affranchit du modèle de livraison causale nécessitant l'utilisation coûteuse de vecteurs d'horloges. WOOT met en place un modèle de livraison sur-mesure basé sur les pré-conditions des opérations :

Définition 26 (Modèle de livraison WOOT). Le modèle de livraison WOOT définit que :

- (i) Une opération doit être livrée exactement une fois à chaque noeud¹⁷.
- (ii) Une opération $insert(predId < \langle id, elt \rangle < succId)$ ne peut être livrée à un noeud qu'après la livraison des opérations d'insertion des éléments associés à $predId$ et $succId$.
- (iii) L'opération $remove(id)$ ne peut être livrée à un noeud qu'après la livraison de l'opération d'insertion de l'élément associé à id .

Ce modèle de livraison ne requiert qu'une quantité fixe de métadonnées associées à chaque opération pour être respecté. WOOT est donc adapté aux systèmes P2P dynamiques.

WOOT souffre néanmoins de plusieurs limites. La première d'entre elles correspond à l'utilisation de pierres tombales dans la séquence répliquée. En effet, comme indiqué précédemment, la modification $remove$ ne supprime que les données de l'élément concerné. L'identifiant qui lui a été associé reste lui présent dans la séquence à son emplacement. Une séquence WOOT ne peut donc que croître, ce qui impacte négativement sa complexité en espace ainsi qu'en temps.

OSTER et al. [70] font cependant le choix de ne pas proposer de mécanisme pour purger les pierres tombales. En effet, leur motivation est d'utiliser ces pierres tombales pour proposer un mécanisme d'annulation, une fonctionnalité importante dans le domaine de l'édition collaborative. Cette piste de recherche est développée dans [73].

Une seconde limite de WOOT concerne la complexité en temps de l'algorithme d'intégration des opérations d'insertion. En effet, celle-ci est en $\mathcal{O}(H^3)$ avec H le nombre de modifications ayant été effectuées sur le document [74]. Plusieurs évolutions de WOOT sont proposées pour mitiger cette limite : WOOTO [75] et WOOTH [74].

WEISS et al. [75] remanient la structure des identifiants associés aux éléments. Cette modification permet un algorithme d'intégration des opérations $insert$ avec une meilleure complexité en temps, $\mathcal{O}(H^2)$. AHMED-NACER et al. [74] se basent sur WOOTO et proposent l'utilisation de structures de données améliorant la complexité des algorithmes d'intégration des opérations, au détriment des métadonnées stockées localement par chaque noeud. Cependant, cette évolution ne permet ici pas de réduire l'ordre de grandeur des opérations $insert$.

Néanmoins, l'évaluation expérimentale des différentes approches pour l'édition collaborative P2P en temps réel menée dans [74] a montré que les CRDTs de la famille WOOT n'étaient pas assez efficaces. Dans le cadre de cette expérience, des utilisateur-rices effectuaient des tâches d'édition collaborative données. Les traces de ces sessions d'édition collaboratives furent ensuite rejouées en utilisant divers mécanismes de résolution de conflits,

¹⁷. Néanmoins, les algorithmes d'intégration des opérations, notamment celui pour l'opération $insert$, pourraient être aisément modifiés pour être idempotents. Ainsi, la livraison répétée d'une même opération deviendrait possible, ce qui permettrait de relaxer cette contrainte en *une livraison au moins une fois*.

dont WOOT, WOOTO et WOOTH. Le but était de mesurer les performances de ces mécanismes, notamment leurs temps d'intégration des modifications et opérations. Dans le cas de la famille WOOT, AHMED-NACER et al. ont constaté que ces temps dépassaient parfois 50ms. Il s'agit là de la limite des délais acceptables par les utilisateur-rices d'après [76, 77]. Ces performances disqualifient donc les CRDTs de la famille WOOT comme approches viables pour l'édition collaborative P2P temps réel.

Replicated Growable Array

Replicated Growable Array (RGA) [71] est le second CRDT pour le type Séquence appartenant à l'approche à pierres tombales. Il a été spécifié dans le cadre d'un effort pour établir les principes nécessaires à la conception de Replicated Abstract Data Types (RADTs).

Dans cet article, les auteurs définissent et se basent sur 2 principes pour concevoir des RADTs. Le premier d'entre eux est la Commutativité des Opérations (OC).

Définition 27 (Commutativité des Opérations). La Commutativité des Opérations (OC) définit que toute paire possible d'opérations concurrentes du RADT doit être commutative.

Ce principe permet de garantir que l'intégration par différents noeuds d'une même séquence d'opérations concurrentes, mais dans des ordres différents, résultera en un état équivalent.

Le second principe sur lequel reposent les RADTs est la Transitivité de la Précédence (PT).

Définition 28 (Transitivité de la Précédence). La Transitivité de la Précédence (PT) définit qu'étant donné une relation de précédence, \rightarrow , et trois opérations, o_1 , o_2 et o_3 , si $o_1 \rightarrow o_2$ et $o_2 \rightarrow o_3$, alors nous avons $o_1 \rightarrow o_3$.

avec la relation de précédence \rightarrow définie de la manière suivante :

Définition 29 (Relation de précédence). La relation de précédence, notée \rightarrow , définit qu'étant donné deux opérations, o_1 et o_2 , l'intention de o_2 doit être préservée par rapport à celle de o_1 , noté $o_1 \rightarrow o_2$, si et seulement si :

- (i) $o_1 \rightarrow o_2$ ou
- (ii) $o_1 \parallel o_2$ et o_2 prend la précédence sur o_1 .

Ce second principe offre une méthode pour concevoir un ensemble d'opérations commutatives. Il permet aussi d'exprimer la précédence des opérations par rapport aux opérations dont elles dépendent causalement.

À partir de ces principes, les auteurs proposent plusieurs RADTs : Replicated Fixed-Size Array (RFA), Replicated Hash Table (RFT) et Replicated Growable Array (RGA), qui nous intéresse ici.

Dans RGA, l'intention de l'insertion est défini comme l'insertion d'un nouvel élément directement après un élément existant. Ainsi, RGA se base sur le prédecesseur d'un

élément pour déterminer où l'insérer. De fait, tout comme WOOT, RGA repose sur un système d'identifiants qu'il associe aux éléments pour pouvoir s'y référer par la suite.

Les auteurs proposent le modèle de données suivant comme identifiants :

Définition 30 (Identifiant S4Vector). Un identifiant S4Vector est de la forme $\langle ssid, sum, ssn, seq \rangle$ avec :

- (i) $ssid$, l'identifiant de la session de collaboration.
- (ii) sum , la somme du vecteur d'horloges courant du noeud auteur de l'élément.
- (iii) ssn , l'identifiant du noeud auteur de l'élément.
- (iv) seq , le numéro de séquence de l'auteur de l'élément à son insertion.

Cependant, dans les présentations suivantes de RGA [19, 78], les auteurs utilisent des horloges de Lamport [35] en lieu et place des identifiants S4Vector. Nous procédons donc ici à la même simplification, et abstrayons la structure des identifiants utilisée avec le symbole t .

À l'aide des identifiants, RGA redéfinit les modifications de la séquence de la manière suivante :

- (i) $insert$ devient $insert(predId < \langle t, elt \rangle)$.
- (ii) $remove$ devient $remove(t)$.

Puisque plusieurs éléments peuvent être insérés en concurrence à la même position, c.-à-d. avec le même prédecesseur, il est nécessaire de définir une relation d'ordre strict total pour ordonner les éléments de manière déterministe et indépendante de l'ordre de réception des modifications. Pour cela, RGA définit $<_{id}$:

Définition 31 (Relation $<_{id}$). La relation $<_{id}$ définit un ordre strict total sur les identifiants en se basant sur l'ordre lexicographique leurs composants. Par exemple, étant donné deux identifiants $t_1 = \langle ssid_1, sum_1, ssn_1, seq_1 \rangle$ et $t_2 = \langle ssid_2, sum_2, ssn_2, seq_2 \rangle$, nous avons :

$$\begin{aligned}
 t_1 <_{id} t_2 \quad \text{iff} \quad & (ssid_1 < ssid_2) \quad \vee \\
 & (ssid_1 = ssid_2 \wedge sum_1 < sum_2) \quad \vee \\
 & (ssid_1 = ssid_2 \wedge sum_1 = sum_2 \wedge ssn_1 < ssn_2) \quad \vee \\
 & (ssid_1 = ssid_2 \wedge sum_1 = sum_2 \wedge ssn_1 = ssn_2 \wedge seq_1 < seq_2)
 \end{aligned}$$

L'utilisation de $<_{id}$ comme stratégie de résolution de conflits permet de rendre commutative les modifications $insert$ concurrentes.

Concernant les suppressions, RGA se comporte de manière similaire à WOOT : la séquence conserve une pierre tombale pour chaque élément supprimé, de façon à pouvoir insérer à la bonne position un élément dont le prédecesseur a été supprimé en concurrence. Cette stratégie rend commutative les modifications $insert$ et $remove$.

Nous récapitulons le fonctionnement de RGA à l'aide de la figure 2.15.

Dans cet exemple, deux noeuds A et B partagent et éditent collaborativement une séquence répliquée RGA. Initialement, ils possèdent le même état : la séquence contient les éléments "HEMLO", et à chaque élément est associé un identifiant, e.g. $t_1, t_2, t_3...$

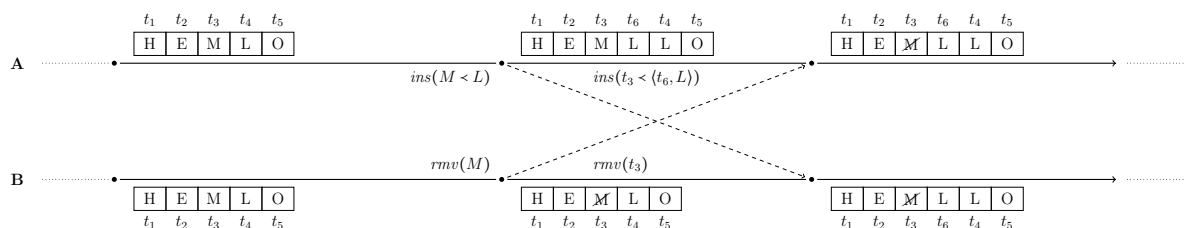


FIGURE 2.15 – Modifications concurrentes d'une séquence répliquée RGA

Le noeud A insère l'élément "L" après l'élément et "M", c.-à-d. $insert(M < L)$. RGA convertit cette modification en opération $insert(t_3 < \langle t_6, L \rangle)$. L'opération est intégrée à la copie locale, ce qui produit l'état "HEMLLO", puis diffusée sur le réseau.

En concurrence, le noeud B supprime l'élément "M" de la séquence, c.-à-d. $remove(M)$. De la même manière, RGA génère l'opération correspondante $remove(t_3)$. Comme expliqué précédemment, l'intégration de cette opération ne supprime pas l'élément "M" de l'état mais se contente de le masquer. L'état produit est donc "HEMLO". L'opération est ensuite diffusée.

A (resp. B) reçoit ensuite l'opération de B, $remove(t_3)$ (resp. A, $insert(t_3 < \langle t_6, L \rangle)$), et l'intègre à sa copie. Les opérations de RGA étant commutatives, les noeuds obtiennent le même état final : "HEMLLO".

À la différence des auteurs de WOOT, ROH et al. [71] jugent le coût des pierres tombales trop élevé. Ils proposent alors un mécanisme de Garbage Collection (GC) des pierres tombales. Ce mécanisme repose sur deux conditions :

- (i) La stabilité causale de l'opération $remove$, c.-à-d. l'ensemble des noeuds a intégré la suppression de l'élément et ne peut émettre d'opérations utilisant l'élément supprimé comme prédecesseur.
- (ii) L'impossibilité pour l'ensemble des noeuds de générer un identifiant inférieur à celui de l'élément suivant la pierre tombale d'après $<_{id}$.

L'intuition de la condition (i) est de s'assurer qu'aucune opération $insert$ concurrente à l'exécution du mécanisme ne peut utiliser la pierre tombale comme prédecesseur, les opérations $insert$ ne pouvant reposer que sur les éléments. L'intuition de la condition (ii) est de s'assurer que l'intégration d'une opération $insert$, concurrente à l'exécution du mécanisme et devant résulter en l'insertion de l'élément avant la pierre tombale, ne sera altérée par la suppression de cette dernière.

Concernant le modèle de livraison adopté, RGA repose sur une livraison causale des opérations. Cependant, [71] indique que ce modèle de livraison pourrait être relaxé, de façon à ne plus dépendre de vecteurs d'horloges. Ce point est néanmoins laissé comme piste de recherche future. À notre connaissance, cette dernière n'a pas été explorée dans la littérature. Néanmoins ELVINGER [27] indique que RGA pourrait adopter un modèle de livraison similaire à celui de WOOT. Ce modèle consisterait :

Définition 32 (Modèle de livraison RGA). Le modèle de livraison RGA définit que :

- (i) Une opération doit être livrée exactement une fois à chaque noeud.

- (ii) Une opération $insert(predId < \langle id, elt \rangle)$ ne peut être livrée à un noeud qu'après la livraison de l'opération d'insertion de l'élément associé à $predId$.
- (iii) Une opération $remove(id)$ ne peut être livrée à un noeud qu'après la livraison de l'opération d'insertion de l'élément associé à id .

Nous secondons cette observation.

Un des avantages de RGA est son efficacité. En effet, son algorithme d'intégration des insertions offre une meilleure complexité en temps que celui de WOOT : $\mathcal{O}(H)$, avec H le nombre de modifications ayant été effectuées sur le document [74]. De plus, [78, 79] montrent que le modèle de données de RGA est optimal d'un point de vue complexité en espace comme CRDT pour le type Séquence par élément sans mécanisme de GC.

Plusieurs extensions de RGA ont par la suite été proposées. BRIOT et al. [80] indiquent que les pauvres performances des modifications locales¹⁸ des CRDTs pour le type Séquence constituent une de leurs limites. Il s'agit en effet des performances impactant le plus l'expérience utilisateur, les utilisateurs s'attendant à un retour immédiat de la part de l'application. Les auteurs souhaitent donc réduire la complexité en temps des modifications locales à une complexité logarithmique.

Pour cela, ils proposent l'*identifier structure*, une structure de données auxiliaire utilisable par les CRDTs pour le type Séquence. Cette structure permet de retrouver plus efficacement l'identifiant d'un élément à partir de son index, au pris d'un surcoût en métadonnées. Les auteurs combinent cette structure de données à un mécanisme d'agrégation des éléments en blocs¹⁹ tels que proposés par [81, 26], qui permet de réduire la quantité de métadonnées stockées par la séquence répliquée. Cette combinaison aboutit à la définition d'un nouveau CRDT pour le type Séquence, *RGATreeSplit*, qui offre une meilleure complexité en temps et en espace.

Dans [82], les auteurs mettent en lumière un problème récurrent des CRDTs pour le type Séquence : lorsque des séquences de modifications sont effectuées en concurrence par des noeuds, les CRDTs assurent la convergence des répliques mais pas la correction du résultat. Notamment, il est possible que les éléments insérés en concurrence se retrouvent entrelacés. La figure 2.16 présente un tel cas de figure :

Dans la Figure 2.16a, deux noeuds A et B partagent et éditent collaborativement une séquence répliquée RGA. Initialement, ils possèdent le même état : la séquence contient les éléments "ABC!", et à chaque élément est associé un identifiant, e.g. t_1, t_2, t_3 et t_4 .

Le noeud A insère après l'élément "C" les éléments "E" et "F". RGA génère les opérations $insert(t_3 < \langle t_5, E \rangle)$ et $insert(t_5 < \langle t_6, F \rangle)$. En concurrence, le noeud B insère les éléments "G" et "H" de manière similaire, produisant les opérations $insert(t_3 < \langle t_7, G \rangle)$ et $insert(t_7 < \langle t_8, H \rangle)$. Finalement, toujours en concurrence, le noeud A insère un nouvel élément après l'élément "C", l'élément "D", ce qui résulte en l'opération $insert(t_9 < \langle t_3, D \rangle)$. Pour la suite de notre exemple, nous supposons que $t_5 <_{id} t_6 <_{id} t_7 <_{id} t_8 <_{id} t_9$.

Nous poursuivons notre exemple dans la Figure 2.16b. Dans cette figure, les noeuds A et B se synchronisent et échangent leurs opérations respectives. À la réception de l'opération de B $insert(t_3 < \langle t_7, G \rangle)$, le noeud A compare t_7 avec les identifiants des

18. Relativement par rapport aux algorithmes de l'approche OT.

19. Nous détaillerons ce mécanisme par la suite.

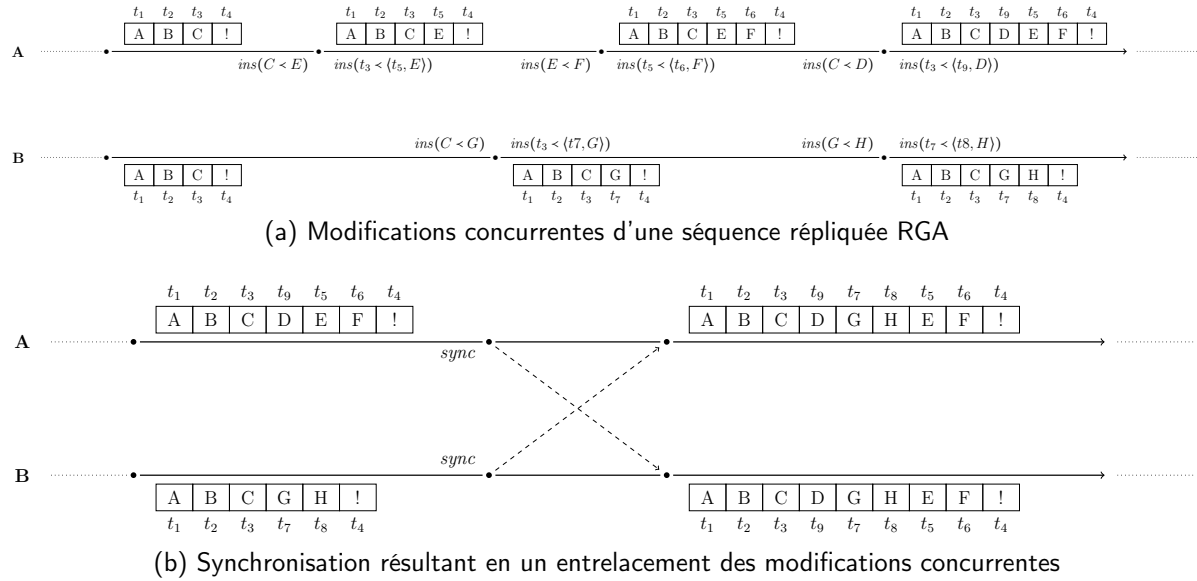


FIGURE 2.16 – Entrelacement d'éléments insérés de manière concurrente

éléments se trouvant après t_3 . Il place l'élément "G" qu'après les éléments ayant des identifiants supérieurs à t_7 . Ainsi, il insère "G" après "D" (t_9), mais avant "E" (t_5). L'élément "H" (t_7) est inséré de manière similaire avant "E" (t_5).

Le noeud B procède de manière similaire. Les noeuds A et B convergent alors à un état équivalent : "ABCDGHEF!". Nous remarquons ainsi que les modifications de B, la chaîne "GH", s'est intercalée dans la chaîne insérée par A en concurrence, "DHEF".

Pour remédier à ce problème, les auteurs définissent une nouvelle spécification que doivent respecter les approches pour la mise en place de séquences répliquées : *la spécification forte sans entrelacement des séquences répliquées*. Basée sur la spécification forte des séquences répliquées spécifiée dans [78, 79], cette nouvelle spécification précise que les éléments insérés en concurrence ne doivent pas s'entrelacer dans l'état final. KLEPPMANN et al. [82] proposent ensuite une évolution de RGA respectant cette spécification.

Pour cela, les auteurs ajoutent à l'opération *insert* un paramètre, *samePredIds*, un ensemble correspondant à l'ensemble des identifiants connus utilisant le même *predId* que l'élément inséré. En maintenant en plus un exemplaire de cet ensemble pour chaque élément de la séquence, il est possible de déterminer si deux opérations *insert* sont concurrentes ou causalement liées et ainsi déterminer comment ordonner leurs éléments. Cependant, les auteurs ne prouvent pas dans [82] que cette extension empêche tout entrelacement²⁰.

20. Un travail en cours [83] indique en effet qu'une séquence répliquée empêchant tout entrelacement est impossible.

2.3.2 Approche à identifiants densément ordonnés

Treedoc

[18, 72] proposent une nouvelle approche pour CRDTs pour le type Séquence. La particularité de cette approche est de se baser sur des identifiants de position, respectant un ensemble de propriétés :

Définition 33 (Propriétés des identifiants de position). Les propriétés que les identifiants de position doivent respecter sont les suivantes :

- (i) Chaque identifiant est attribué à un élément de la séquence.
- (ii) Aucune paire d'éléments ne partage le même identifiant.
- (iii) L'identifiant d'un élément est immuable.
- (iv) Il existe un ordre total strict sur les identifiants, $<_{id}$, cohérent avec l'ordre des éléments dans la séquence.
- (v) Les identifiants sont tirés d'un ensemble dense, que nous notons \mathbb{I} .

Intéressons-nous un instant à la propriété (v). Cette propriété signifie que :

$$\forall predId, succId \in \mathbb{I}, \exists id \in \mathbb{I} \mid predId <_{id} id <_{id} succId$$

Cette propriété garantit donc qu'il sera toujours possible de générer un nouvel identifiant de position entre deux autres, c.-à-d. qu'il sera toujours possible d'insérer un nouvel élément entre deux autres (d'après la propriété (iv)).

L'utilisation d'identifiants de position permet de redéfinir les modifications de la séquence :

- (i) $insert(pred < elt < succ)$ devient alors $insert(id, elt)$, avec $predId <_{id} id <_{id} succId$.
- (ii) $remove(elt)$ devient $remove(id)$.

Ces redéfinitions permettent de proposer une spécification de la séquence avec des modifications concurrentes qui commutent.

À partir de cette spécification, PREGUICA et al. propose un CRDT pour le type Séquence : *Treedoc*. Ce dernier tire son nom de l'approche utilisée pour émuler un ensemble dense pour générer les identifiants de position : *Treedoc* utilise pour cela les chemins d'un arbre binaire.

La figure 2.17 illustre le fonctionnement de cette approche. La racine de l'arbre binaire, notée ϵ , correspond à l'identifiant de position du premier élément inséré dans la séquence répliquée. Pour générer les identifiants des éléments suivants, *Treedoc* utilise l'identifiant de leur prédecesseur ou successeur : *Treedoc* concatène (noté \oplus) à ce dernier le chiffre 0 (resp. 1) en fonction de si l'élément doit être placé à gauche (resp. à droite) de l'identifiant utilisé comme base. Par exemple, pour insérer un nouvel élément à la fin de la séquence dont les identifiants de position sont représentés par la figure 2.17, *Treedoc* lui associerait l'identifiant $id = \epsilon \oplus 1 \oplus 1 \oplus 1$. Ainsi, *Treedoc* suit l'ordre du parcours infixe de l'arbre binaire pour ordonner les identifiants de position.

Ce mécanisme souffre néanmoins d'un écueil : en l'état, plusieurs noeuds du système peuvent associer un même identifiant à des éléments insérés en concurrence, contrevenant

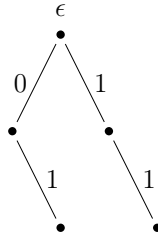


FIGURE 2.17 – Arbre pour générer des identifiants de positions

alors à la propriété (ii). Pour corriger cela, Treedoc ajoute à chaque noeud de l'arbre un désambiguateur par élément : une paire $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$. Nous représentons ces derniers avec la notation d_i .

Ainsi, un noeud de l'arbre des identifiants peut correspondre à plusieurs éléments, ayant tous le même identifiant à l'exception de leur désambiguateur. Ces éléments sont alors ordonnés les uns par rapport aux autres en respectant l'ordre défini sur leur désambiguateur.

Afin de réduire le surcoût en métadonnée des désambiguateurs, ces derniers ne sont ajoutés au chemin formant un identifiant qu'uniquement lorsqu'ils sont nécessaires, c.-à-d. :

- (i) Le noeud courant est le noeud final de l'identifiant.
- (ii) Le noeud courant nécessite désambiguation, c.-à-d. plusieurs éléments utilisent l'identifiant correspondant à ce noeud.

La figure 2.18 présente un exemple de cette situation. Dans cet exemple, deux identifiants

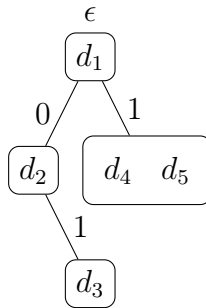


FIGURE 2.18 – Identifiants de position avec désambiguateurs

furent insérés en concurrence en fin de séquence : $id_4 = \epsilon \oplus \langle 1, d_4 \rangle$ et $id_5 = \epsilon \oplus \langle 1, d_5 \rangle$. Pour développer cet exemple, Treedoc générerait les identifiants :

- (i) $id_6 = \epsilon \oplus 1 \oplus \langle 1, d_6 \rangle$ à l'insertion d'un nouvel élément en fin de liste.
- (ii) $id_7 = \epsilon \oplus \langle 1, d_4 \rangle \oplus \langle 1, d_7 \rangle$ à l'insertion d'un nouvel élément entre les éléments ayant pour identifiants id_4 et id_5 .

Nous récapitulons le fonctionnement complet de Treedoc dans la figure 2.19. Par souci de cohésion, nous utilisons ici à la fois l'arbre binaire pour représenter les identifiants de

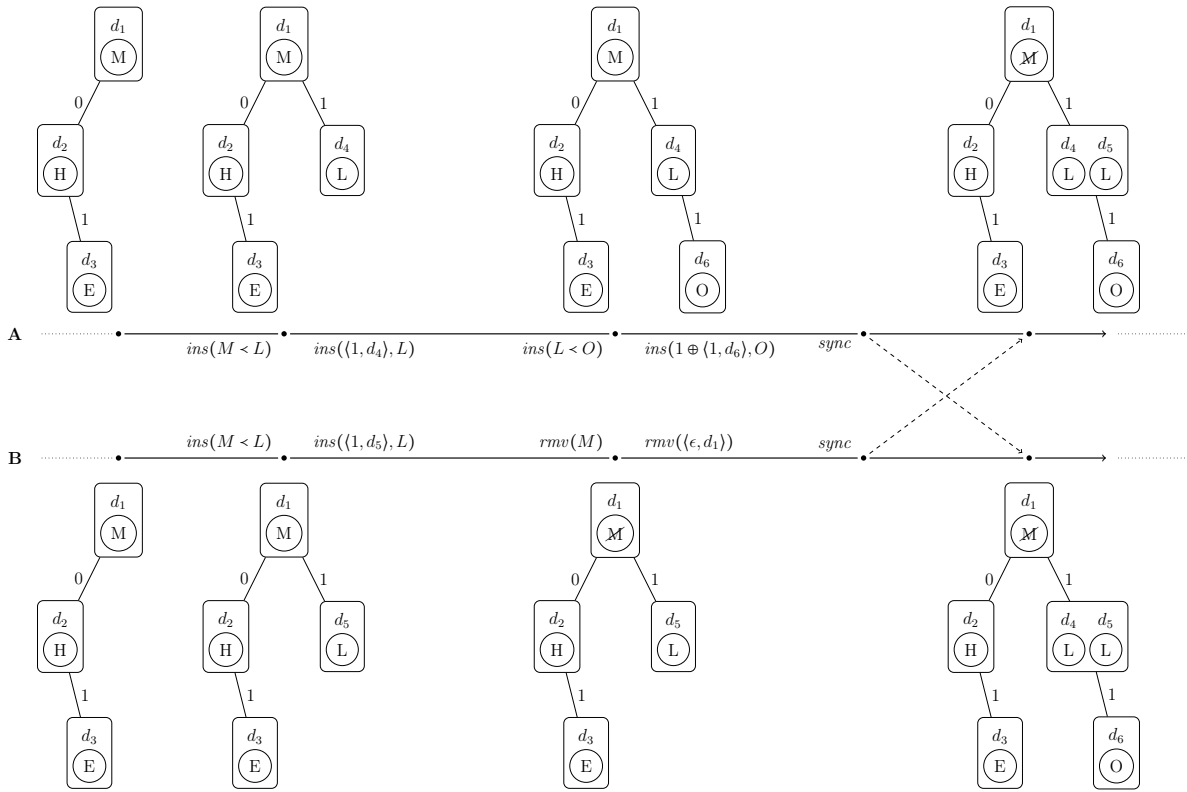


FIGURE 2.19 – Modifications concurrentes d'une séquence répliquée Treedoc

position des éléments et les éléments eux-mêmes. Nous omettons aussi le chemin vide ϵ dans la représentation des identifiants lorsque non-nécessaire.

Dans cet exemple, deux noeuds A et B partagent et éditent collaborativement une séquence répliquée Treedoc. Initialement, ils possèdent le même état : la séquence contient les éléments "HEM".

Le noeud A insère l'élément "L" en fin de séquence, c.-à-d. $insert(M < L)$. Treedoc génère l'opération correspondante, $insert(\langle 1, d_4 \rangle, L)$, et l'intègre à sa copie locale. Puis A insère l'élément "O", toujours en fin de séquence. La modification $insert(L < O)$ est convertie en opération $insert(1 \oplus \langle 1, d_6 \rangle, O)$ et intégrée.

En concurrence, le noeud B insère aussi un élément "L" en fin de séquence. Cette modification résulte en l'opération $insert(\langle 1, d_5 \rangle, L)$, qui est intégrée. Le noeud B supprime ensuite l'élément "M" de la séquence, ce qui produit l'opération $remove(\langle \epsilon, d_1 \rangle)$. Cette dernière est intégrée à sa copie locale. Notons ici que le noeud de l'arbre des identifiants n'est pas supprimé suite à cette opération : l'élément associé est supprimé mais le noeud est conservé et devient une pierre tombale. Nous détaillons ci-après le fonctionnement des pierres tombales dans Treedoc.

Les deux noeuds procèdent ensuite à une synchronisation, échangeant leurs opérations respectives. Lorsque A (resp. B) intègre $insert(\langle 1, d_5 \rangle, L)$ (resp. $insert(\langle 1, d_4 \rangle, L)$), il ajoute cet élément avec son désambiguateur dans son noeud de chemin 1, après (resp. avant) l'élément existant (on considère que $d_4 < d_5$).

B intègre ensuite $insert(1 \oplus \langle 1, d_6 \rangle, O)$. Il existe cependant une ambiguïté sur la position

de "O" : cet élément doit-il être placé après l'élément "L" ayant pour identifiant $\langle 1, d_4 \rangle$, ou l'élément "L" ayant pour identifiant $\langle 1, d_5 \rangle$? Treedoc résout de manière déterministe cette ambiguïté en insérant l'élément en tant qu'enfant droit du noeud 1 et de ses éléments. Ainsi, les noeuds A et B convergent à l'état "HELLO".

Intéressons-nous dorénavant au modèle de livraison requis par Treedoc. Dans [72], les auteurs indiquent reposer sur le modèle de livraison causal. En pratique, nous pouvons néanmoins relaxer le modèle de livraison comme expliqué dans [27] :

Définition 34 (Modèle de livraison Treedoc). Le modèle de livraison Treedoc définit que :

- (i) Une opération doit être livrée exactement une fois à chaque noeud.
- (ii) Les opérations *insert* peuvent être livrées dans un ordre quelconque.
- (iii) L'opération *remove(id)* ne peut être livrée qu'après la livraison de l'opération d'insertion de l'élément associé à *id*.

Treedoc souffre néanmoins de plusieurs limites. Tout d'abord, le mécanisme d'identifiants de positions proposé est couplé à la structure d'arbre binaire. Cependant, les utilisateur-rices ont tendance à écrire de manière séquentielle, c.-à-d. dans le sens d'écriture de la langue utilisée. Les nouveaux identifiants forment donc généralement une liste chaînée, qui déséquilibre l'arbre.

Ensuite, comme illustré dans la figure 2.19, Treedoc ne peut supprimer un noeud de l'arbre des identifiants lorsque ce dernier a des enfants. Ce noeud de l'arbre devient alors une pierre tombale. Comparé à l'approche à pierres tombales, Treedoc a pour avantage que son mécanisme de GC ne repose pas sur la stabilité causale d'opérations. En effet, Treedoc peut supprimer définitivement un noeud de l'arbre binaire des identifiants dès lors que celui-ci est une pierre tombale et une feuille de l'arbre. Ainsi, Treedoc ne nécessite pas de coordination asynchrone avec l'ensemble des noeuds du système pour purger les pierres tombales. Néanmoins, l'évaluation de [72] a montré que les pierres tombales pouvait représenter jusqu'à 95% des noeuds de l'arbre.

Finalement, Treedoc souffre du problème de l'entrelacement d'éléments insérés de manière concurrente, contrairement à ce qui est conjecturé dans [82]. En effet, nous présentons un contre-exemple correspondant dans l'Annexe B.

Logoot

En parallèle à Treedoc [72], WEISS et al. [68] proposent Logoot. Ce CRDT pour le type Séquence repose sur idée similaire à celle de Treedoc : il associe un identifiant de position, provenant d'un espace dense, à chaque élément de la séquence. Ainsi, ces identifiants ont les mêmes propriétés que celles décrites dans la Définition 33.

Les identifiants de position utilisés par Logoot sont spécifiés de manière différente dans [68] et [84]. Dans ce manuscrit, nous nous basons sur la spécification de [84] :

Définition 35 (Identifiant Logoot). Un identifiant Logoot est une liste de tuples Logoot. Les tuples Logoot sont définis de la manière suivante :

Définition 35.1 (Tuple Logoot). Un tuple Logoot est un triplet $\langle pos, nodeId, nodeSeq \rangle$ avec

- (i) pos , un entier représentant la position relative du tuple dans l'espace dense.
- (ii) $nodeId$, l'identifiant du noeud auteur de l'élément.
- (iii) $nodeSeq$, le numéro de séquence courant du noeud auteur de l'élément.

Dans le cadre de cette section, nous nous basons sur cette dernière spécification. Nous utiliserons la notation suivante $pos^{nodeId seq}$ pour représenter un tuple Logoot. Sans perdre en généralité, nous utiliserons des lettres minuscules comme valeurs pour pos , des lettres majuscules pour $nodeId$ et des entiers naturels pour $nodeSeq$. Par exemple, l'identifiant $\langle \langle i, A, 1 \rangle \langle f, B, 1 \rangle \rangle$ est représenté par $i^{A1}f^{B1}$.

Logoot définit un ordre strict total $<_{id}$ sur les identifiants de position. Cet ordre lui permet de les ordonner les uns par rapport aux autres, et ainsi d'ordonner les éléments associés. Pour définir $<_{id}$, Logoot se base sur l'ordre lexicographique.

Définition 36 (Relation $<_{id}$). Étant donné deux identifiants $id = t_1 \oplus t_2 \oplus \dots \oplus t_n$ et $id' = t'_1 \oplus t'_2 \oplus \dots \oplus t'_m$, nous avons :

$$id <_{id} id' \quad \text{iff} \quad (n < m \wedge \forall i \in [1, n] \cdot t_i = t'_i) \quad \vee \\ (\exists j \leq m \cdot \forall i < j \cdot t_i = t'_i \wedge t_j <_t t'_j)$$

avec $<_t$ défini de la manière suivante :

Définition 36.1 (Relation $<_t$). Étant donné deux tuples $t = \langle pos, nodeId, nodeSeq \rangle$ et $t' = \langle pos', nodeId', nodeSeq' \rangle$, nous avons :

$$t <_t t' \quad \text{iff} \quad (pos < pos') \quad \vee \\ (pos = pos' \wedge nodeId < nodeId') \quad \vee \\ (pos = pos' \wedge nodeId = nodeId' \wedge nodeSeq < nodeSeq')$$

Logoot spécifie une fonction `generateId`. Cette fonction permet de générer un nouvel identifiant de position, id , entre deux identifiants donnés, $predId$ et $succId$, tel que $predId <_{id} id <_{id} succId$. Plusieurs algorithmes peuvent être utilisés pour cela. Notamment, [68] présente un algorithme permettant de générer N identifiants de manière aléatoire entre des identifiants $predId$ et $succId$, mais reposant sur une représentation efficace des tuples en mémoire. Par souci de simplicité, nous présentons dans Algorithme 1 un algorithme naïf pour `generateId`.

Pour illustrer cet algorithme, considérons son exécution avec :

- (i) $predId = e^{A1}$, $nextId = m^{B1}$, $nodeId = C$ et $nodeSeq = 1$. `generateId` commence par déterminer où fini le préfixe commun entre les deux identifiants. Dans cet exemple, $predId$ et $succId$ n'ont aucun préfixe commun, c.-à-d. $common = \emptyset$. `generateId` compare donc les valeurs de pos de leur premier tuple respectifs, c.-à-d. e et m , pour déterminer si un nouvel identifiant de taille 1 peut être inséré dans cet intervalle. S'agissant du cas ici, `generateId` choisit une valeur aléatoire dans $]e, m[$, e.g. l , et renvoie un identifiant composé de cette valeur pour pos et des valeurs de $nodeId$ et $nodeSeq$, c.-à-d. $id = l^{C1}$ (lignes 8-10).

Algorithme 1 Algorithme de génération d'un nouvel identifiant

```

1: function GENERATEID(predId ∈ ℤ, succId ∈ ℤ, nodeId ∈ ℕ, nodeSeq ∈ ℕ*) : ℤ
    ▷ precondition : predId <id succId
2:   if succId = predId ⊕ ⟨posj, nodeIdj, nodeSeqj⟩ ⊕ ⋯ then
    ▷ predId is a prefix of succId
3:     pos ← random ∈ ]⊥ℕ, posj[
4:     id ← predId ⊕ ⟨pos, nodeId, nodeSeq⟩
5:   else if predId = common ⊕ ⟨posi, nodeIdi, nodeSeqi⟩ ⊕ ⋯ ∧
     succId = common ⊕ ⟨posj, nodeIdj, nodeSeqj⟩ ⊕ ⋯ ∧
     posj - posi ≤ 1
    then
    ▷ Not enough space between predId and succId
    ▷ to insert new id with same length
    ▷ common may be empty
6:     pos ← random ∈ ]posi+1, ⊤ℕ]
7:     id ← common ⊕ ⟨posi, nodeIdi, nodeSeqi⟩ ⊕ ⟨pos, nodeId, nodeSeq⟩
8:   else
    ▷ predId = common ⊕ ⟨posi, nodeIdi, nodeSeqi⟩ ⊕ ⋯ ∧
    ▷ succId = common ⊕ ⟨posj, nodeIdj, nodeSeqj⟩ ⊕ ⋯ ∧
    ▷ posj - posi > 1
    ▷ common may be empty
9:     pos ← random ∈ ]posi, posj[
10:    id ← common ⊕ ⟨pos, nodeId, nodeSeq⟩
11:  end if
12:  return id
    ▷ postcondition : predId <id id <id succId
13: end function
    
```

- (ii) $predId = i^{A1} f^{A2}$, $succId = i^{A1} g^{B1}$, $nodeId = C$ et $nodeSeq = 1$. De manière similaire à précédemment, `generateId` détermine le préfixe commun entre $predId$ et $succId$. Ici, $common = i^{A1}$. `generateId` compare ensuite les valeurs de pos de leur second tuple respectifs, c.-à-d. f et g , pour déterminer si un nouvel identifiant de taille 2 peut être inséré dans cet intervalle. Ce n'est point le cas ici, `generateId` doit donc recopier le second tuple de $predId$ pour former id et y concaténer un nouveau tuple. Pour générer ce nouveau tuple, `generateId` choisit une valeur aléatoire entre la valeur de pos du troisième tuple de $predId$ et la valeur maximale notée $\top_{\mathbb{N}}$. $predId$ n'ayant pas de troisième tuple, `generateId` utilise la valeur minimale pour pos , $\perp_{\mathbb{N}}$. `generateId` choisit donc une valeur aléatoire dans $]\perp_{\mathbb{N}}, \top_{\mathbb{N}}]$ ²¹, e.g. m , et renvoie un identifiant composé du préfixe commun, du tuple suivant de $predId$ et d'un tuple formé à partir de cette valeur pour pos et des valeurs de $nodeId$ et $nodeSeq$, c.-à-d. $id = i^{A1} f^{A2} m^{C1}$ (lignes 5-7).

Comme pour Treedoc, l'utilisation d'identifiants de position permet de redéfinir les modifications :

- (i) $insert(pred < elt < succ)$ devient alors $insert(id, elt)$, avec $predId <_{id} id <_{id} succId$.
- (ii) $remove(elt)$ devient $remove(id)$.

Les auteurs proposent ainsi une séquence répliquée avec des opérations concurrentes qui

21. Il est important d'exclure $\perp_{\mathbb{N}}$ des valeurs possibles pour pos du dernier tuple d'un identifiant id afin de garantir que l'espace reste dense, notamment pour garantir qu'un noeud sera toujours en mesure de générer un nouvel identifiant id' tel que $id' <_{id} id$.

commutent.

Nous illustrons cela à l'aide de la figure 2.20.

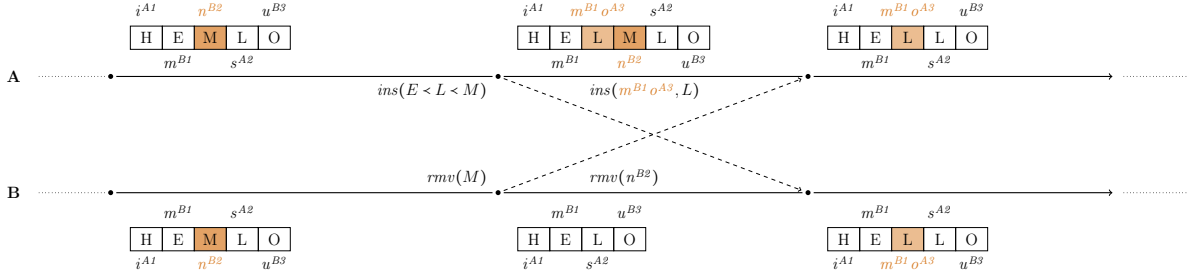


FIGURE 2.20 – Modifications concurrentes d'une séquence répliquée Logoot

Dans cet exemple, deux noeuds A et B partagent et éditent collaborativement une séquence répliquée Logoot. Les deux noeuds possèdent le même état initial : une séquence contenant les éléments "HEMLO", avec leur identifiants respectifs.

Le noeud A insère l'élément "L" entre les éléments "E" et "M", c.-à-d. $insert(E < L < M)$. Logoot doit alors associer à cet élément un identifiant id tel que $m^{B1} < id < n^{B2}$. Dans cet exemple, Logoot choisit l'identifiant $m^{B1} o^{A3}$. L'opération correspondante à l'insertion, $insert(m^{B1} o^{A3}, L)$, est générée, intégrée à la copie locale et diffusée.

En concurrence, le noeud B supprime l'élément "M" de la séquence. Logoot retrouve l'identifiant de cet élément, n^{B2} et produit l'opération $remove(n^{B2})$. Cette dernière est intégrée à sa copie locale et diffusée.

À la réception de l'opération $remove(n^{B2})$, le noeud A parcourt sa copie locale. Il identifie l'élément possédant cet identifiant, "M", et le supprime de sa séquence. De son côté, le noeud B reçoit l'opération $insert(m^{B1} o^{A3}, L)$. Il parcourt sa copie locale jusqu'à trouver un identifiant supérieur à celui de l'opération : s^{B2} . Il insère alors l'élément reçu avant ce dernier. Les noeuds convergent alors à l'état "HELLO".

Concernant le modèle de livraison de Logoot, [68] indique se reposer sur le modèle de livraison causal. Nous constatons cependant que nous pouvons proposer un modèle de livraison moins contraint :

Définition 37 (Modèle de livraison Logoot). Le modèle de livraison Logoot définit que :

- (i) Une opération doit être livrée exactement une fois à chaque noeud.
- (ii) Les opérations $insert$ peuvent être livrées dans un ordre quelconque.
- (iii) L'opération $remove(id)$ ne peut être livrée qu'après la livraison de l'opération d'insertion de l'élément associé à id .

Ainsi, Logoot peut adopter le même modèle de livraison que Treedoc, comme indiqué dans [27].

En contrepartie, Logoot souffre d'un problème de croissance de la taille des identifiants. Comme mis en lumière dans la figure 2.20, Logoot génère des identifiants composés de plus en plus de tuples au fur et à mesure que l'espace des identifiants pour une taille donnée se sature. La croissance des identifiants a cependant plusieurs impacts négatifs :

- (i) Les identifiants sont stockés au sein de la séquence répliquée. Leur croissance augmente donc le surcoût en métadonnées du CRDT.
- (ii) Les identifiants sont diffusés sur le réseau par le biais des opérations. Leur croissance augmente donc le surcoût en bande-passante du CRDT.
- (iii) Les identifiants sont comparés entre eux lors de l'intégration des opérations. Leur croissance augmente donc le surcoût en calculs du CRDT.

Un objectif de l'algorithme `generateId` est donc de limiter le plus possible la vitesse de croissance des identifiants.

Plusieurs extensions furent proposées pour Logoot. WEISS et al. [84] proposent une nouvelle stratégie d'allocation des identifiants pour `generateId`. Cette stratégie consiste à limiter la distance entre deux identifiants insérés au cours de la même modification `insert`, au lieu des les répartir de manière aléatoire entre `predId` et `succId`. Ceci permet de regrouper les identifiants des éléments insérés par une même modification et de laisser plus d'espace pour les insertions suivantes. Les expérimentations présentées montrent que cette stratégie permet de ralentir la croissance des identifiants en fonction du nombre d'insertions. Ce résultat est confirmé par la suite dans [74]. Ainsi, en réduisant la vitesse de croissance des identifiants, ce nouvel algorithme permet de réduire le surcoût en métadonnées, calculs et bande-passante du CRDT.

Toujours dans [84], les auteurs introduisent *Logoot-Undo*, une version de Logoot dotée d'un mécanisme d'annulation des modifications. Ce mécanisme prend la forme d'une nouvelle modification, `undo`, qui permet d'annuler l'effet d'une ou plusieurs modifications passées. Cette modification, et l'opération en résultant, est spécifiée de manière à être commutative avec toutes autres opérations concurrentes, c.-à-d. `insert`, `remove` et `undo` elle-même.

Pour définir `undo`, une notion de *degré de visibilité* d'un élément est introduite. Elle permet à Logoot-Undo de déterminer si l'élément doit être affiché ou non. Pour cela, Logoot-Undo maintient une structure auxiliaire, le *Cimetière*, qui référence les identifiants des éléments dont le degré est inférieur à 0^{22} . Ainsi, Logoot-Undo ne référence qu'un nombre réduit de pierres tombales. Qui plus est, ces pierres tombales sont stockées en dehors de la structure représentant la séquence et n'impactent donc pas les performances des modifications ultérieures.

De plus, il convient de noter que l'ajout du degré de visibilité des éléments permet de rendre commutatives l'opération `insert` avec l'opération `remove` d'un même élément. Ainsi, Logoot-Undo ne nécessite pour son modèle de livraison qu'une *livraison en exactement un exemplaire à chaque noeud*.

Finalement, ANDRÉ et al. [26] introduisent *LogootSplit*. Reprenant les idées introduites par [81], ce travail présente un mécanisme d'aggrégation dynamiques des éléments en blocs. Ceci permet de réduire la granularité des éléments stockés dans la séquence, et ainsi de réduire le surcoût en métadonnées, calculs et bande-passante du CRDT. Nous utilisons ce CRDT pour le type Séquence comme base pour les travaux présentés dans ce manuscrit. Nous dédions donc la section 2.4 à sa présentation en détails.

22. Nous pouvons dès lors inférer le degré des identifiants restants en fonction de s'ils se trouvent dans la séquence (1) ou s'ils sont absents à la fois de la séquence et du cimetière (0).

2.3.3 Synthèse

Depuis l'introduction des CRDTs, deux approches différentes pour la résolution de conflits ont été proposées pour le type Séquence : l'*approche basée sur des pierres tombales* et l'*approche basée à identifiants densément ordonnés*. Chacune de ces approches visent à permettre l'édition concurrente tout en minimisant le surcoût du type de données répliquées, que ce soit d'un point de vue métadonnées, calculs et bande-passante. Au fil des années, chacune de ces approches a été raffinée avec de nouveaux CRDTs de plus en plus efficaces.

Cependant, une faiblesse de la littérature est à notre sens le couplage entre mécanismes de résolution de conflits et choix d'implémentations : plusieurs travaux [72, 68, 26, 80] ne séparent pas l'approche proposée pour rendre les modifications concurrentes commutatives des structures de données et algorithmes choisis pour représenter et manipuler la séquence et les identifiants, e.g. tableau dynamique, liste chaînée, liste chaînée + table de hachage + arbre binaire de recherche... Il en découle que les évaluations proposées par la communauté comparent au final des efforts d'implémentations plutôt que les approches elles-mêmes. En conséquence, la littérature ne permet pas d'établir la supériorité d'une approche sur l'autre.

Nous conjecturons que le surcoût des pierres tombales et le surcoût des identifiants densément ordonnés ne sont que les facettes d'une même pièce, c.-à-d. le surcoût inhérent à un mécanisme de résolution de conflits pour le type Séquence répliquée. Ce surcoût s'exprime sous la forme de compromis différents selon l'approche choisie. Nous proposons donc une comparaison de ces approches se focalisant sur leurs différences pour indiquer plus clairement le compromis que chacune d'entre elle propose.

La principale différence entre les deux approches porte sur les identifiants. Chaque approche repose sur des identifiants attachés aux éléments, mais leurs rôles et utilisations diffèrent :

- (i) Dans l'approche à pierres tombales, les identifiants servent à référencer de manière unique et immuable les éléments, c.-à-d. de manière indépendante de leur index courant. Ils sont aussi utilisés pour ordonner les éléments insérés de manière concurrente à une même position.
- (ii) Dans l'approche à identifiants densément ordonnés, les identifiants incarnent les positions uniques et immuables des éléments dans un espace dense, avec l'ordre entre les positions des éléments dans cet espace qui correspond avec l'intention des insertions effectuées.

Ainsi, les contraintes qui pèsent sur les identifiants sont différentes. Nous les présentons ci-dessous.

Définition 38 (Propriétés des identifiants dans approche à pierres tombales). Les propriétés que doivent respecter les identifiants dans l'approche à pierres tombales sont les suivantes :

- (i) Chaque identifiant est attribué à un élément de la séquence.
- (ii) Aucune paire d'éléments ne partage le même identifiant.
- (iii) L'identifiant d'un élément est immuable.

- (iv) Il existe un ordre total strict sur les identifiants, $<_{id}$, qui permet d'ordonner les éléments insérés en concurrence à une même position.

Définition 39 (Propriétés des identifiants dans approche à identifiants densément ordonnés). Les propriétés que doivent respecter les identifiants dans l'approche à identifiants densément ordonnés sont les suivantes :

- (i) Chaque identifiant est attribué à un élément de la séquence.
- (ii) Aucune paire d'éléments ne partage le même identifiant.
- (iii) L'identifiant d'un élément est immuable.
- (iv) Il existe un ordre total strict sur les identifiants, $<_{id}$, qui permet d'ordonner les éléments insérés dans la séquence de manière cohérente avec l'ordre souhaité.
- (v) Les identifiants sont tirés d'un ensemble dense.

Les identifiants des deux approches partagent donc les propriétés (i), (ii) et (iii).

Pour respecter les propriétés (i) et (ii), les CRDTs reposent généralement sur des paires $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$ avec :

- (i) $nodeId$, l'identifiant du noeud qui génère l'identifiant. Il est supposé unique.
- (ii) $nodeSeq$, un entier propre au noeud, servant d'horloge logique. Il est incrémenté à chaque génération d'identifiant.

Ainsi, un couple de taille fixe, $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$, permet de respecter la contrainte d'unicité des identifiants.

Le rôle des identifiants diffère entre les approches au niveau des propriétés (iv) et (v) : les identifiants dans l'approche à pierres tombales doivent permettre d'ordonner un élément par rapport aux éléments insérés en concurrence uniquement, tandis que ceux de la seconde approche doivent permettre d'ordonner un élément par rapport à l'ensemble des éléments insérés. Cette nuance se traduit dans la structure des identifiants, notamment leur taille.

Pour ordonner un identifiant par rapport à ceux générés en concurrence, l'approche à pierres tombales peut définir une relation d'ordre total strict sur leur paire $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$ respective, e.g. en se basant sur l'ordre lexicographique. Un élément tiers peut y être ajouté si nécessaire, e.g. RGA et son horloge de Lamport [35]. Ainsi, les identifiants de cette approche peuvent être définis tout en ayant une taille fixe, c.-à-d. un nombre de composants fixe.

D'après (iv), l'approche à identifiants densément ordonnés doit elle définir une relation d'ordre total strict sur l'ensemble de ses identifiants. Il en découle qu'elle doit aussi permettre de générer un nouvel identifiant de position entre deux autres, c.-à-d. la propriété (v). Ainsi, cette propriété requiert de l'ensemble des identifiants d'émuler l'ensemble des réels. La précision étant finie en informatique, la seule approche proposée à notre connaissance pour répondre à ce besoin consiste à permettre à la taille des identifiants de varier et de baser la relation d'ordre $<_{id}$ sur l'ordre lexicographique.

L'augmentation non-bornée de la taille des identifiants se répercute sur plusieurs aspects du surcoût de l'approche à identifiants densément ordonnés :

- (i) Les métadonnées attachées par élément, c.-à-d. le surcoût mémoire.

- (ii) Les métadonnées transmises par message, les identifiants étant intégrés dans les opérations, c.-à-d. le surcoût en bande-passante.
- (iii) Le nombre de comparaisons effectuées lors d'une recherche ou manipulation de la séquence, les identifiants étant comparés pour déterminer où trouver ou placer un élément, c.-à-d. le surcoût en calculs.

En contrepartie, les identifiants densément ordonnés permettent l'intégration chaque élément de manière indépendante des autres. Les identifiants de l'approche à pierres tombales, eux, n'offrent pas cette possibilité puisque la relation d'ordre associée, $<_{id}$, ne correspond pas à l'ordre souhaité des éléments. Pour respecter cet ordre souhaité, l'approche à pierres tombales repose sur l'utilisation du prédécesseur et/ou successeur du nouvel élément inséré. Ce mécanisme implique la nécessité de conserver des pierres tombales dans la séquence, tant qu'elles peuvent être utilisées par une opération encore inconnue, c.-à-d. tant que l'opération de suppression correspondante n'est pas causalement stable.

La présence de pierres tombales dans la séquence impacte aussi plusieurs aspects du surcoût de l'approche à pierres tombales :

- (i) Les métadonnées de la séquence ne dépendent pas de son nombre courant d'éléments, mais du nombre d'insertions effectuées, c.-à-d. le surcoût mémoire.
- (ii) Le nombre de comparaisons effectuées lors d'une recherche ou manipulation de la séquence, les identifiants des pierres tombales étant aussi comparés lors de la recherche ou insertion d'un élément, c.-à-d. le surcoût en calculs.

Pour compléter notre étude de ces approches, intéressons nous au modèle de livraison requis par ces dernières. Contrairement à ce qui peut être conjecturé après une lecture de la littérature, nous notons qu'aucune de ces approches ne requiert de manière intrinsèque une livraison causale de ses opérations. Ces deux approches peuvent donc utiliser des modèles de livraison plus faible que la livraison causale et ne nécessitant pas de vecteurs de versions pour chaque message. Elles sont donc adaptées aux systèmes collaboratifs P2P à large échelle.

Finalement, nous notons que l'ensemble des CRDTs pour le type Séquence proposés souffrent du problème de l'entrelacement présenté dans [82]. Nous conjecturons cependant que les CRDTs pour le type Séquence à pierres tombales sont moins sujets à ce problème. En effet, dans cette approche, l'algorithme d'intégration des nouveaux éléments repose généralement sur l'élément précédent. Ainsi, une séquence d'insertions séquentielles produit une sous-chaîne d'éléments. L'algorithme d'intégration permet ensuite d'intégrer sans entrelacement de telles sous-chaînes générées en concurrence, e.g. dans le cadre de sessions de travail asynchrones. Cependant, il s'agit d'une garantie offerte par l'approche à pierres tombales dont nous ne retrouvons pas d'équivalent dans l'approche à identifiants densément ordonnés. Pour confirmer notre conjecture et évaluer son impact sur l'expérience utilisateur, il conviendrait de mener un ensemble d'expériences utilisateurs dans la lignée de [74, 85, 86].

Nous récapitulons cette discussion dans le tableau 2.2.

Pour la suite de ce manuscrit, nous prenons LogootSplit comme base de travail. Nous détaillons donc son fonctionnement dans la section suivante.

TABLE 2.2 – Récapitulatif comparatif des différents approches pour CRDTs pour le type Séquence

	Pierres tombales	Identifiants densément ordonnés
Performances en fct. de la taille de la séq.	✗	✗
Identifiants de taille fixe	✓	✗
Taille des messages fixe	✓	✗
Éléments réellement supprimés de la séq.	✗	✓
Livraison causale non-nécessaire	✓	✓
Sujet à l’entrelacement	✓	✓

2.4 LogootSplit

LogootSplit [26] est le dernier CRDT proposé pour le type Séquence qui appartient à l’approche à identifiants densément ordonnés. Ce CRDT propose un mécanisme permettant d’aggréger de manière dynamique des éléments en blocs d’éléments.

L’aggrégation des éléments en blocs offre plusieurs bénéfices. Tout d’abord, elle permet de factoriser les métadonnées des éléments agrégés en un même bloc, ce qui réduit le surcoût en métadonnées du CRDT. Ensuite, la séquence stocke directement les blocs, en place et lieu des éléments, ce qui réduit sa taille et rend sa manipulation plus efficace. Finalement, les blocs permettent de représenter des modifications à l’échelle de plusieurs éléments, ce qui réduit la taille des messages diffusés sur le réseau.

Nous détaillons dans cette section le fonctionnement de LogootSplit.

2.4.1 Identifiants

LogootSplit associe aux éléments des identifiants définis de la manière suivante :

Définition 40 (Identifiant LogootSplit). Un identifiant LogootSplit est une liste de tuples LogootSplit.

avec les tuples LogootSplit définis de la manière suivante :

Définition 41 (Tuple LogootSplit). Un tuple LogootSplit est un quadruplet $\langle pos, nodeId, nodeSeq, offset \rangle$ avec :

- (i) pos , un entier représentant la position relative du tuple dans l’espace dense,
- (ii) $nodeId$, l’identifiant du noeud auteur de l’élément,
- (iii) $nodeSeq$, le numéro de séquence courant du noeud auteur de l’élément.
- (iv) $offset$, la position de l’élément au sein d’un bloc. Nous reviendrons plus en détails sur ce composant dans la sous-section 2.4.2.

Dans ce manuscrit, nous représentons les tuples LogootSplit par le biais de la notation suivante : $position_{offset}^{nodeId\ nodeSeq}$. Sans perdre en généralité, nous utiliserons des lettres minuscules comme valeurs pour pos , des lettres majuscules pour $nodeId$, des entiers naturels pour $nodeSeq$ et des entiers relatifs pour $offset$. Par exemple, nous représentons l’identifiant $\langle \langle i, A, 1, 0 \rangle \langle f, B, 1, 0 \rangle \rangle$ par $i_0^{A1} f_0^{B1}$.

LogootSplit utilise les identifiants de position pour ordonner relativement les éléments les uns par rapport aux autres. LogootSplit définit une relation d'ordre strict total sur les identifiants : $<_{id}$. Cette relation repose sur l'ordre lexicographique.

Définition 42 (Relation $<_{id}$). Étant donné deux identifiants $id = t_1 \oplus t_2 \oplus \dots \oplus t_n$ et $id' = t'_1 \oplus t'_2 \oplus \dots \oplus t'_m$, nous avons :

$$id <_{id} id' \quad \text{iff} \quad (n < m \wedge \forall i \in [1, n] \cdot t_i = t'_i) \quad \vee \\ (\exists j \leq m \cdot \forall i < j \cdot t_i = t'_i \wedge t_j <_t t'_j)$$

avec la relation d'ordre strict total les tuples $<_t$ définie de la manière suivante :

Définition 43 (Relation $<_t$). Étant donné deux tuples $t = \langle pos, nodeId, nodeSeq, offset \rangle$ et $t' = \langle pos', nodeId', nodeSeq', offset' \rangle$, nous avons :

$$t <_t t' \quad \text{iff} \quad (pos < pos') \quad \vee \\ (pos = pos' \wedge nodeId < nodeId') \quad \vee \\ (pos = pos' \wedge nodeId = nodeId' \wedge nodeSeq < nodeSeq') \\ (pos = pos' \wedge nodeId = nodeId' \wedge nodeSeq = nodeSeq' \wedge offset < offset')$$

Par exemple, nous avons :

- (i) $i_0^{A1} <_{id} i_0^{B1}$ car le tuple composant le premier identifiant est inférieur au tuple composant le second identifiant, c.-à-d. $i_0^{A1} <_t i_0^{B1}$.
- (ii) $i_0^{B1} <_{id} i_0^{B1} f_0^{A1}$ car le premier identifiant est un préfixe du second identifiant.

Il est intéressant de noter que le triplet $\langle nodeId, nodeSeq, offset \rangle$ du dernier tuple d'un identifiant permet de l'identifier de manière unique.

2.4.2 Agrégation dynamique d'éléments en blocs

Afin de réduire le surcoût de la séquence, LogootSplit propose d'aggréger de façon dynamique les éléments et leur identifiants dans des blocs. Pour cela, LogootSplit introduit la notion d'intervalle d'identifiants :

Définition 44 (Intervalle d'identifiants). Un intervalle d'identifiants est un couple $\langle idBegin, offsetEnd \rangle$ avec :

- (i) $idBegin$, l'identifiant du premier élément de l'intervalle.
- (ii) $offsetEnd$, l'offset du dernier tuple du dernier identifiant de l'intervalle.

Les intervalles d'identifiants permettent à LogootSplit d'assigner logiquement un identifiant à un ensemble d'éléments, tout en ne stockant de manière effective que l'identifiant de son premier élément et l'offset du dernier tuple de l'identifiant de son dernier élément.

LogootSplit regroupe les éléments avec des identifiants *contigus* dans un intervalle.

Définition 45 (Identifiants contigus). Deux identifiants sont contigus si et seulement si les deux identifiants sont identiques à l'exception de leur dernier offset et que leur derniers offsets sont consécutifs.

De manière plus formelle, étant donné deux identifiants $id = t_1 \oplus t_2 \oplus \dots \oplus t_{n-1} \oplus \langle pos, nodeId, nodeSeq, offset \rangle$ et $id' = t'_1 \oplus t'_2 \oplus \dots \oplus t'_{n-1} \oplus \langle pos', nodeId', nodeSeq', offset' \rangle$, nous avons :

$$\begin{aligned} \text{contigus}(id, id') &= (\forall i \in [1, n[\cdot t_i = t'_i) \wedge \\ &\quad (pos = pos' \wedge nodeId = nodeId' \wedge nodeSeq = nodeSeq') \wedge \\ &\quad (offset + 1 = offset' \vee offset - 1 = offset')) \end{aligned}$$

Nous représentons un intervalle d'identifiants à l'aide du formalisme suivant : $position_{begin..end}^{nodeId\ nodeSeq}$ où *begin* est l'offset du premier identifiant de l'intervalle et *end* du dernier.

LogootSplit utilise une structure de données pour associer un intervalle d'identifiants aux éléments correspondants : les blocs.

Définition 46 (Bloc). Un bloc est un triplet $\langle idInterval, elts, isAppendable \rangle$ avec :

- (i) *idInterval*, l'intervalle d'identifiants associés au bloc.
- (ii) *elts*, les éléments contenus dans le bloc.
- (iii) *isAppendable*, un booléen indiquant si l'auteur du bloc peut ajouter de nouveaux éléments en fin de bloc²³.

Nous représentons un exemple de séquence LogootSplit dans la figure 2.21. Dans la Figure 2.21a, les identifiants i_0^{B1} , i_1^{B1} et i_2^{B1} forment une chaîne d'identifiants contigus. LogootSplit est donc capable de regrouper ces éléments en un bloc représentant l'intervalle d'identifiants $i_{0..2}^{B1}$ pour minimiser les métadonnées stockées, comme illustré dans la Figure 2.21b.



(a) Éléments avec leur identifiant correspondant

(b) Éléments regroupés en un bloc

FIGURE 2.21 – Représentation d'une séquence LogootSplit contenant les éléments "HLO"

Au lieu de stocker les éléments directement, une séquence LogootSplit stocke les blocs les contenant²⁴. Ce changement de granularité permet d'améliorer les performances de la structure de données sur plusieurs aspects :

- (i) Elle réduit le nombre d'identifiants stockés au sein de la structure de données. En effet, les identifiants sont désormais conservés à l'échelle des blocs plutôt qu'à l'échelle de chaque élément. Ceci permet de réduire le surcoût en métadonnées du CRDT.

²³. De manière similaire, il est possible de permettre à l'auteur du bloc d'ajouter de nouveaux éléments en début de bloc à l'aide d'un booléen *isPrependable*. Cette fonctionnalité est cependant incompatible avec le mécanisme que nous proposons dans le chapitre 3. Nous faisons donc le choix de la retirer.

²⁴. Par abus de notation, nous représenterons les blocs de taille 1, c.-à-d. ne contenant qu'un seul élément, par des éléments dans nos schémas.

- (ii) L'utilisation de blocs comme niveau de granularité, en lieu et place des éléments, permet de réduire la complexité en temps des manipulations de la structure de données.
- (iii) L'utilisation de blocs permet aussi d'effectuer des modifications à l'échelle de plusieurs éléments, et non plus un par un seulement. Ceci permet de réduire la taille des messages diffusés sur le réseau.

Il est intéressant de noter que la paire $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$ du dernier tuple d'un identifiant permet d'identifier de manière unique la partie commune des identifiants de l'intervalle d'identifiants auquel il appartient. Ainsi, nous pouvons identifier de manière unique un intervalle d'identifiants avec le quadruplet $\langle nodeId, nodeSeq, offsetBegin, offsetEnd \rangle$. Par exemple, l'intervalle d'identifiants $i_1^{B1} f_{2..4}^{A1}$ peut être référencé à l'aide du quadruplet $\langle A, 1, 2, 4 \rangle$.

2.4.3 Modèle de données

En nous basant sur ANDRÉ et al. [26], nous proposons une définition du modèle de données de LogootSplit dans la figure 2.22 :

payload

$S \in Seq\langle IdInterval, Array\langle E \rangle, Bool \rangle$

constructor

empty : $\longrightarrow S$

prepare

insert : $S \times \mathbb{N} \times Array\langle E \rangle \times \mathbb{I} \times \mathbb{N}^* \longrightarrow Id \times Array\langle E \rangle$

remove : $S \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \longrightarrow Array\langle IdInterval \rangle$

effect

insert : $S \times Id \times Array\langle E \rangle \longrightarrow S$

remove : $S \times Array\langle IdInterval \rangle \longrightarrow S$

queries

length : $S \longrightarrow \mathbb{N}$

read : $S \longrightarrow Array\langle E \rangle$

FIGURE 2.22 – Spécification algébrique du type abstrait LogootSplit

Une séquence LogootSplit est une séquence de blocs. Concernant les modifications définies sur le type, nous nous inspirons de [44] et les séparons en deux étapes :

- (i) **prepare**, l'étape qui consiste à générer l'opération correspondant à la modification à partir de l'état courant et de ses éventuels paramètres. Cette étape ne modifie pas l'état.

- (ii) **effect**, l'étape qui consiste à intégrer l'effet d'une opération générée précédemment, par le noeud lui-même ou un autre. Cette étape met à jour l'état à partir des données fournies par l'opération.

La séquence LogootSplit autorise deux types de modifications :

- (i) $insert(s, i, elts, nodeId, nodeSeq)$, abrégée en ins dans nos figures, qui génère l'opération permettant d'insérer les éléments $elts$ dans la séquence s à l'index i . Cette fonction génère et associe un intervalle d'identifiants aux éléments à insérer en utilisant les valeurs pour $nodeId$ et $nodeSeq$ fournies. Elle retourne les données nécessaires pour l'opération $insert$, c.-à-d. le premier identifiant de l'intervalle d'identifiants alloué et les éléments. Par souci de simplicité, nous noterons cette modification $insert(pred < elts < succ)$ et utiliserons l'état courant de la séquence comme valeur pour s , l'identifiant du noeud auteur de la modification comme valeur pour $nodeId$ et le nombre de blocs que le noeud a créé comme valeur pour $nodeSeq$ dans nos exemples.
- (ii) $remove(s, i, nbElts)$, abrégée en rmv dans nos figures, qui génère l'opération permettant de supprimer $nbElts$ dans la séquence s à partir de l'index i . Elle retourne les données nécessaires pour l'opération $remove$, c.-à-d. les intervalles d'identifiants supprimés. Par souci de simplicité, nous noterons cette modifications $remove(elts)$ dans nos exemples.

Nous présentons dans la figure 2.23 un exemple d'utilisation de cette séquence répliquée.

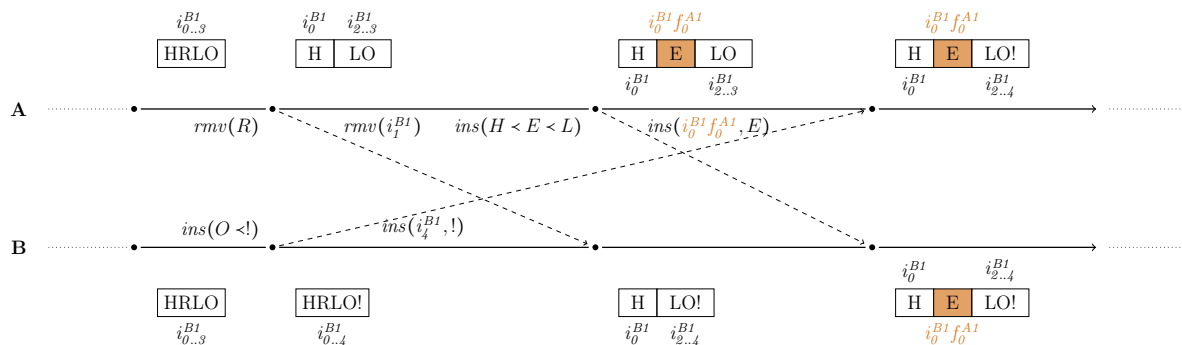


FIGURE 2.23 – Modifications concurrentes d'une séquence répliquée LogootSplit

Dans cet exemple, deux noeuds A et B répliquent et éditent collaborativement un document texte en utilisant LogootSplit. Ils partagent initialement le même état : une séquence composée d'un seul bloc associant les identifiants $i_{0..3}^{B1}$ aux éléments "HRLO". Les noeuds se mettent ensuite à éditer le document.

Le noeud A commence par supprimer l'élément "R" de la séquence. LogootSplit génère l'opération $remove$ correspondante en utilisant l'identifiant de l'élément supprimé : i_1^{B1} . Cette opération est intégrée à sa copie locale et envoyée au noeud B pour qu'il intègre cette modification à son tour.

Le noeud A insère ensuite l'élément "E" dans la séquence entre les éléments "H" et "L". Le noeud A doit alors générer un identifiant id à associer à ce nouvel élément

respectant la contrainte suivante :

$$i_0^{B1} <_{id} id <_{id} i_2^{B1}$$

L'espace des identifiants de taille 1 étant saturé entre ces deux identifiants, A génère id en reprenant le premier tuple de l'identifiant du prédécesseur et en y concaténant un nouveau tuple : $id = i_0^{B1} \oplus f_0^{A1}$. LogootSplit génère l'opération $insert$ correspondante, indiquant l'élément à insérer et sa position grâce à son identifiant. Il intègre cette opération et la diffuse sur le réseau.

En parallèle, le noeud B insère l'élément "!" en fin de la séquence. Comme le noeud B est l'auteur du bloc $i_{0..3}^{B1}$, il peut y ajouter de nouveaux éléments. B associe donc l'identifiant i_4^{B1} à l'élément "!" pour l'ajouter au bloc existant. Il génère l'opération $insert$ correspondante, l'intègre puis la diffuse.

Les noeuds se synchronisent ensuite. Le noeud A reçoit l'opération $insert(i_4^{B1}, L)$. Le noeud A détermine que cet élément doit être inséré à la fin de la séquence, puisque $i_3^{B1} <_{id} i_4^{B1}$. Ces deux identifiants étant contigus, il ajoute cet élément au bloc existant.

De son côté, le noeud B reçoit tout d'abord l'opération $remove(i_1^{B1})$. Le noeud B supprime donc l'élément correspondant de son état, "R".

Il reçoit ensuite l'opération $insert(i_0^{B1} f_0^{A1}, E)$. Le noeud B insère cet élément entre les éléments "H" et "L", puisqu'on a :

$$i_1^{B1} <_{id} i_0^{B1} f_0^{A1} <_{id} i_2^{B1}$$

L'intention de chaque noeud est donc préservée et les copies convergent.

2.4.4 Modèle de livraison

Afin de garantir son bon fonctionnement, LogootSplit doit être associé à une couche de livraison de messages. Cette couche de livraison doit respecter un modèle de livraison adapté, c.-à-d. offrir des garanties sur l'ordre de livraison des opérations. Dans cette section, nous présentons des exemples d'exécutions en l'absence de modèle de livraison pour illustrer la nécessité de ces différentes garanties.

Livraison des opérations en exactement un exemplaire

Ce premier exemple, représenté par la figure 2.24, a pour but d'illustrer la nécessité de la propriété de livraison en *exactement un exemplaire* des opérations.

Dans cet exemple, deux noeuds A et B répliquent et éditent collaborativement une séquence. La séquence répliquée contient initialement les éléments "WOLD", qui sont associés à l'intervalle d'identifiants $p_{0..3}^{A1}$.

Le noeud A commence par insérer l'élément "R" dans la séquence entre les éléments "O" et "L". A intègre l'opération résultante, $insert(p_1^{A1} m_0^{A2}, R)$ puis la diffuse au noeud B.

À la réception de l'opération $insert$, le noeud B l'intègre à son état. Puis il supprime dans la foulée l'élément "R" nouvellement inséré. B intègre l'opération $remove(p_1^{A1} m_0^{A2})$ puis l'envoie au noeud A.

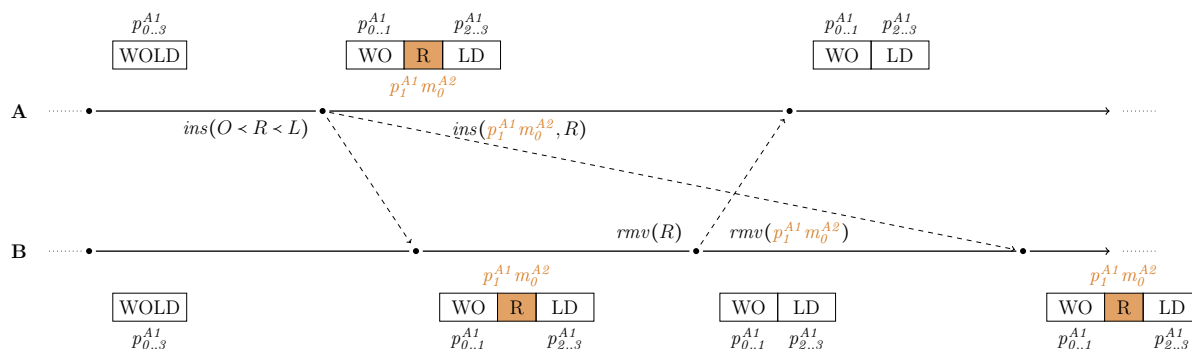


FIGURE 2.24 – Résurgence d'un élément supprimé suite à la relivraison de son opération *insert*

Le noeud A intègre l'opération *remove*, ce qui a pour effet de supprimer l'élément "R" associé à l'identifiant $p_1^{A1} m_0^{A2}$. Il obtient alors un état équivalent à celui du noeud B.

Cependant, l'opération *insert* insérant l'élément "R" à la position $p_1^{A1} m_0^{A2}$ est de nouveau envoyée au noeud B. De multiples raisons peuvent être à l'origine de ce nouvel envoi : perte du message d'*acknowledgment*, utilisation d'un protocole de diffusion épidémique des messages, déclenchement du mécanisme d'anti-entropie en concurrence... Le noeud B ré-intègre alors l'opération *insert*, ce qui fait revenir l'élément "R" et l'identifiant associé. L'état du noeud B diverge désormais de celui-ci du noeud A.

Pour se prémunir de ce type de scénarios, LogootSplit requiert que la couche de livraison des messages assure une livraison en exactement un exemplaire des opérations. Cette contrainte permet d'éviter que d'anciens éléments et identifiants ressurgissent après leur suppression chez certains noeuds uniquement à cause d'une livraison multiple de l'opération *insert* correspondante.

Livraison de l'opération *remove* après les opérations *insert* correspondantes

La figure 2.25 présente un second exemple illustrant la nécessité de la contrainte de livraison d'une opération *remove* qu'après la livraison des opérations *insert* correspondantes.

Dans cet exemple, trois noeuds A, B et C répliquent et éditent collaborativement une séquence. La séquence répliquée contient initialement les éléments "WORLD", qui sont associés à l'intervalle d'identifiants $p_{0..3}^{A1}$.

Le noeud A commence par insérer l'élément "R" dans la séquence entre les éléments "O" et "L". A intègre l'opération résultante, $insert(p_1^{A1} m_0^{A2}, R)$ puis la diffuse.

À la réception de l'opération *insert*, le noeud B l'intègre à son état. Puis il supprime dans la foulée l'élément "R" nouvellement inséré. B intègre l'opération $remove(p_1^{A1} m_0^{A2})$ puis la diffuse.

Toutefois, suite à un aléa du réseau, l'opération *remove* supprimant l'élément "R" est reçue par le noeud C en première. Ainsi, le noeud C intègre cette opération : il parcourt son état à la recherche de l'élément "R" pour le supprimer. Celui-ci n'est pas présent dans son état courant, l'intégration de l'opération s'achève sans effectuer de modification.

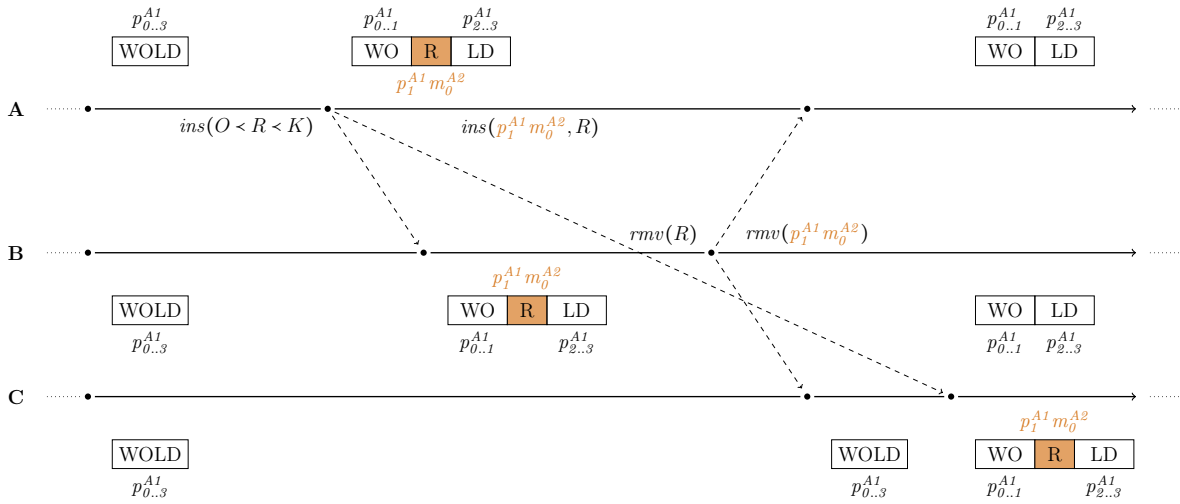


FIGURE 2.25 – Non-effet de l'opération *remove* car reçue avant l'opération *insert* correspondante

Le noeud C reçoit ensuite l'opération *insert*. Le noeud C intègre ce nouvel élément dans la séquence en utilisant son identifiant.

Nous constatons alors que l'état à terme du noeud C diverge de celui des noeuds A et B, et cela malgré que les noeuds A, B et C aient intégré le même ensemble d'opérations. Ce résultat transgresse la propriété Cohérence forte à terme (SEC) [19] que doivent assurer les CRDTs. Afin d'empêcher ce scénario de se produire, LogootSplit impose donc la livraison causale des opérations *remove* par rapport aux opérations *insert* correspondantes.

Définition du modèle de livraison

Pour résumer, la couche de livraison des opérations associée à LogootSplit doit respecter le modèle de livraison suivant :

Définition 47 (Modèle de livraison LogootSplit). Le modèle de livraison LogootSplit définit que :

- (i) Une opération doit être livrée exactement une fois à chaque noeud.
- (ii) Les opérations *insert* peuvent être livrées dans un ordre quelconque.
- (iii) L'opération $remove(idIntervals)$ ne peut être livrée qu'après la livraison des opérations d'insertions des éléments formant les $idIntervals$.

Il est à noter que ELVINGER [27] a récemment proposé dans ses travaux de thèse Dotted LogootSplit, un nouveau CRDT pour le type Séquence dont la synchronisation est basée sur les différences d'états. Inspiré de Logoot et LogootSplit, ce nouveau CRDT associe une séquence à identifiants densément ordonnés à un contexte causal. Le contexte causal est une structure de données permettant à Dotted LogootSplit de représenter et de maintenir efficacement les informations des modifications déjà intégrées à l'état courant. Cette association permet à Dotted LogootSplit de fonctionner de manière autonome, sans imposer de contraintes particulières à la couche livraison autres que la livraison à terme.

2.4.5 Limites de LogootSplit

Intéressons-nous désormais aux limites de LogootSplit. Nous en identifions deux que nous détaillons ci-dessous : la croissance non-bornée de la taille des identifiants, et la fragmentation de la séquence en blocs courts.

Croissance non-bornée de la taille des identifiants

La première limite de ce CRDT, héritée de l'approche auquel il appartient, est la taille non-bornée de ses identifiants de position. Comme indiqué précédemment, LogootSplit génère des identifiants composés de plus en plus de tuples au fur et à mesure que l'espace dense des identifiants se sature.

Cependant, LogootSplit introduit un mécanisme favorisant la croissance des identifiants : les intervalles d'identifiants. Considérons l'exemple présenté dans la figure 2.26.

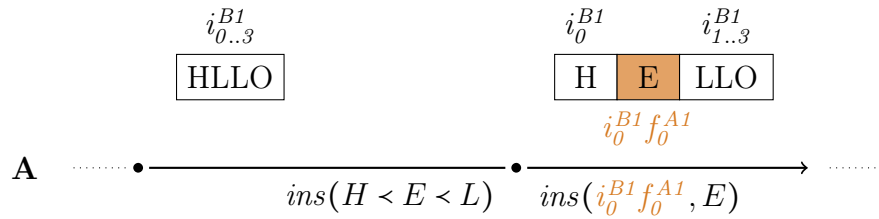


FIGURE 2.26 – Insertion menant à une augmentation de la taille des identifiants

Dans cet exemple, le noeud A insère un nouvel élément dans un intervalle d'identifiants existant, c.-à-d. entre deux identifiants contigus : i_0^{B1} et i_1^{B1} . Ces deux identifiants étant contigus, il n'est pas possible de générer id , un identifiant de même taille tel que $i_0^{B1} <_{id} id <_{id} i_1^{B1}$. Pour respecter l'ordre souhaité, LogootSplit génère donc un identifiant à partir de l'identifiant du prédecesseur et en y ajoutant un nouveau tuple, e.g. $i_0^{B1} f_0^{A1}$.

Par conséquent, la taille des identifiants croît à chaque fois qu'un intervalle d'identifiants est scindé. Comme présenté précédemment (cf. sous-section 2.3.3, page 50), cette croissance augmente le surcoût en métadonnées, en calculs et en bande-passante du CRDT.

Fragmentation de la séquence en blocs courts

La seconde limite de LogootSplit est la fragmentation de l'état en une multitude de blocs courts. En effet, plusieurs contraintes sur la génération d'identifiants empêchent les noeuds d'ajouter des nouveaux éléments aux blocs existants :

Définition 48 (Contraintes sur l'ajout d'éléments à un bloc existant). L'ajout d'éléments à un bloc existant doit respecter les règles suivantes :

- (i) Seul le noeud qui a généré l'intervalle d'identifiants du bloc, c.-à-d. qui est l'auteur du bloc, peut ajouter des éléments à ce dernier.
- (ii) L'ajout d'éléments à un bloc ne peut se faire qu'à la fin de ce dernier.
- (iii) La suppression du dernier élément d'un bloc interdit tout ajout futur à ce bloc.

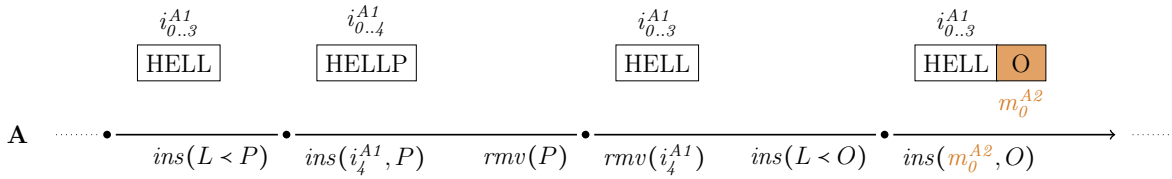


FIGURE 2.27 – Insertion menant à une augmentation de la taille des identifiants

La figure 2.27 illustre ces règles.

Ainsi, ces limitations conduisent à la génération de nouveau blocs au fur et à mesure de la manipulation de la séquence. Nous conjecturons que, dans un cadre d'utilisation standard, la séquence est à terme fragmentée en de nombreux blocs de seulement quelques caractères chacun. Les blocs étant le niveau de granularité de la séquence, chaque nouveau bloc entraîne un surcoût en métadonnées et en calculs. Cependant, aucun mécanisme pour fusionner les blocs *a posteriori* n'est proposé. L'efficacité de la structure décroît donc au fur et à mesure que l'état se fragmente.

Synthèse

Les performances d'une séquence LogootSplit diminuent au fur et à mesure que celle-ci est manipulée et que des modifications sont effectuées dessus. Cette perte d'efficacité est due à la taille des identifiants de position qui croît de manière non-bornée, ainsi qu'au nombre généralement croissant de blocs.

Initialement, nous nous sommes focalisés sur un aspect du problème : la croissance du surcoût en métadonnées de la structure. Afin de quantifier ce problème, nous avons évalué par le biais de simulations²⁵ l'évolution de la taille de la séquence. La figure 2.28 présente le résultat obtenu.

Sur cette figure, nous représentons l'évolution de la taille en mémoire d'une séquence au fur et à mesure que des modifications sont effectuées sur cette dernière. Les mesures de la taille de la séquence sont effectuées toutes les 10k modifications. À partir des résultats obtenus, nous présentons les courbes suivantes :

- (i) La courbe pointillée bleu représente la taille du contenu. Ainsi, elle correspond à la taille en mémoire nécessaire pour stocker les éléments en utilisant le type Séquence séquentiel.
- (ii) La courbe continue rouge représente la taille en mémoire de la séquence LogootSplit complète, c.-à-d. la taille de son contenu et de ses métadonnées (identifiants, blocs...).

Nous constatons dès notre première mesure, c.-à-d. dès les 10k premières modifications effectuées, que le contenu ne représente plus que 1% de taille de la structure de données. Les 99% restants correspondent aux métadonnées utilisées par la séquence répliquée, c.-à-d. la taille des identifiants, les blocs composant la séquence LogootSplit, mais aussi la structure de données utilisée en interne pour représenter la séquence de manière efficace.

²⁵. Nous détaillons le protocole expérimental que nous avons défini pour ces simulations dans le chapitre 3.

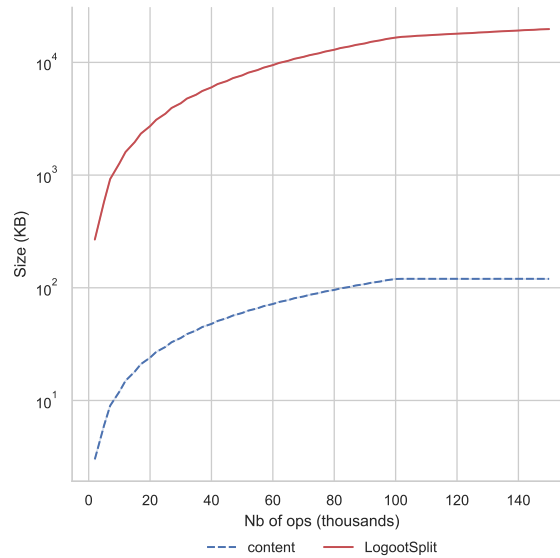


FIGURE 2.28 – Taille du contenu comparé à la taille de la séquence LogootSplit

Nous jugeons donc nécessaire de proposer des mécanismes et techniques afin de mitiger le surcoût des CRDTs pour le type Séquence et sa croissance.

2.5 Mitigation du surcoût des séquences répliquées sans conflits

L'augmentation du surcoût des CRDTs pour le type Séquence, qu'il soit dû à des pierres tombales ou à des identifiants de taille non-bornée, est un problème bien identifié dans la littérature [71, 72, 20, 21, 87, 88]. Plusieurs approches ont donc été proposées pour réduire sa croissance.

2.5.1 Mécanisme de Garbage Collection des pierres tombales

Pour réduire l'impact des pierres tombales sur les performances de RGA, [71] propose un mécanisme de Garbage Collection (GC) des pierres tombales. Pour rappel, ce mécanisme nécessite qu'une pierre tombale ne puisse plus être utilisée comme prédecesseur par une opération *insert* reçue dans le futur pour pouvoir être supprimée définitivement. En d'autres termes, ce mécanisme repose sur la stabilité causale de l'opération de suppression pour supprimer la pierre tombale correspondante.

La stabilité causale est une contrainte forte, peu adaptée aux systèmes P2P dynamiques à large échelle. Notamment, la stabilité causale nécessite que chaque noeud du système fournisse régulièrement des informations sur son avancée, c.-à-d. quelles opérations il a intégré, pour progresser. Ainsi, il suffit qu'un noeud du système se déconnecte pour bloquer la stabilité causale, ce qui apparaît extrêmement fréquent dans le cadre d'un système P2P dynamique dans lequel nous n'avons pas de contrôle sur les noeuds.

À notre connaissance, il s'agit du seul mécanisme proposé pour l'approche à pierres tombales.

2.5.2 Ré-équilibrage de l'arbre des identifiants de position

Concernant l'approche à identifiants densément ordonnés, LETIA et al. [20] puis ZAWIRSKI et al. [21] proposent un mécanisme de ré-équilibrage de l'arbre des identifiants de position pour Treedoc [72]. Pour rappel, Treedoc souffre des problèmes suivants :

- (i) Le déséquilibre de son arbre des identifiants de position si les insertions sont effectuées de manière séquentielle à une position.
- (ii) La présence de pierres tombales dans son arbre des identifiants de position lorsque des identifiants correspondants à des noeuds intermédiaires de l'arbre sont supprimés.

Pour répondre à ces problèmes, les auteurs présentent un mécanisme de ré-équilibrage de l'arbre supprimant par la même occasion les pierres tombales existantes, c.-à-d. un mécanisme réattribuant de nouveaux identifiants de position aux éléments encore présents. Ce mécanisme prend la forme d'une nouvelle opération, que nous notons *rebalance*.

Notons que l'opération *rebalance* contrevient à une des propriétés des identifiants de position densément ordonnés : leur *immuabilité* (cf. Définition 39, page 51). L'opération *rebalance* est donc intrinséquement non-commutative avec les opérations *insert* et *remove* concurrentes. Pour assurer la cohérence à terme des copies, les auteurs mettent en place un mécanisme de *catch-up*. Ce mécanisme consiste à transformer les opérations concurrentes aux opérations *rebalance* avant de les intégrer, de façon à prendre en compte les effets des ré-équilibrages.

Toutefois, l'opération *rebalance* n'est pas non plus commutative avec elle-même. Cette approche nécessite d'empêcher la génération d'opérations *rebalance* concurrentes. Pour cela, les auteurs proposent de reposer sur un protocole de consensus entre les noeuds pour la génération d'opérations *rebalance*.

De nouveau, l'utilisation d'un protocole de consensus est une contrainte forte, peu adaptée aux systèmes P2P dynamique à large échelle. Pour pallier ce point, les auteurs proposent de répartir les noeuds dans deux groupes : le *core* et la *nebula*.

Le *core* est un ensemble, de taille réduite, de noeuds stables et hautement connectés tandis que la *nebula* est un ensemble, de taille non-bornée, de noeuds. Seuls les noeuds du *core* participent à l'exécution du protocole de consensus. Les noeuds de la *nebula* contribuent toujours au document par le biais des opérations *insert* et *remove*.

Ainsi, cette solution permet d'adapter l'utilisation d'un protocole de consensus à un système P2P dynamique. Cependant, elle requiert de disposer de noeuds stables et bien connectés dans le système pour former le *core*. Cette condition est un obstacle pour le déploiement et la pérennité de cette solution.

2.5.3 Ralentissement de la croissance des identifiants de position

L'approche LSEQ [87, 88] est une approche visant à ralentir la croissance des identifiants des CRDTs pour le type Séquence à identifiants densément ordonnés. Au lieu de

réduire périodiquement la taille des métadonnées liées aux identifiants à l'aide d'un mécanisme coûteux de ré-équilibrage de l'arbre des identifiants de position [21], les auteurs définissent de nouvelles stratégies d'allocation des identifiants pour réduire leur vitesse de croissance.

Dans ces travaux, les auteurs notent que les stratégies d'allocation des identifiants proposées pour Logoot dans [68] et [84] ne sont adaptées qu'à un seul comportement d'édition : l'édition séquentielle. Si les insertions sont effectuées en suivant d'autres comportements, les identifiants générés saturent rapidement l'espace des identifiants pour une taille donnée. Les insertions suivantes déclenchent alors une augmentation de la taille des identifiants. En conséquence, la taille des identifiants dans Logoot augmente de façon linéaire au nombre d'insertions, au lieu de suivre la progression logarithmique attendue.

LSEQ définit donc plusieurs stratégies d'allocation d'identifiants adaptées à différents comportements d'édition. Les noeuds choisissent de manière aléatoire mais déterministe une de ces stratégies pour chaque taille d'identifiants. De plus, LSEQ adopte une structure d'arbre exponentiel pour allouer les identifiants : l'espace des identifiants possibles double à chaque fois que la taille des identifiants augmente. Cela permet à LSEQ de choisir avec soin la taille des identifiants et la stratégie d'allocation en fonction des besoins. En combinant les différentes stratégies d'allocation avec la structure d'arbre exponentiel, LSEQ offre une croissance polylogarithmique de la taille des identifiants en fonction du nombre d'insertions.

Cette solution ne repose sur aucune coordination synchrone entre les noeuds. Sa complexité ne dépend pas non plus du nombre de noeuds du système. Elle nous apparaît donc adaptée aux systèmes P2P dynamique à large échelle.

Nous conjecturons cependant que cette approche perd ses bienfaits lorsqu'elle est couplée avec un CRDT pour le type Séquence à granularité variable. En effet, comme évoqué précédemment, toute insertion au sein d'un bloc provoque une augmentation de la taille de l'identifiant résultant (cf. section 2.4.5, page 61).

2.5.4 Synthèse

Ainsi, plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour réduire le surcoût des CRDTs pour le type Séquence. Cependant, aucune de ces approches ne nous apparaît adaptée pour les CRDTs pour le type Séquence à granularité variable dans le contexte de systèmes P2P dynamiques :

- (i) Les approches présentées dans [71, 20, 21] reposent chacune sur des contraintes fortes dans les systèmes P2P dynamiques, c.-à-d. respectivement la stabilité causale des opérations et l'utilisation d'un protocole de consensus. Dans un système dans lequel nous n'avons aucun contrôle sur les noeuds et notamment leur disponibilité, ces contraintes nous apparaissent rédhibitoires.
- (ii) L'approche présentée dans [87, 88] est conçue pour les CRDTs pour le type Séquence à identifiants densément ordonnés à granularité fixe. L'introduction de mécanismes d'agrégation dynamique des éléments en blocs comme ceux présentés dans [26, 80], avec les contraintes qu'ils introduisent, nous semble contrarier les efforts effectués pour réduire la croissance des identifiants de position.

Nous considérons donc la problématique du surcoût des CRDTs pour le type Séquence à granularité variable toujours ouverte.

2.6 Synthèse

Les systèmes distribués adoptent le modèle de la réplication optimiste [13] pour offrir de meilleures garanties à leurs utilisateur-rices, en termes de disponibilité, latence et capacité de tolérance aux pannes [89].

Dans ce modèle, chaque noeud du système possède une copie de la donnée et peut la modifier sans coordination avec les autres noeuds. Il en résulte des divergences temporaires entre les copies respectives des noeuds. Pour résoudre les potentiels conflits provoqués par des modifications concurrentes et assurer la cohérence à terme des copies, les systèmes ont tendance à utiliser les CRDTs [19] en place et lieu des types de données séquentiels.

Plusieurs CRDTs pour le type Séquence ont été proposés, notamment pour permettre la conception d'éditeurs collaboratifs pair-à-pair. Ces CRDTs peuvent être regroupés en deux catégories en fonction de leur mécanisme de résolution de conflits : l'approche à pierres tombales [70, 75, 74, 71, 80, 82] et l'approche à identifiants densément ordonnées [72, 68, 84, 20, 21, 26, 87, 88, 27].

Chacune de ces approches introduit néanmoins un surcoût croissant avec le nombre de modifications, c.-à-d. le nombre de pierres tombales des éléments supprimés ou la taille des identifiants de position des éléments. Ce surcoût croissant pénalise à terme les performances de chacune de ces approches, au moins en termes de métadonnées et de calculs. Pour limiter leur surcoût et la croissance de ce dernier, les CRDTs pour le type Séquence proposent et intègrent divers mécanismes.

[26, 80] proposent un mécanisme d'aggrégation dynamique des éléments insérés dans la séquence en blocs. L'aggrégation des éléments en blocs permet de modifier la granularité de la séquence : ses performances en termes de métadonnées et de calculs dépendent non plus du nombre d'éléments mais du nombre de blocs. Cependant, ce mécanisme est limité par diverses contraintes qui régissent l'ajout d'un élément inséré à l'un des blocs existants et par l'absence de mécanisme de fusion de blocs *a posteriori* (cf. section 2.4.5, page 61). Ainsi, les insertions et suppressions d'éléments fragmentent au fur et à mesure la séquence en de nombreux blocs composés d'un nombre réduit d'éléments, limitant l'efficacité de ce mécanisme.

[87, 88] proposent, pour ralentir la croissance des identifiants de position, de combiner l'utilisation de plusieurs stratégies d'allocations des identifiants avec l'utilisation d'une structure de données sur-mesure pour représenter les identifiants. Cette approche permet d'obtenir une croissance polylogarithmique de la taille des identifiants en fonction du nombre d'insertions. Cependant, cette approche fut conçue pour les séquences à granularité fixe : bien que réduit par rapport à une approche naïve, son surcoût reste proportionnel au nombre d'identifiants, c.-à-d. au nombre d'éléments. L'adaptation de cette approche aux séquences à granularité variable est quant à elle un problème ouvert, les contraintes sur l'ajout d'un élément à un bloc existant entrant en conflit avec les stratégies d'allocations proposées.

Finalement, [20, 21] présentent un mécanisme de ré-équilibrage de l'arbre des identi-

fians de position pour les CRDTs pour le type Séquence à identifiants densément ordonnés. Ce mécanisme permet périodiquement de ré-affecter des identifiants de taille minimale aux différents éléments de la séquence. Cette approche requiert cependant un protocole de consensus, des ré-équilibrages concurrents provoquant un nouveau conflit. Cette contrainte empêche son utilisation dans les systèmes P2P ne disposant pas de noeuds suffisamment stables et bien connectés pour participer au protocole de consensus.

Ainsi, aucune approche existante ne paraît viable dans le cadre de systèmes P2P dynamiques à large échelle pour limiter le surcoût des CRDTs pour le type Séquence à granularité variable et pour limiter son impact croissant sur les performances.

2.7 Proposition

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons et présentons un nouveau mécanisme de réduction du surcoût pour les CRDTs pour le type Séquence à identifiants densément ordonnés et à granularité variable.

À l'instar de [20, 21], ce mécanisme ré-affecte périodiquement des identifiants de taille minimale aux différents éléments de la séquence. Il se distingue toutefois de ces travaux par les aspects suivants :

- (i) Conçu pour les systèmes P2P dynamiques à large échelle, il ne nécessite pas de coordination synchrone entre les noeuds.
- (ii) Conçu pour les séquences à granularité variable, il ré-aggrège les éléments de la séquence en de nouveaux blocs pour réduire leur nombre.

Nous concevons ce mécanisme pour le CRDT LogootSplit. Toutefois, le principe de notre approche est générique. Ainsi, ce mécanisme peut être adapté pour proposer un équivalent pour d'autres CRDTs pour le type Séquence, e.g. RGASplit [80].

Nous présentons et détaillons ce mécanisme dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Renommage dans une séquence répliquée

Sommaire

3.1	Introduction de l'opération de renommage	71
3.1.1	Opération de renommage proposée	71
3.1.2	Gestion des opérations d'insertion et de suppression concurrentes au renommage	73
3.1.3	Évolution du modèle de livraison des opérations	77
3.2	Gestion des opérations de renommage concurrentes	79
3.2.1	Conflits en cas de renommages concurrents	79
3.2.2	Relation de priorité entre renommages	80
3.2.3	Algorithme d'annulation de l'opération de renommage	82
3.3	Mécanisme de Garbage Collection des anciens états obsolètes	88
3.4	Validation	91
3.4.1	Complexité en temps des opérations	91
3.4.2	Expérimentations	96
3.4.3	Résultats	97
3.5	Discussion	105
3.5.1	Stratégie de génération des opérations de renommage	105
3.5.2	Stockage des états précédents sur disque	107
3.5.3	Compression et limitation de la taille de l'opération de renommage	107
3.5.4	Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements	108
3.5.5	Report de la transition vers la nouvelle époque cible	109
3.5.6	Utilisation de l'opération de renommage comme mécanisme de compression du journal des opérations	110
3.5.7	Implémentation alternative de l'intégration de l'opération de renommage basée sur le journal des opérations	112
3.6	Comparaison avec les approches existantes	114
3.6.1	Ré-équilibrage de l'arbre des identifiants de position	114
3.6.2	Ralentissement de la croissance des identifiants de position	115

3.7 Conclusion 115

Nous proposons un nouveau CRDT pour le type Séquence appartenant à l’approche à identifiants densément ordonnés et à granularité variable : `RenamableLogootSplit` [23, 24]. Cette structure de données permet aux noeuds d’insérer et de supprimer des éléments au sein d’une séquence répliquée. Elle incorpore un mécanisme de renommage qui se déclenche par le biais d’une nouvelle opération : l’opération *rename*. Cette dernière permet de :

- (i) Réassigner des identifiants plus courts aux différents éléments de la séquence.
- (ii) Fusionner les blocs composant la séquence.

Ces deux actions permettent au mécanisme de renommage de produire un nouvel état minimisant le surcoût du CRDT en termes de métadonnées et de calculs pour les modifications suivantes.

Une particularité de l’opération *rename* est qu’elle ne modifie pas le contenu de la séquence répliquée, mais uniquement ses identifiants. Puisque les identifiants sont des métadonnées utilisées par la structure de données uniquement afin de résoudre les conflits, les utilisateurs ignorent leur existence. Les opérations *rename* sont donc des opérations systèmes : elles sont émises et appliquées par les noeuds en coulisses, sans aucune intervention des utilisateurs.

Afin de garantir le respect du modèle de cohérence SEC, nous définissons plusieurs propriétés de sécurité que l’opération *rename* doit respecter. Ces propriétés sont inspirées principalement par celles proposées dans [21].

Propriété 1. (Déterminisme) Les opérations *rename* sont intégrées par les noeuds sans aucune coordination. Pour assurer que l’ensemble des noeuds atteigne un état équivalent à terme, une opération *rename* donnée doit toujours générer le même nouvel identifiant à partir de l’identifiant courant.

Propriété 2. (Préservation de l’intention de l’utilisateur) Bien que l’opération *rename* n’incarne pas elle-même une intention de l’utilisateur, elle ne doit pas entrer en conflit avec les modifications des utilisateurs. Notamment, les opérations *rename* ne doivent pas annuler ou altérer le résultat d’opérations *insert* et *remove* du point de vue des utilisateurs.

Propriété 3. (Séquence bien formée) La séquence répliquée doit être bien formée. Appliquée une opération *rename* sur une séquence bien formée doit produire une nouvelle séquence bien formée. Une séquence bien formée doit respecter les propriétés suivantes :

Propriété 3.1. (Préservation de l’unicité) Chaque identifiant doit être unique. Donc, pour une opération *rename* donnée, chaque identifiant doit être associé à un nouvel identifiant unique.

Propriété 3.2. (Préservation de l’ordre) Les éléments de la séquence doivent être ordonnés en fonction de leur identifiants. L’ordre existant entre les identifiants initiaux doit donc être préservé par l’opération *rename*.

Propriété 4. (Commutativité avec les opérations concurrentes) Les opérations concurrentes peuvent être livrées dans des ordres différents à chaque noeud. Afin de garantir la convergence des réplicas, l'ordre d'application d'un ensemble d'opérations concurrentes ne doit pas avoir d'impact sur l'état obtenu. L'opération *rename* doit donc être commutative avec n'importe quelle opération concurrente.

La Propriété 4 est particulièrement difficile à assurer. Cette difficulté est due au fait que les opérations *rename* modifient les identifiants assignés aux éléments. Cependant, les autres opérations telles que les opérations *insert* et *remove* reposent sur ces identifiants pour spécifier où insérer les éléments ou lesquels supprimer. Les opérations *rename* sont donc intrinsèquement incompatibles avec les opérations *insert* et *remove* concurrentes. De la même manière, des opérations *rename* concurrentes peuvent réassigner des identifiants différents à des mêmes éléments. Les opérations *rename* concurrentes ne sont donc pas commutatives. Par conséquent, il est nécessaire de concevoir et d'utiliser des méthodes de résolution de conflits pour assurer la Propriété 4.

Dans ce chapitre, nous présentons donc le mécanisme de renommage intégré à RenamableLogootSplit et le mécanisme de résolution de conflits additionnel qu'il utilise. Dans la section 3.1, nous présentons l'opération *rename*, c.-à-d. son fonctionnement et son impact sur le modèle de livraison du CRDT, ainsi que le mécanisme de résolution de conflits pour gérer les opérations *insert* et *remove* concurrentes. Ensuite, nous présentons le mécanisme de résolution de conflits pour gérer les opérations *rename* concurrentes dans la section 3.2. Dans la section 3.3, nous présentons un mécanisme de Garbage Collection (GC) des métadonnées propres au mécanisme de renommage. Dans la section 3.4, nous présentons une validation de notre approche par le biais d'une analyse en complexité et d'une évaluation expérimentale. Nous présentons ensuite plusieurs limites et perspectives de notre approche dans la section 3.5. Finalement, nous comparons notre contribution et ses résultats aux approches existantes dans la section 3.6.

3.1 Introduction de l'opération de renommage

3.1.1 Opération de renommage proposée

L'opération *rename*, abrégée en *ren* dans nos figures, réassigne des identifiants arbitraires aux éléments de la séquence de réduire son surcoût en métadonnées.

Son comportement est illustré dans la figure 3.1. Dans cet exemple, le noeud A initie une opération *rename* sur son état local. Tout d'abord, le noeud A génère un nouvel identifiant à partir du premier tuple de l'identifiant du premier élément de la séquence (i_0^{B1}). Pour générer ce nouvel identifiant, le noeud A reprend la position de ce tuple (i) mais utilise son propre identifiant de noeud (**A**) et numéro de séquence actuel (2). De plus, son offset est mis à 0. Le noeud A réassigne l'identifiant résultant (i_0^{A2}) au premier élément de la séquence, comme décrit dans la Figure 3.1a. Ensuite, le noeud A dérive des identifiants contigus pour tous les éléments restants en incrémentant de manière successive l'offset (i_1^{A2} , i_2^{A2} , i_3^{A2}), comme présenté dans la Figure 3.1b. Comme nous assignons des identifiants consécutifs à tous les éléments de la séquence, nous pouvons au final agréger

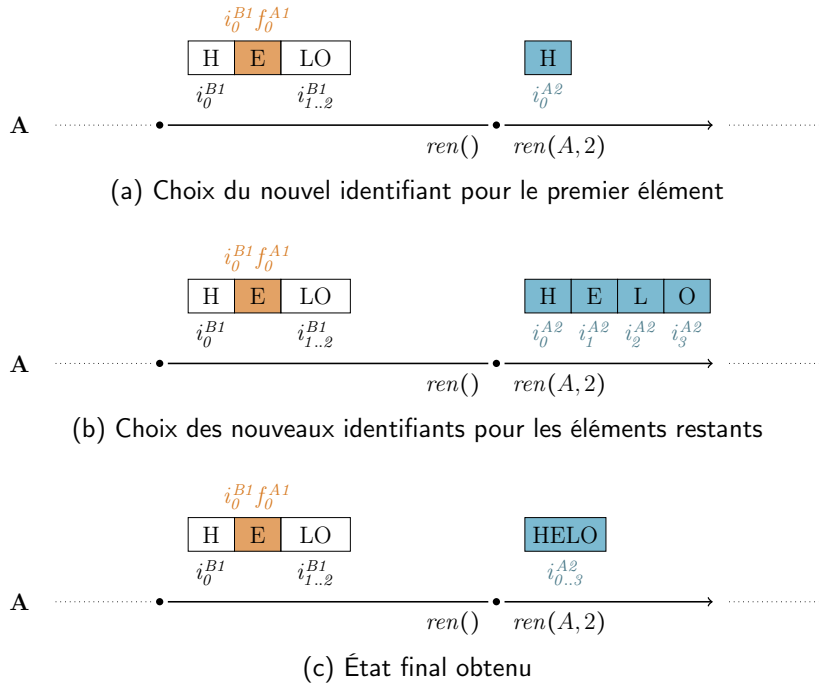


FIGURE 3.1 – Renommage de la séquence sur le noeud A

ces éléments en un seul bloc, comme illustré en Figure 3.1c. Ceci permet aux noeuds de bénéficier au mieux de la fonctionnalité des blocs et de minimiser le surcoût en métadonnées de l'état résultat.

Pour converger, les autres noeuds doivent renommer leur état de manière identique. Cependant, ils ne peuvent pas simplement remplacer leur état courant par l'état généré par le renommage. En effet, ils peuvent avoir modifié en concurrence leur état. Afin de ne pas perdre ces modifications, les noeuds doivent traiter l'opération *rename* eux-mêmes. Pour ce faire, le noeud qui a généré l'opération *rename* diffuse les données sur lesquelles il a basé son renommage aux autres, c.-à-d. son *ancien état*.

Définition 49 (Ancien état). Un *ancien état* est la liste des intervalles d'identifiants qui composent l'état courant de la séquence répliquée au moment du renommage.

Par souci de simplicité, nous représentons dans ce manuscrit l'*ancien état* par la liste des identifiants correspondant à la liste d'intervalles d'identifiants. Par exemple, l'ancien état (nommé *renamedIds* dans nos algorithmes) diffusé par l'opération *rename* de la figure 3.1 est le suivant :

$$renamedIds = [i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$$

Ainsi, nous définissons l'opération *rename* de la manière suivante :

Définition 50 (*rename*). Une opération *rename* est un triplet $\langle nodeId, nodeSeq, formerState \rangle$ où

- (i) $nodeId$ est l'identifiant du noeud qui a généré l'opération $rename$.
- (ii) $nodeSeq$ est le numéro de séquence du noeud au moment de la génération de l'opération $rename$.
- (iii) $formerState$ est l'ancien état du noeud au moment du renommage.

En utilisant ces données, les autres noeuds calculent le nouvel identifiant de chaque identifiant renommé. Concernant les identifiants insérés de manière concurrente au renommage, nous expliquons dans la sous-section 3.1.2 comment les noeuds peuvent les renommer de manière déterministe.

3.1.2 Gestion des opérations d'insertion et de suppression concurrentes au renommage

Après avoir appliqué des opérations $rename$ sur leur état local, les noeuds peuvent recevoir des opérations concurrentes. La figure 3.2 illustre de tels cas.

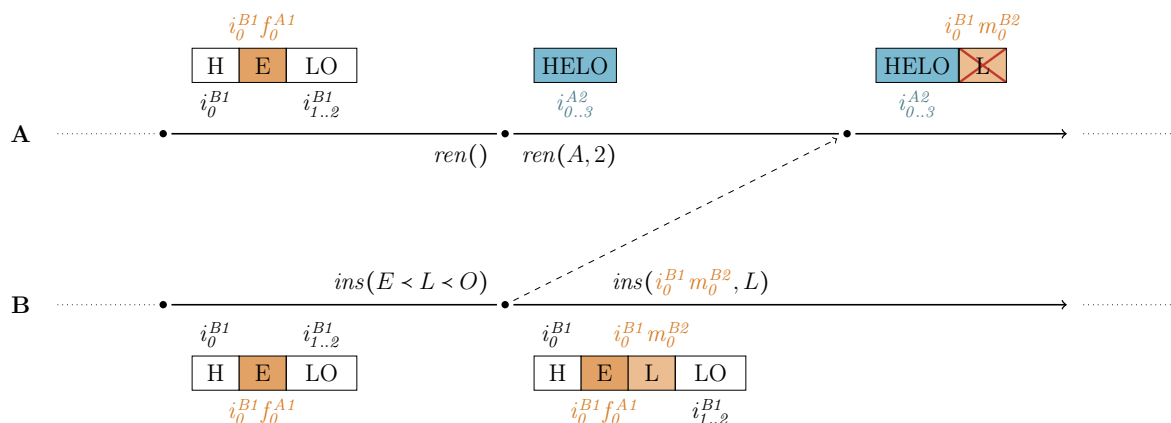


FIGURE 3.2 – Modifications concurrentes menant à une anomalie

Dans cet exemple, le noeud B insère un nouvel élément "L", lui assigne l'identifiant $i_0^{B1} m_0^{B2}$ et diffuse cette modification, de manière concurrente à l'opération $rename$ décrite dans la figure 3.1. À la réception de l'opération $insert$, le noeud A ajoute l'élément inséré au sein de sa séquence, en utilisant l'identifiant de l'élément pour déterminer sa position. Cependant, puisque les identifiants ont été modifiés par l'opération $rename$ concurrente, le noeud A insère le nouvel élément à la fin de sa séquence (puisque $i_3^{A2} <_{id} i_0^{B1} m_0^{B2}$) au lieu de l'insérer à la position souhaitée. Comme illustré par cet exemple, appliquer naïvement les modifications concurrentes provoquerait des anomalies. Il est donc nécessaire de traiter les opérations concurrentes aux opérations $rename$ de manière particulière.

Tout d'abord, les noeuds doivent détecter les opérations concurrentes aux opérations $rename$. Pour cela, nous utilisons un système basé sur des *époques*. Initialement, la séquence répliquée débute à l'époque *origine* notée ε_0 . Chaque opération $rename$ introduit une nouvelle époque et permet aux noeuds d'y avancer depuis l'époque précédente. Par exemple, l'opération $rename$ décrite dans la figure 3.2 permet aux noeuds de faire progresser leur état de ε_0 à ε_{A2} . Nous définissons les époques de la manière suivante :

Définition 51 (Époque). Une époque est un couple $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$ où

- (i) $nodeId$ est l'identifiant du noeud qui a généré cette époque.
- (ii) $nodeSeq$ est le numéro de séquence du noeud au moment de la génération de cette époque.

Notons que l'époque générée est caractérisée et identifiée de manière unique par son couple $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$.

Au fur et à mesure que les noeuds reçoivent des opérations *rename*, ils construisent et maintiennent localement la *chaîne des époques*. Cette structure de données ordonne les époques en fonction de leur relation *parent-enfant* et associe à chaque époque l'*ancien état* correspondant (c.-à-d. l'*ancien état* inclus dans l'opération *rename* qui a généré cette époque). De plus, les noeuds marquent chaque opération avec leur époque courante au moment de génération de l'opération. À la réception d'une opération, les noeuds comparent l'époque de l'opération à l'époque courante de leur séquence.

Si les époques diffèrent, les noeuds doivent transformer l'opération avant de pouvoir l'intégrer. Les noeuds déterminent par rapport à quelles opérations *rename* doit être transformée l'opération reçue en calculant le chemin entre l'époque de l'opération et leur époque courante en utilisant la *chaîne des époques*.

Les noeuds utilisent la fonction `renameId`, décrite dans l'Algorithme 2²⁶, pour transformer les opérations *insert* et *remove* par rapport aux opérations *rename*. Cet algorithme associe les identifiants d'une époque *parente* aux identifiants correspondant dans l'époque *enfant*. Pour cela, la fonction `renameId` distingue deux cas :

- (i) L'identifiant à renommer id n'était pas présent lors de la génération de l'opération *rename*, c.-à-d. id a été inséré en concurrence à cette dernière²⁷. Ce cas est géré par l'ensemble de l'algorithme, à l'exception des lignes 9 à 11.
- (ii) L'identifiant à renommer id fait partie des identifiants présents à la génération de l'opération *rename*, c.-à-d. id appartient à l'ancien état (nommé *renamedIds* dans Algorithme 2). Ce cas est géré par les lignes 9 à 11.

Renommage d'un identifiant inséré en concurrence de l'opération *rename*

Pour renommer les identifiants inconnus au moment de la génération de l'opération *rename*, `renameId` utilise plusieurs stratégies. La stratégie principale repose sur l'utilisation du prédécesseur dans l'ancien état de l'identifiant à renommer. Un exemple est présenté dans la figure 3.3. Cette figure décrit le même scénario que la figure 3.2, à l'exception que le noeud A utilise `renameId` pour renommer l'identifiant généré de façon

26. Pour expliciter le formalisme de notre pseudo-code : nous utilisons l'*assignation par décomposition*. Par exemple, les valeurs du tableau `array = [42, 7, 53]` peuvent être affectées respectivement aux variables `val1`, `val2` et `val3` via l'instruction `[val1, val2, val3] ← array`. De plus, nous désignons par `_` une ou un ensemble de valeurs non-nécessaires par notre algorithme. Ainsi, pour récupérer uniquement le premier tuple d'un identifiant id , nous utilisons la notation suivante : `firstTuple ⊕ _ ← id`.

27. Dans le cas où nous autorisons une livraison non-causale de l'opération *rename* (cf. sous-section 3.1.3, page 77), id peut aussi avoir été supprimé au préalable et l'opération *remove* correspondante pas encore livrée au noeud courant

Algorithme 2 Fonctions principales pour renommer un identifiant

```

1: function RENAMEID( $id \in \mathbb{I}$ ,  $renamedIds \in Array(\mathbb{I})$ ,  $nodeId \in \mathbb{N}$ ,  $nodeSeq \in \mathbb{N}$ ) :  $\mathbb{I}$ 

2:    $[id_0, id_1, \dots, id_{n-2}, id_{n-1}] \leftarrow renamedIds$             $\triangleright$  Retrieve the identifiers of the former state
3:    $firstId \leftarrow id_0$ 
4:    $lastId \leftarrow id_{n-1}$ 
5:    $\langle pos, \_, \_, \_ \rangle \oplus \_ \leftarrow firstId$             $\triangleright$  Retrieve the value pos of the first tuple of id

6:   if  $id <_{id} firstId$  then
7:      $newFirstId \leftarrow \langle pos, nodeId, nodeSeq, 0 \rangle$ 
8:     return  $renIdLessThanFirstId(id, newFirstId)$ 
9:   else if  $id \in renamedIds$  then
10:    Retrieve the index  $i$  of  $id$  in  $renamedIds$ 
11:    return  $\langle pos, nodeId, nodeSeq, i \rangle$             $\triangleright$  Use  $i$  as the offset of the generated id
12:   else if  $lastId <_{id} id$  then
13:      $newLastId \leftarrow \langle pos, nodeId, nodeSeq, n - 1 \rangle$ 
14:     return  $renIdGreaterThanLastId(id, newLastId)$ 
15:   else
16:     return  $renIdFromPredId(id, renamedIds, pos, nodeId, nodeSeq)$ 
17:   end if
18: end function

19: function RENIDFROMPREDID( $id \in \mathbb{I}$ ,  $renamedIds \in Array(\mathbb{I})$ ,  $pos \in \mathbb{N}$ ,  $nodeId \in \mathbb{N}$ ,  $nodeSeq \in \mathbb{N}$ ) :  $\mathbb{I}$ 

20:    $[id_0, id_1, \dots, id_{n-2}, id_{n-1}] \leftarrow renamedIds$ 
21:   Search  $id_i \in renamedIds$  such that  $id_i <_{id} id <_{id} id_{i+1}$ 
22:    $newPredId \leftarrow \langle pos, nodeId, nodeSeq, i \rangle$ 
23:   return  $newPredId \oplus id$ 
24: end function

```

concurrente, $i_0^{B1} m_0^{B2}$, avant de l'insérer dans son état. L'algorithme procède de la manière suivante.

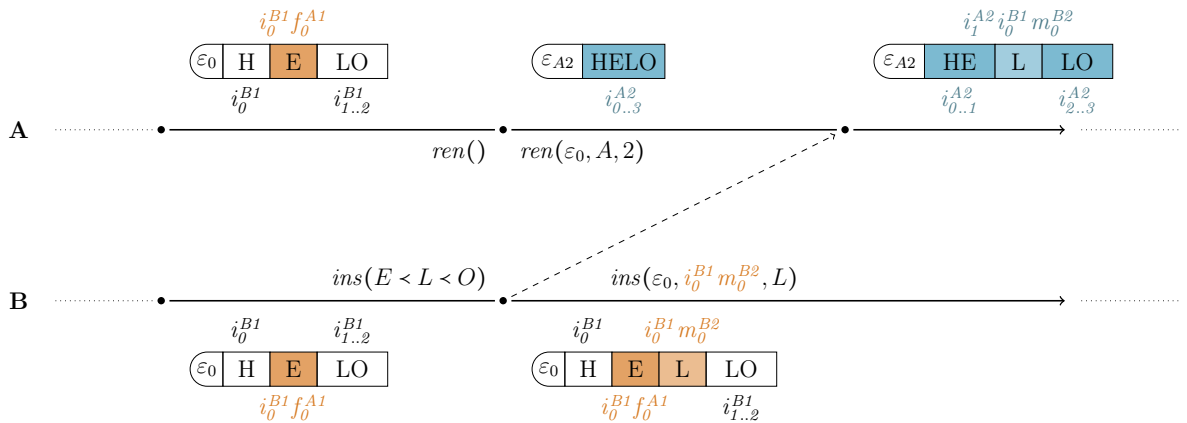


FIGURE 3.3 – Renommage de la modification concurrente avant son intégration en utilisant `renameId` afin de maintenir l'ordre souhaité

Tout d'abord, il détermine quelle stratégie utiliser pour renommer l'identifiant ($i_0^{B1} m_0^{B2}$)

en le comparant aux identifiants présents dans l'ancien état, dont notamment deux identifiants clés : $firstId$ et $lastId$. Ces identifiants correspondent respectivement au premier (i_0^{B1}) et au dernier identifiants (i_2^{B1}) présents dans l'ancien état ($[i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$). Ici, nous avons :

$$firstId <_{id} id <_{id} lastId$$

Nous sommes donc dans le cas correspondant à la ligne 15 et l'algorithme utilise `renIdFromPredId` pour renommer l'identifiant.

Cet algorithme recherche le prédécesseur de l'identifiant donné ($i_0^{B1} m_0^{B2}$) dans l'ancien état, c.-à-d. l'identifiant maximal présent dans l'ancien état²⁸ et qui est inférieur à l'identifiant donné (ligne 21). Dans le cas présent, cette recherche établit que $i_0^{B1} f_0^{A1}$ est le prédécesseur de $i_0^{B1} m_0^{B2}$.

Ensuite, l'algorithme renomme le prédécesseur obtenu pour déterminer l'identifiant correspondant à l'époque *enfant* (ligne 22). Puisque le prédécesseur appartient à l'ancien état, ce renommage correspond au cas (ii) expliqué ci-après. Dans notre exemple, $i_0^{B1} f_0^{A1}$ est renommé en i_1^{A2} .

Finalement, le noeud A concatène (noté \oplus) le prédécesseur renommé et l'identifiant donné pour générer l'identifiant correspondant à l'époque *enfant* : $i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2}$ (ligne 23). En réassignant cet identifiant à l'élément inséré de manière concurrente, le noeud A peut l'insérer à son état tout en préservant l'ordre souhaité entre les éléments.

Renommage d'un identifiant appartenant à l'ancien état

`renameId` permet aussi aux noeuds de gérer le cas contraire : intégrer des opérations *rename* distantes sur leur copie locale alors qu'ils ont précédemment intégré des modifications concurrentes. Ce cas correspond à celui du noeud B dans la figure 3.3. Dans ce cas, `renameId` reproduit l'algorithme que nous avons décrit de manière informelle lors de la présentation de l'opération *rename* (cf. sous-section 3.1.1, page 71). Cet algorithme associe à chaque identifiant appartenant à l'ancien état un nouvel identifiant composé d'un unique tuple.

Pour chaque identifiant renommé, le nouvel identifiant obtenu est de la forme $\langle pos, nodeId, nodeSeq, offset \rangle$ où :

- (i) pos est la valeur du champ pos du premier identifiant appartenant à l'ancien état. Dans notre exemple, l'ancien état est le suivant :

$$[i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$$

La valeur de pos est donc i (ligne 5).

- (ii) $nodeId$ est l'identifiant du noeud qui a généré l'opération *rename* (**A**, obtenu par paramètre).
- (iii) $nodeSeq$ est le numéro de séquence du noeud qui a généré l'opération *rename* (2, obtenu par paramètre).

²⁸. Notons que l'ancien état est un tableau trié d'identifiants, il est donc possible d'effectuer une recherche dichotomique pour trouver efficacement l'index d'un identifiant.

- (iv) *offset* est l'index de l'identifiant renommé dans l'ancien état ($i_0^{B1} \rightarrow 0, i_0^{B1} f_0^{A1} \rightarrow 1, \dots$). Ce dernier peut être récupéré via une recherche de l'identifiant donné dans l'ancien état (ligne 9).

Ainsi, à la réception de l'opération *rename* du noeud A, le noeud B utilise `renameId` sur chacun des identifiants de son état pour le renommer et atteindre un état équivalent à celui du noeud A.

Notes additionnelles

L'Algorithme 2 présente seulement le cas principal de `renameId`, c.-à-d. le cas où l'identifiant à renommer appartient à l'intervalle des identifiants formant l'ancien état ($firstId \leq_{id} id \leq_{id} lastId$). Les fonctions pour gérer les autres cas, c.-à-d. les cas où l'identifiant à renommer n'appartient pas à cet intervalle ($id <_{id} firstId$ ou $lastId <_{id} id$), sont présentées dans l'Annexe C.

Nous notons que l'algorithme que nous présentons ici permet aux noeuds de renommer leur état identifiant par identifiant. Une extension possible est de concevoir `renameBlock`, une version améliorée qui renomme l'état bloc par bloc. `renameBlock` réduirait le temps d'intégration des opérations *rename*, puisque sa complexité en temps ne dépendrait plus du nombre d'identifiants (c.-à-d. du nombre d'éléments) mais du nombre de blocs. De plus, son exécution réduirait le temps d'intégration des prochaines opérations *rename* puisque le mécanisme de renommage réduit le nombre de blocs.

3.1.3 Évolution du modèle de livraison des opérations

L'introduction de l'opération *rename* nécessite de faire évoluer le modèle de livraison des opérations associé à `RenamableLogootSplit`. Afin d'illustrer cette nécessité, considérons l'exemple suivant :

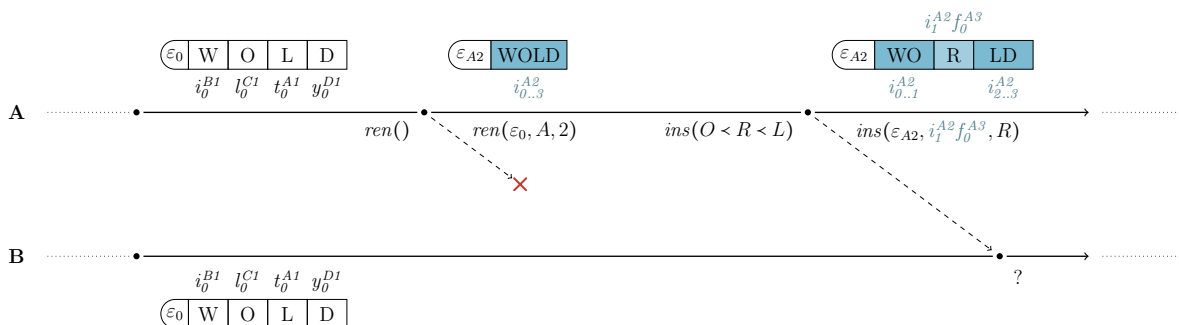


FIGURE 3.4 – Livraison d'une opération *insert* sans avoir reçu l'opération *rename* précédente

Dans la figure 3.4, les noeuds A et B répliquent tous deux une même séquence, contenant les éléments "WORLD". Tout d'abord, le noeud A procède au renommage de cet état.

Puis il insère un nouvel élément, "R", entre "O" et "L". Les opérations correspondantes aux actions du noeud A sont diffusées sur le réseau.

Cependant, l'opération *rename* n'est pas livrée au noeud B, par exemple suite à un problème réseau. L'opération *insert* est quant à elle correctement livrée à ce dernier. Le noeud B doit alors intégrer dans son état un élément et l'identifiant qui lui est attaché. Mais cet identifiant est issu d'une époque (ε_{A2}) différente de son époque actuelle (ε_0) et dont le noeud n'avait pas encore connaissance. Il convient de s'interroger sur l'état à produire dans cette situation.

Comme nous l'avons déjà illustré par la figure 3.2, les identifiants d'une époque ne peuvent être comparés qu'aux identifiants de la même époque. Tenter d'intégrer une opération *insert* ou *remove* provenant d'une époque encore inconnue ne résulterait qu'en un état incohérent et une transgression de l'intention utilisateur (cf. Propriété 2, page 70). Il est donc nécessaire d'empêcher ce scénario de se produire.

Pour cela, nous proposons de faire évoluer le modèle de livraison des opérations de *RenamableLogootSplit*. Celui-ci repose sur celui de *LogootSplit* (cf. Définition 47, page 60). Pour rappel, ce modèle requiert que

- (i) Une opération doit être livrée exactement une fois à chaque noeud.
- (ii) Les opérations *insert* peuvent être livrées dans un ordre quelconque.
- (iii) L'opération *remove(idIntervals)* ne peut être livrée qu'après la livraison des opérations d'insertions des éléments formant les *idIntervals*.

Pour prévenir les scénarios tels que celui illustré par la figure 3.4 nous y ajoutons la règle suivante : les opérations *rename* doivent être livrées à la structure de données avant les opérations qui ont une dépendance causale vers ces dernières. Nous obtenons donc le modèle de livraison suivant :

Définition 52 (Modèle de livraison *RenamableLogootSplit*). Le modèle de livraison *RenamableLogootSplit* définit les 4 règles suivantes sur la livraison des opérations :

- (i) Une opération doit être livrée à l'ensemble des noeuds à terme.
- (ii) Une opération doit être livrée qu'une seule et unique fois aux noeuds.
- (iii) Une opération *remove* doit être livrée à un noeud une fois que les opérations *insert* des éléments concernés par la suppression ont été livrées à ce dernier.
- (iv) Une opération peut être délivrée à un noeud qu'à partir du moment où l'opération *rename* qui a introduit son époque de génération a été délivrée à ce même noeud.

Il est cependant intéressant de noter que la livraison de l'opération *rename* ne requiert pas de contraintes supplémentaires. Notamment, une opération *rename* peut être livrée dans le désordre par rapport aux opérations *insert* et *remove* dont elle dépend causalement. La figure 3.5 présente un exemple de ce cas figure.

Dans cet exemple, les noeuds A et B répliquent tous deux une même séquence, contenant les éléments "WORLD". Le noeud A commence par insérer un nouvel élément, "R", entre les éléments "O" et "L". Puis il procède au renommage de son état. Les opérations correspondantes aux actions du noeud A sont diffusées sur le réseau.

3.2. Gestion des opérations de renommage concurrentes

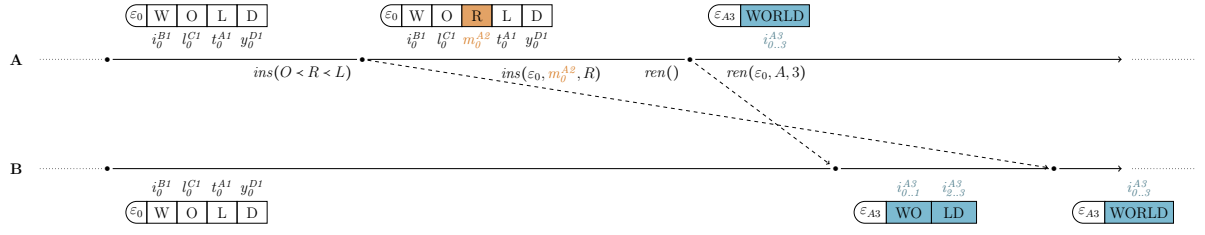


FIGURE 3.5 – Livraison désordonnée d’une opération *rename* et de l’opération *insert* qui la précède

Cependant, suite à un aléa du réseau, le noeud B reçoit les deux opérations *insert* et *rename* dans le désordre. L’opération *rename* est donc livrée en première au noeud B. En utilisant les informations contenues dans l’opération, le noeud B renomme chaque identifiant composant son état.

Ensuite, le noeud B reçoit l’opération *insert*. Comme l’époque de génération de l’opération *insert* (ϵ_0) est différente de celle de son état courant (ϵ_{A3}), le noeud B utilise `renameId` pour renommer l’identifiant avant de l’insérer. m_0^{A2} faisant partie de l’ancien état, le noeud B utilise l’index de cet identifiant dans l’ancien état (2) pour calculer son équivalent à l’époque ϵ_{A3} (i_2^{A3}). Le noeud B insère l’élément "R" avec ce nouvel identifiant et converge alors avec le noeud A, malgré la livraison dans le désordre des opérations.

3.2 Gestion des opérations de renommage concurrentes

3.2.1 Conflits en cas de renommages concurrents

Nous considérons à présent les scénarios avec des opérations *rename* concurrentes. figure 3.6 développe le scénario décrit précédemment dans la figure 3.3.

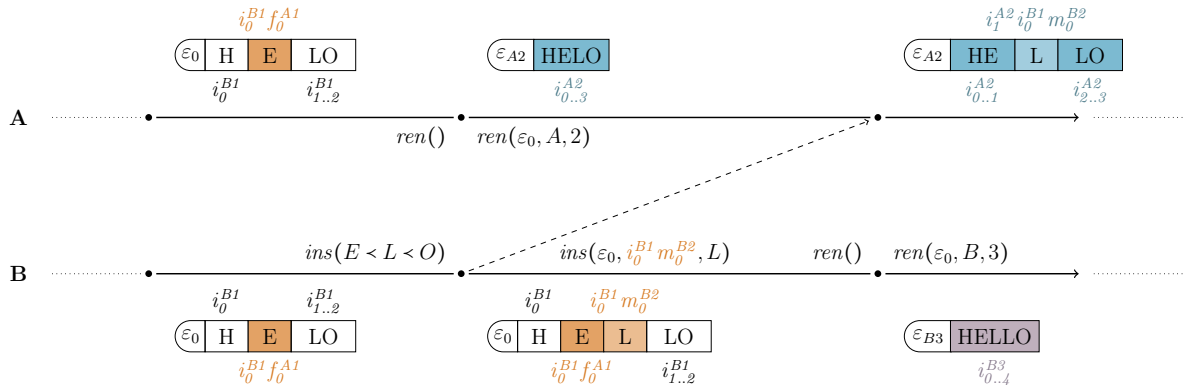


FIGURE 3.6 – Opérations *rename* concurrentes menant à des états divergents

Après avoir diffusé son opération *insert*, le noeud B effectue une opération *rename* sur son état. Cette opération réassigne à chaque élément un nouvel identifiant à partir de l’identifiant du premier élément de la séquence (i_0^{B1}), de l’identifiant du noeud (**B**) et de son numéro de séquence courant (3). Cette opération introduit aussi une nouvelle

époque : ε_{B3} . Puisque l'opération *rename* de A n'a pas encore été livrée au noeud B à ce moment, les deux opérations *rename* sont concurrentes.

Puisque des époques concurrentes sont générées, les époques forment désormais un *arbre des époques*. Nous représentons dans la figure 3.7 l'*arbre des époques* que les noeuds obtiennent une fois qu'ils se sont synchronisés à terme. Les époques sont représentées sous la forme de noeuds de l'arbre et la relation *parent-enfant* entre elles est illustrée sous la forme de flèches noires.

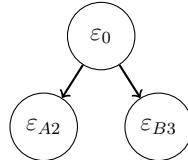


FIGURE 3.7 – *Arbre des époques* correspondant au scénario décrit dans la figure 3.6

À l'issue du scénario décrit dans la figure 3.6, les noeuds A et B sont respectivement aux époques ε_{A2} et ε_{B3} . Pour converger, tous les noeuds devraient atteindre la même époque à terme. Cependant, la fonction `renameId` décrite dans l'Algorithme 2 permet seulement aux noeuds de progresser d'une époque *parente* à une de ses époques *enfants*. Le noeud A (resp. B) est donc dans l'incapacité de progresser vers l'époque du noeud B (resp. A). Il est donc nécessaire de faire évoluer notre mécanisme de renommage pour sortir de cette impasse.

Tout d'abord, les noeuds doivent se mettre d'accord sur une époque commune de l'*arbre des époques* comme époque cible. Afin d'éviter des problèmes de performance dus à une coordination synchrone, les noeuds doivent sélectionner cette époque de manière non-coordonnée, c.-à-d. en utilisant seulement les données présentes dans l'*arbre des époques*. Nous présentons un tel mécanisme dans la sous-section 3.2.2.

Ensuite, les noeuds doivent se déplacer à travers l'*arbre des époques* afin d'atteindre l'époque cible. La fonction `renameId` permet déjà aux noeuds de descendre dans l'arbre. Les cas restants à gérer sont ceux où les noeuds se trouvent actuellement à une époque *soeur* ou *cousine* de l'époque cible. Dans ces cas, les noeuds doivent être capable de remonter dans l'*arbre des époques* pour retourner au Plus Petit Ancêtre Commun (PPAC) de l'époque courante et l'époque cible. Ce déplacement est en fait similaire à l'annulation de l'effet des opérations *rename* précédemment appliquées. Nous proposons un algorithme, `revertRenameId`, qui remplit cet objectif dans la sous-section 3.2.3.

3.2.2 Relation de priorité entre renommages

Pour que chaque noeud sélectionne la même époque cible de manière non-coordonnée, nous définissons la relation de priorité sur les époques $<_{\varepsilon}$.

Définition 53 (Relation *priority* $<_{\varepsilon}$). La relation *priority* $<_{\varepsilon}$ est un ordre strict total sur l'ensemble des époques. Elle permet aux noeuds de comparer n'importe quelle paire d'époques.

En utilisant la relation *priority*, nous définissons l'époque cible de la manière suivante :

Définition 54 (Époque cible). L'époque cible est l'époque de l'ensemble des époques vers laquelle les noeuds doivent progresser. Les noeuds sélectionnent comme époque cible l'époque maximale d'après l'ordre établi par *priority*.

Pour définir la relation *priority*, nous pouvons choisir entre plusieurs stratégies. Dans le cadre de ce travail, nous utilisons l'ordre lexicographique sur le chemin des époques dans l'*arbre des époques*. La figure 3.8 fournit un exemple.

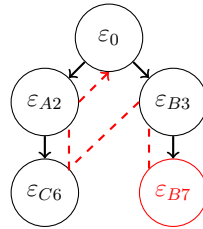
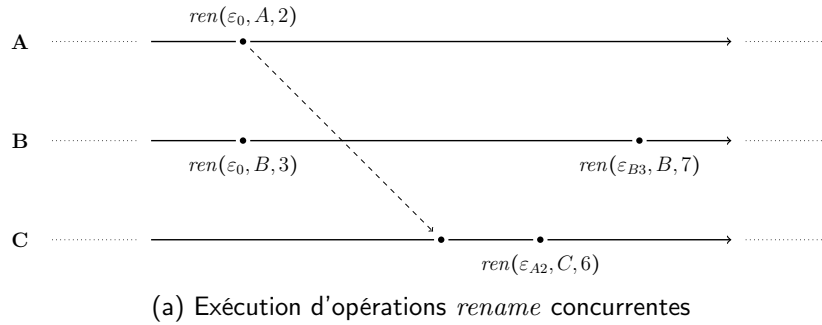


FIGURE 3.8 – Sélectionner l'époque cible d'une exécution d'opérations *rename* concurrentes

La Figure 3.8a décrit une exécution dans laquelle trois noeuds A, B et C génèrent plusieurs opérations avant de se synchroniser à terme. Comme seules les opérations *rename* sont pertinentes pour le problème qui nous occupe, nous représentons seulement ces opérations dans cette figure. Initialement, le noeud A génère une opération *rename* qui introduit l'époque ε_{A2} . Cette opération est livrée au noeud C, qui génère ensuite sa propre opération *rename* qui introduit l'époque ε_{C6} . De manière concurrente à ces opérations, le noeud B génère deux opérations *rename*, introduisant ε_{B3} et ε_{B7} .

Une fois que les noeuds se sont synchronisés, ils obtiennent l'*arbre des époques* représenté dans la Figure 3.8b. Dans cette figure, la flèche tireté rouge représente l'ordre entre les époques d'après la relation *priority* tandis que l'époque cible choisie est représentée sous la forme d'un noeud rouge.

Pour déterminer l'époque cible, les noeuds reposent sur la relation *priority*. D'après l'ordre lexicographique sur le chemin des époques dans l'*arbre des époques*, nous avons $\varepsilon_0 < \varepsilon_0\varepsilon_{A2} < \varepsilon_0\varepsilon_{A2}\varepsilon_{C6} < \varepsilon_0\varepsilon_{B3} < \varepsilon_0\varepsilon_{B3}\varepsilon_{B7}$. Chaque noeud sélectionne donc ε_{B7} comme époque cible de manière non-coordonnée.

D'autres stratégies pourraient être proposées pour définir la relation *priority*. Par exemple, l'ordre proposé *priority* pourrait se baser sur une représentation du travail effectué sur le document, à l'aide de métriques additionnelles intégrées au sein des opérations *rename*. Cela permettrait de favoriser la branche de l'*arbre des époques* avec le plus d'activité, que nous conjecturons corrélé avec le nombre de noeuds actifs, pour minimiser la quantité globale de calculs effectués par les noeuds du système. Nous approfondissons ce sujet dans la sous-section 3.5.4.

3.2.3 Algorithme d'annulation de l'opération de renommage

À présent, nous développons le scénario présenté dans la figure 3.6. Dans la figure 3.9, le noeud A reçoit l'opération *rename* du noeud B. Cette opération est concurrente à l'opération *rename* que le noeud A a appliqué précédemment. D'après la relation *priority* proposée, le noeud A sélectionne l'époque introduite ε_{B3} comme l'époque cible ($\varepsilon_{A2} <_{\varepsilon} \varepsilon_{B3}$). Mais pour pouvoir renommer son état vers l'époque ε_{B3} , il doit au préalable faire revenir son état courant de l'époque ε_{A2} à un état équivalent à l'époque ε_0 . Nous devons définir un mécanisme permettant aux noeuds d'annuler les effets d'une opération *rename* appliquée précédemment.

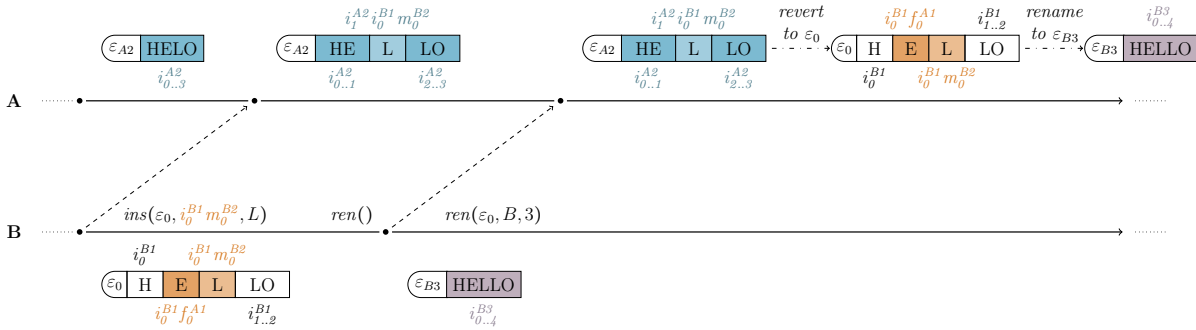


FIGURE 3.9 – Annulation d'une opération *rename* intégrée précédemment en présence d'un identifiant inséré en concurrence

C'est précisément le but de `revertRenameId`, qui associe les identifiants de l'époque *enfant* aux identifiants correspondant dans l'époque *parente*. Nous décrivons cette fonction dans l'Algorithme 3.

Les objectifs de `revertRenameId` sont les suivants :

- (i) Restaurer à leur ancienne valeur les identifiants générés causalement avant l'opération *rename* annulée, c.-à-d. les identifiants appartenant à l'ancien état de l'opération (e.g. $i_1^{A2} \rightarrow i_0^{B1} f_0^{A1}$ dans la figure 3.9). Ce cas revient à annuler l'effet du cas (ii) de `renameId` (cf. page 74).
- (ii) Restaurer à leur ancienne valeur les identifiants générés de manière concurrente à l'opération *rename* annulée, c.-à-d. les identifiants n'appartenant pas à l'ancien état de l'opération (e.g. $i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2} \rightarrow i_0^{B1} m_0^{B2}$ dans la figure 3.9). Ce cas revient à annuler l'effet du cas (i) de `renameId` (cf. page 74).

Algorithme 3 Fonctions principales pour annuler le renommage appliqué précédemment à un identifiant

```

1: function REVERTRENAMEID( $\text{newId} \in \mathbb{I}$ ,  $\text{renamedIds} \in \text{Array}(\mathbb{I})$ ,  $\text{nodeId} \in \mathbb{N}$ ,  $\text{nodeSeq} \in \mathbb{N}$ ) :  $\mathbb{I}$ 

2:    $[\text{id}_0, \text{id}_1, \dots, \text{id}_{n-2}, \text{id}_{n-1}] \leftarrow \text{renamedIds}$ 
3:    $\text{firstId} \leftarrow \text{id}_0$ 
4:    $\text{lastId} \leftarrow \text{id}_{n-1}$ 
5:    $\langle \text{pos}, \_, \_ \rangle \oplus \_ \leftarrow \text{firstId}$ 
6:    $\text{newFirstId} \leftarrow \langle \text{pos}, \text{nodeId}, \text{nodeSeq}, 0 \rangle$ 
7:    $\text{newLastId} \leftarrow \langle \text{pos}, \text{nodeId}, \text{nodeSeq}, n-1 \rangle$ 

8:   if  $\text{newId} <_{id} \text{newFirstId}$  then
9:     return  $\text{revRenIdLessThanNewFirstId}(\text{newId}, \text{firstId}, \text{newFirstId})$ 
10:  else if  $\text{newId} = \langle \text{pos}, \text{nodeId}, \text{nodeSeq}, \_ \rangle$  then
11:     $\langle \_, \_, \_, i \rangle \leftarrow \text{newId}$ 
12:    return  $\text{id}_i$ 
13:  else if  $\text{newLastId} <_{id} \text{newId}$  then
14:    return  $\text{revRenIdGreaterThanNewLastId}(\text{newId}, \text{lastId})$ 
15:  else
16:     $\text{newId} = \langle \text{pos}, \text{nodeId}, \text{nodeSeq}, i \rangle \oplus \text{tail}$ 
17:    return  $\text{revRenIdfromPredId}(\text{newId}, \text{renamedIds}, i)$ 
18:  end if
19: end function

20: function REVRENIDFROMPREDID( $\text{newId} \in \mathbb{I}$ ,  $\text{renamedIds} \in \text{Array}(\mathbb{I})$ ,  $\text{index} \in \mathbb{N}$ ) :  $\mathbb{I}$ 

21:    $[\text{id}_0, \text{id}_1, \dots, \text{id}_{n-2}, \text{id}_{n-1}] \leftarrow \text{renamedIds}$ 
22:    $\langle \_, \_, \_, \text{offset} \rangle \oplus \text{tail} \leftarrow \text{newId}$ 
23:    $\text{predId} \leftarrow \text{id}_{\text{offset}}$ 
24:    $\text{succId} \leftarrow \text{id}_{\text{offset}+1}$ 

25:   if  $\text{tail} <_{id} \text{predId}$  then
26:      $\text{newId} = \text{predId} \oplus \perp_t \oplus \text{tail}$ 
27:     return  $\text{predId} \oplus \perp_t \oplus \text{tail}$ 
28:   else if  $\text{succId} <_{id} \text{tail}$  then
29:      $\text{newId} = \text{succId} \oplus \top_t \oplus \text{tail}$ 
30:      $\text{prefix} \oplus \langle \text{pos}_j, \text{nodeId}_j, \text{nodeSeq}_j, \text{offset}_j \rangle \oplus \_ \leftarrow \text{succId}$ 
31:      $\text{predOfSuccId} \leftarrow \text{prefix} \oplus \langle \text{pos}_j, \text{nodeId}_j, \text{nodeSeq}_j, \text{offset}_j - 1 \rangle$ 
32:     return  $\text{predOfSuccId} \oplus \top_t \oplus \text{tail}$ 
33:   else
34:     return  $\text{tail}$ 
35:   end if
36: end function

```

- (iii) Assigner de nouveaux identifiants respectant l'ordre souhaité aux éléments qui ont été insérés causalement après l'opération *rename* annulée, c.-à-d. les identifiants générés de façon postérieure à l'opération par le biais d'opérations *insert* non-concurrentes à cette dernière. Ce dernier cas n'est pas illustré dans la figure 3.9. Ainsi, nous introduirons un nouvel exemple à l'aide de la figure 3.10 pour le présenter.

Pour déterminer dans quel cas nous nous trouvons pour un identifiant donné, `revertRenameId`

effectue un filtrage par motif sur la valeur de l'identifiant.

Annuler l'effet du renommage sur un identifiant généré causalement avant l'opération *rename*

Pour déterminer si l'identifiant donné $newId$ ²⁹ a été obtenu via le renommage d'un identifiant id ²⁹ appartenant à l'ancien état de l'opération à annuler, il convient de se rappeler le résultat de `renameId` pour ces derniers. Comme présenté précédemment (cf. section 3.1.2, page 76), `renameId` retourne pour des identifiants appartenant à l'ancien état des identifiants de la forme suivante :

$$\langle pos, nodeId, nodeSeq, offset \rangle$$

où :

- (i) pos est la valeur du champ pos du premier identifiant appartenant à l'ancien état.
- (ii) $nodeId$ est l'identifiant du noeud qui a généré l'opération *rename*.
- (iii) $nodeSeq$ est le numéro de séquence du noeud qui a généré l'opération *rename*.
- (iv) $offset$ est l'index de l'identifiant renommé dans l'ancien état.

Ainsi, `revertRenameId` détermine que $newId$ a été obtenu via le renommage d'un identifiant appartenant à l'ancien état lorsqu'il présente ce motif (i_{offset}^{A2} dans la figure 3.9, ligne 10 de Algorithme 3).

Dans ce cas, `revertRenameId` utilise simplement la valeur de $offset$ de $newId$ pour retrouver id dans l'ancien état. Par exemple, pour annuler l'effet du renommage sur l'identifiant i_0^{A2} dans la figure 3.9 et ainsi retrouver sa valeur précédente, `revertRenameId` utilise l'offset de l'identifiant (0) pour retrouver l'identifiant à cet index dans l'ancien état ($[i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$). De cette manière, i_0^{A2} est restauré à son ancienne valeur : i_0^{B1} (ligne 12).

Annuler l'effet du renommage sur un identifiant généré en concurrence de l'opération *rename*

De manière similaire au cas précédent, il convient tout d'abord de déterminer si l'identifiant donné $newId$ est le résultat du renommage d'un identifiant généré en concurrence de l'opération *rename*. Pour cela, rappelons le comportement adopté par `renameId` dans ce cas de figure. Lorsque l'identifiant à renommer a été généré en concurrence, l'algorithme a recours à la fonction `renIdFromPredId`. Cette fonction recherche le prédécesseur $predId$ (e.g. $i_0^{B1} f_0^{A1}$) de l'identifiant donné id (e.g. $i_0^{B1} m_0^{B2}$) dans l'ancien état, renomme $predId$ pour obtenir $newPredId$ (i_1^{A2}) et finalement renvoie la concaténation de $newPredId$ avec id ($i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2}$, cf. section 3.1.2, page 74).

Ainsi, les identifiants générés en concurrence de l'opération *rename* présentent dans la nouvelle époque le motif $newPredId tail$ avec :

²⁹. Nous appelons $newX$ les identifiants dans l'époque résultant de l'application d'une opération *rename*, tandis que X décrit leur équivalent à l'époque initiale.

- (i) *newPredId* un identifiant issu du renommage d'un identifiant appartenant à l'*ancien état*, à l'exception du dernier (e.g. $i_0^{A2}, \dots, i_2^{A2}$ dans la figure 3.9).
- (ii) *tail* un identifiant tel que $tail \in]predId, succId[$.

`revertRenameId` peut donc déterminer si l'identifiant donné *newId* résulte du renommage d'un identifiant généré en concurrence de l'opération *rename* en vérifiant s'il présente ce motif.

Cette vérification est effectuée dans `revRenIdFromPredId`. L'algorithme décompose *newId* (e.g. $i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2}$) en deux parties : son premier tuple *newPredId* (i_1^{A2}) et sa *tail* ($i_0^{B1} m_0^{B2}$). Il lit alors l'*offset* (1) de *newPredId* (ligne 21). Comme indiqué précédemment, cet *offset* correspond à l'index de *predId* dans l'*ancien état* ($[i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$). Ceci permet de récupérer *predId* ($i_0^{B1} f_0^{A1}$, ligne 22) ainsi que *succId* (i_1^{B1} , ligne 23). Dès lors, il ne reste plus qu'à comparer *tail* à ces deux valeurs (ligne 31) pour valider que $tail \in]predId, succId[$. Cette vérification effectuée, l'algorithme peut dès lors retourner la valeur *tail* ($i_0^{B1} m_0^{B2}$) pour annuler l'effet du renommage tout en satisfaisant nos contraintes, c.-à-d. préserver l'ordre souhaité et restaurer à sa valeur initiale l'identifiant.

Annuler l'effet du renommage sur un identifiant généré causalement après l'opération *rename*

Les identifiants générés causalement après l'opération *rename* se distinguent des cas décrits précédemment, c.-à-d. les identifiants appartenant à l'*ancien état* ou généré en concurrence de l'opération *rename*. Contrairement à ces derniers, les identifiants générés causalement après l'opération *rename* ne possèdent pas de valeurs correspondantes dans l'époque *parente*.

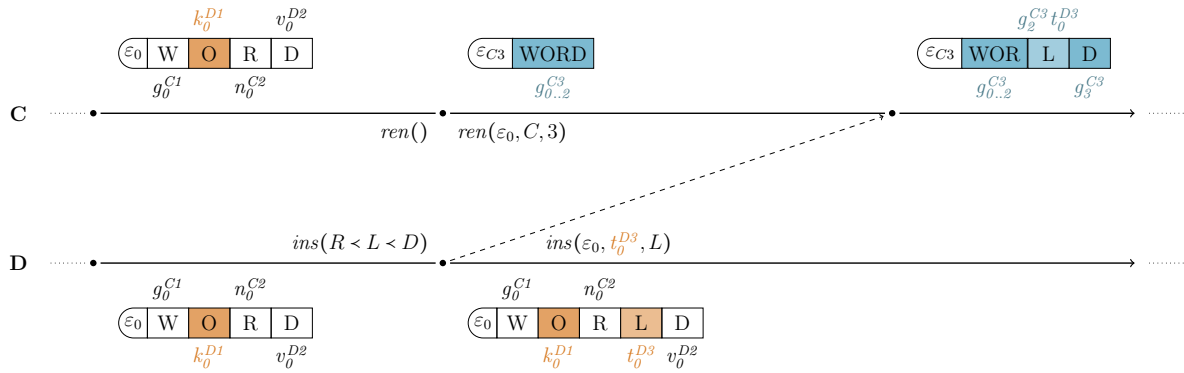
Cette spécificité réduit les contraintes que doit satisfaire `revertRenameId` pour ces identifiants. Ainsi, `revertRenameId` peut retourner un identifiant arbitraire pour un *newId* donné, tant que la valeur de l'identifiant retourné satisfait la contrainte d'unicité (cf. Propriété 3.1, page 70) et de préservation de l'ordre avec les autres identifiants (cf. Propriété 3.2, page 70). Pour illustrer ce cas, nous introduisons un nouvel exemple via la figure 3.10.

Dans cet exemple, les noeuds C et D répliquent une même séquence contenant les éléments "WORD". Dans la Figure 3.10a, le noeud C commence par renommer son état. En concurrence, le noeud D insère l'élément "L" entre les éléments "R" et "D". L'opération *insert* correspondante est livrée au noeud C, qui l'intègre en suivant le comportement présenté dans la sous-section 3.1.2.

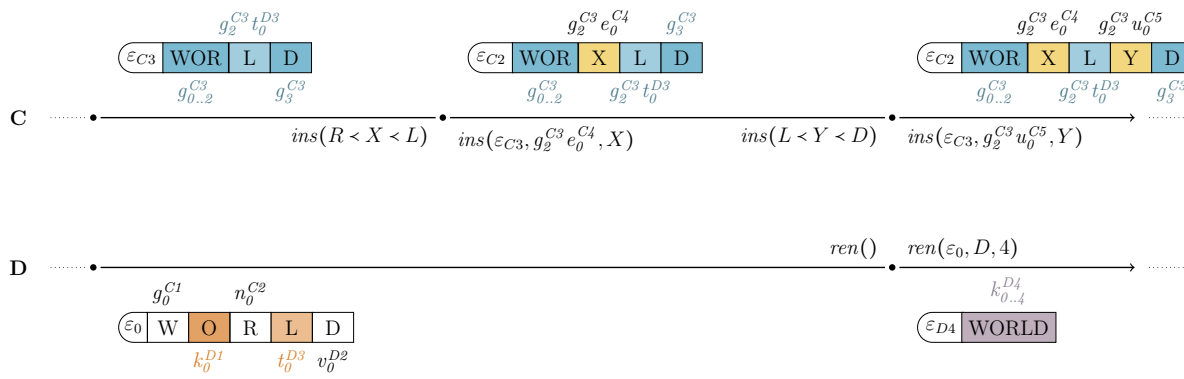
Dans la Figure 3.10b, le noeud C procède à l'insertion de l'élément "X" entre les éléments "R" et "L", puis à l'insertion de l'élément "Y" entre les éléments "L" et "D". Ces opérations *insert* dépendent donc causalement de l'opération *rename* effectuée précédemment par C. En parallèle, le noeud D effectue un renommage de son état.

Dans la Figure 3.10c, l'opération *rename* correspondante est livrée au noeud C. L'époque ε_{D4} introduite par cette opération est prioritaire par rapport à l'époque courante ε_{C3} du noeud C, le noeud C procède donc au renommage de son état vers l'époque ε_{D4} .

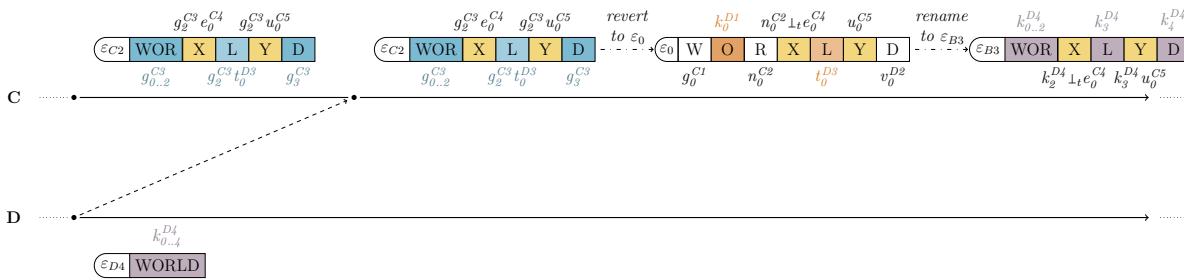
Pour cela, le noeud C calcule l'état équivalent de son état courant à l'époque ε_0 grâce à `revertRenameId`. Nous nous intéressons ici à la manière dont cet algorithme procède pour les identifiants $g_2^{C3} e_0^{C4}$ et $g_2^{C3} u_0^{C5}$.



(a) Mise en place de l'exemple



(b) Génération d'opérations *insert* postérieures à l'opération *rename*



(c) Annulation de l'opération *rename* précédente au profit d'une opération *rename* concurrente

FIGURE 3.10 – Annulation d'une opération *rename* intégrée précédemment en présence d'identifiants insérés postérieurement

Nous distinguons deux catégories d'identifiants générés causalement après l'opération *rename* :

- (i) Les identifiants dont la valeur ne permet pas de déterminer leur moment de génération par rapport à l'opération *rename* (e.g. $g_2^{C3} u_0^{C5}$), c.-à-d. la valeur ne permet de déterminer si l'identifiant a été inséré en concurrence de l'opération *rename* ou de façon postérieure à cette dernière.

- (ii) Les identifiants dont la valeur indique qu'ils ont été générés de façon postérieure à l'opération *rename* (e.g. $g_2^{C3} e_0^{C4}$).

Nous présentons ci-dessous comment `revertRenameId` gère chacun de ces cas.

Cas (i) Comme indiqué précédemment, `revertRenameId` vérifie pour un identifiant donné *newId* (e.g. $g_2^{C3} u_0^{C5}$) si sa *tail* (u_0^{C5}), c.-à-d. son ou ses tuples à l'exception du premier, est comprise entre son *predId* et *succId*. Dans le cas de $g_2^{C3} u_0^{C5}$, nous avons respectivement n_0^{C2} et v_0^{D2} comme *predId* et *succId* (les identifiants d'indices 2 et 3 dans l'*ancien état* $[g_0^{C1}, k_0^{D1}, n_0^{C2}, v_0^{D2}]$). Nous avons donc $tail \in]predId, succId[$.

Ce cas de figure est le même que celui présenté dans section 3.2.3. Dans certains cas, il n'est donc pas possible de distinguer un identifiant inséré de manière postérieure à l'opération *rename* d'un identifiant inséré de manière concurrente à cette dernière, à moins d'ajouter une métadonnée.

Cependant, il n'est pas nécessaire de différencier ces deux cas : nous pouvons annuler l'effet de l'opération *rename* sur l'identifiant inséré par la suite de la même manière que nous annulons l'effet de l'opération *rename* sur les identifiants insérés en concurrence, c.-à-d. en retournant la valeur *tail* (cf. Algorithme 3, ligne 31, page 83). En effet, cette méthode nous permet de préserver la relation d'ordre de ces identifiants ($g_2^{C3} u_0^{C5}$) avec les autres identifiants existants (g_2^{C3} , $g_2^{C3} t_0^{D3}$ et g_3^{C3}), de l'époque enfant (ε_{C2}) à l'époque parent (ε_0).

Pour $g_2^{C3} u_0^{C5}$, `revertRenameId` retourne la valeur u_0^{C5} . `revertRenameId` retourne pour les identifiants g_2^{C3} et g_3^{C3} des éléments "R" et "D" leur valeur d'origine, n_0^{C2} et v_0^{D2} (section 3.2.3). Pour l'identifiant $g_2^{C3} t_0^{D3}$ de l'élément "L", `revertRenameId` retourne t_0^{D3} (section 3.2.3). Ainsi, l'annulation de l'effet de l'opération *rename* préserve à ε_0 l'ordre des éléments $R < L < Y < D$ puisque nous avons :

$$n_0^{C2} <_{id} t_0^{D3} <_{id} u_0^{C5} <_{id} v_0^{D2}$$

Cas (ii) De nouveau, `revertRenameId` vérifie pour un identifiant donné *newId* (e.g. $g_2^{C3} e_0^{C4}$) si sa *tail* (e_0^{C4}), c.-à-d. son ou ses tuples à l'exception du premier, est comprise entre son *predId* et *succId*. Dans le cas de $g_2^{C3} e_0^{C4}$, nous avons respectivement n_0^{C2} et v_0^{D2} comme *predId* et *succId* (les identifiants d'indices 2 et 3 dans l'*ancien état* $[g_0^{C1}, k_0^{D1}, n_0^{C2}, v_0^{D2}]$). Nous avons donc $tail \notin]predId, succId[$.

Ce résultat particulier indique que l'identifiant donné (e.g. $g_2^{C3} e_0^{C4}$) a été inséré de manière postérieure à l'opération *rename*. Cependant, nous constatons nous ne pouvons pas gérer ce cas de manière similaire au cas précédent, c.-à-d. en retournant la valeur *tail*. En effet, cette approche modifierait la relation d'ordre existante entre les identifiants à l'époque enfant (en ε_{C2} , nous avons $g_2^{C3} < g_2^{C3} e_0^{C4}$) lors du passage à l'époque parent (en ε_0 , nous obtiendrions $n_0^{C2} > e_0^{C4}$).

Pour gérer ce cas, nous introduisons deux nouveaux tuples exclusifs au mécanisme de renommage : *minTuple* et *maxTuple*, notés respectivement \perp_t et \top_t . Ils sont respectivement le tuple minimal et maximal utilisables pour générer des identifiants³⁰. Nous utilisons ces tuples dans `revRenIdFromPredId` de la manière suivante.

30. Concrètement, il s'agit de tuples ayant pour *pos* une valeur exclusive respectivement inférieure et supérieure à l'ensemble des valeurs de *pos* utilisables lors de la génération d'un nouvel identifiant.

\perp_t : Lorsque $tail < predId$ ($e_0^{C4} < n_0^{C2}$), `revRenIdFromPredId` génère un préfixe à partir de $predId$ et de \perp_t , et le concatène à $tail$ ($n_0^{C2} \perp_t e_0^{C4}$) (cf. Algorithme 3, ligne 25, page 83). Ce préfixe ($n_0^{C2} \perp_t$) permet d'assurer que l'identifiant résultant est supérieur à $predId$ (n_0^{C2}) tout en restant inférieur aux identifiants insérés en concurrence à la même position (t_0^{D3}) (cf. section 3.2.3, page 84).

\top_t : Lorsque $succId < tail$, `revRenIdFromPredId` génère un préfixe à partir du prédécesseur de $succId$ et de \top_t . Le prédécesseur de $succId$, $predOfSuccId$, est obtenu en décrémentant le dernier offset de $succId$ (e.g. v_{-1}^{D2} pour v_0^{D2}). Le préfixe ainsi formé ($v_{-1}^{D2} \top_t$) est concaténé à $tail$ pour former l'identifiant résultant (cf. Algorithme 3, ligne 29, page 83). Ce préfixe permet d'assurer que l'identifiant résultant est inférieur à $succId$ (v_0^{D2}) tout en restant supérieur aux identifiants insérés en concurrence à la même position (t_0^{D3}) (cf. section 3.2.3, page 84).

Notes additionnelles

Comme pour l'Algorithme 2, l'Algorithme 3 ne présente seulement que le cas principal de `revertRenameId`. Il s'agit du cas où l'identifiant à restaurer appartient à l'intervalle des identifiants renommés ($newFirstId \leq_{id} id \leq_{id} newLastId$). Les fonctions pour gérer les cas restants sont présentées dans l'Annexe D.

Notons que `renameId` et `revertRenameId` ne sont pas des fonctions réciproques. `revertRenameId` restaure à leur valeur initiale les identifiants insérés causalement avant ou de manière concurrente à l'opération `rename`. Par contre, `renameId` ne fait pas de même pour les identifiants insérés causalement après l'opération `rename`. Rejouer une opération `rename` précédemment annulée altère donc ces identifiants. Cette modification peut entraîner une divergence entre les noeuds, puis qu'un même élément sera désigné par des identifiants différents.

Ce problème est toutefois évité dans notre système grâce à la relation *priority* utilisée. Puisque la relation *priority* est définie en utilisant l'ordre lexicographique sur le chemin des époques dans l'*arbre des époques*, les noeuds se déplacent seulement vers l'époque la plus à droite de l'*arbre des époques* lorsqu'ils changent d'époque. Les noeuds évitent donc d'aller et revenir entre deux mêmes époques, et donc d'annuler et rejouer les opérations `rename` correspondantes.

3.3 Mécanisme de Garbage Collection des anciens états obsolètes

Les noeuds stockent les époques et les *anciens états* correspondant pour transformer les identifiants d'une époque à l'autre. Au fur et à mesure que le système progresse, certaines époques et métadonnées associées deviennent obsolètes puisque plus aucune opération ne peut être émise depuis ces époques. Les noeuds peuvent alors supprimer ces époques. Dans cette section, nous présentons un mécanisme permettant aux noeuds de déterminer les époques obsolètes.

Pour proposer un tel mécanisme, nous nous repons sur la notion de *stabilité causale des opérations* [58], plus particulièrement des opérations *rename*. Une opération est causalement stable si elle a été livrée à l'ensemble des noeuds. Pour déterminer si une opération est causalement stable, un noeud doit donc avoir connaissance de l'ensemble des noeuds du système et suivre leur progression, c.-à-d. les opérations qu'ils ont intégré. Ainsi, les noeuds doivent maintenir localement des structures de données permettant respectivement de représenter l'ensemble des noeuds du système, e.g. un ensemble répliqué [42, 41], et leur progression, e.g. une matrice de vecteur de versions.

La stabilité causale des opérations *rename* constitue le point de départ de notre mécanisme de suppression des époques obsolètes. En effet, la stabilité causale d'une opération *rename* donnée implique que tous les noeuds ont progressé à l'époque introduite par cette opération ou à une époque plus prioritaire d'après la relation *priority*. À partir de ce constat, nous définissons les *potentielles époques courantes* :

Définition 55 (Potentielles époques courantes). L'ensemble des époques auxquelles les noeuds peuvent se trouver actuellement et à partir desquelles ils peuvent émettre des opérations, du point de vue du noeud courant. Il s'agit d'un sous-ensemble de l'ensemble des époques, composé de l'époque maximale introduite par une opération *rename* causalement stable et de toutes les époques plus prioritaires que cette dernière d'après la relation *priority*.

Les prochaines opérations livrées seront donc générées à partir de ces époques seulement³¹. Pour traiter ces prochaines opérations, les noeuds doivent maintenir les chemins entre toutes les époques de l'ensemble des *potentielles époques courantes*. Nous appelons *époques requises* l'ensemble des époques correspondant.

Définition 56 (Époques requises). L'ensemble des époques qu'un noeud doit conserver pour traiter les potentielles prochaines opérations. Il s'agit de l'ensemble des époques qui forment les chemins entre chaque époque appartenant à l'ensemble des *potentielles époques courantes* et leur Plus Petit Ancêtre Commun (PPAC).

Il s'ensuit que toute époque qui n'appartient pas à l'ensemble des *époques requises* peut être retirée par les noeuds. La figure 3.11 illustre un cas d'utilisation du mécanisme de récupération de mémoire proposé.

Dans la Figure 3.11a, nous représentons une exécution au cours de laquelle deux noeuds A et B génère respectivement plusieurs opérations *rename*. Dans la Figure 3.11b, nous représentons les *arbre des époques* respectifs de chaque noeud à l'issue de cette exécution. Les époques introduites par des opérations *rename* causalement stables sont représentées en utilisant des doubles cercles. L'ensemble des *potentielles époques courantes* est montré sous la forme d'un rectangle noir tireté, tandis que l'ensemble des *époques requises* est représenté par un rectangle vert pointillé.

31. Nous considérons ici que l'ordre de livraison des opérations satisfait le modèle de livraison FIFO, c.-à-d. que les messages d'un noeud sont livrés aux autres noeuds dans le même ordre qu'ils ont été envoyés, et le modèle de livraison *RenamableLogootSplit* (cf. Définition 52, page 78). Ainsi, une opération de renommage ne peut être causalement stable pour un noeud que si ce dernier a reçu toutes les opérations ayant eu lieu avant d'après la relation *happens-before* et toutes les opérations concurrentes.

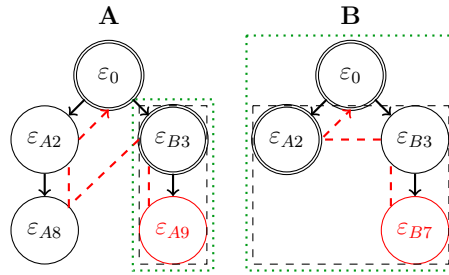
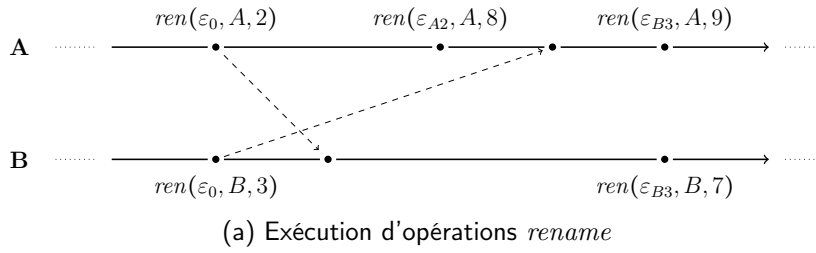

 (b) Arbres des époques respectifs avec les ensembles *potentielles époques courantes* et *époques requises* illustrés

 FIGURE 3.11 – Suppression des époques obsolètes et récupération de la mémoire des *anciens états* associés

Le noeud A génère tout d'abord une opération *rename* vers ε_{A2} et ensuite une opération *rename* vers ε_{A8} . Il reçoit ensuite une opération *rename* du noeud B qui introduit ε_{B3} . Puisque ε_{B3} est plus grand que son époque courante actuelle ($\varepsilon_{e0}\varepsilon_{A2}\varepsilon_{A8} < \varepsilon_{e0}\varepsilon_{B3}$), le noeud A la sélectionne comme sa nouvelle époque cible et procède au renommage de son état en conséquence. Finalement, le noeud A génère une troisième opération *rename* vers ε_{A9} .

De manière concurrente, le noeud B génère l'opération *rename* vers ε_{B3} . Il reçoit ensuite l'opération *rename* vers ε_{A2} du noeud A. Cependant, le noeud B conserve ε_{B3} comme époque courante (puisque $\varepsilon_{e0}\varepsilon_{A2} < \varepsilon_{e0}\varepsilon_{B3}$). Après, le noeud B génère une autre opération *rename* vers ε_{B7} .

À la livraison de l'opération *rename* introduisant l'époque ε_{B3} au noeud A, cette opération devient causalement stable. À partir de ce point, le noeud A sait que tous les noeuds ont progressé jusqu'à cette époque ou une plus grande d'après la relation *priority*. Les époques ε_{B3} et ε_{A9} forment donc l'ensemble des *potentielles époques courantes* et les noeuds peuvent seulement émettre des opérations depuis ces époques ou une de leur descendante encore inconnue. Le noeud A procède ensuite au calcul de l'ensemble des *époques requises*. Pour ce faire, il détermine le PPAC des *potentielles époques courantes* : ε_{B3} . Il génère ensuite l'ensemble des *époques requises* en ajoutant toutes les époques formant les chemins entre ε_{B3} et les *potentielles époques courantes*. Les époques ε_{B3} et ε_{A9} forment donc l'ensemble des *époques requises*. Le noeud A déduit que les époques ε_0 , ε_{A2} et ε_{A8} peuvent être supprimées de manière sûre.

À l'inverse, la livraison de l'opération *rename* vers ε_{A2} au noeud B ne lui permet pas de supprimer la moindre métadonnée, bien que cette opération devienne causalement stable. En effet, à partir de ses connaissances, le noeud B calcule que ε_{A2} , ε_{B3} et ε_{B7} forment l'ensemble des *potentielles époques courantes*. De cette information, le noeud B détermine

que ces époques et leur PPAC forment l'ensemble des *époques requises*. Toute époque connue appartient donc à l'ensemble des *époques requises*, empêchant leur suppression.

À terme, une fois que le système devient inactif, les noeuds atteignent la même époque et l'opération *rename* correspondante devient causalement stable. Les noeuds peuvent alors supprimer toutes les autres époques et métadonnées associées, supprimant ainsi le surcoût mémoire introduit par le mécanisme de renommage.

Notons que le mécanisme de récupération de mémoire peut être simplifié dans les systèmes empêchant les opérations *rename* concurrentes. Puisque les époques forment une chaîne dans de tels systèmes, la dernière époque introduite par une opération *rename* causalement stable devient le PPAC des *potentielles époques courantes*. Il s'ensuit que cette époque et ses descendantes forment l'ensemble des *époques requises*. Les noeuds n'ont donc besoin que de suivre les opérations *rename* causalement stables pour déterminer quelles époques peuvent être supprimées dans les systèmes sans opérations *rename* concurrentes.

La stabilité causale peut prendre un certain temps à être atteinte. En attendant, les noeuds peuvent néanmoins décharger les anciens états sur le disque dur puisqu'ils ne sont seulement nécessaires que pour traiter les opérations concurrentes aux opérations *rename*. Nous approfondissons ce sujet dans la sous-section 3.5.2.

3.4 Validation

Dans cette section, nous présentons notre validation de notre contribution.

Cette validation prend deux formes. Dans un premier temps, nous effectuons une évaluation théorique de ses performances. Ainsi, nous présentons dans la sous-section 3.4.1 une évaluation de la complexité en temps des opérations de `RenamableLogootSplit`, ainsi que de son mécanisme de GC des métadonnées des anciens états obsolètes.

Puis nous effectuons dans un second temps une évaluation empirique pour confirmer ces résultats. Dans la sous-section 3.4.2, nous présentons le protocole expérimental que nous avons mis en place pour cette évaluation empirique. Puis nous présentons et analysons les résultats obtenus dans la sous-section 3.4.3.

3.4.1 Complexité en temps des opérations

Hypothèses

Les complexités en temps des opérations de `RenamableLogootSplit` dépendent de plusieurs paramètres, e.g. nombre d'identifiants et de blocs stockés au sein de la structure, taille des identifiants ou encore structures de données utilisées. Afin d'établir les valeurs de complexité des différentes opérations, nous prenons les hypothèses suivantes vis-à-vis des paramètres.

Nous supposons que le nombre n d'identifiants présents dans la séquence a tendance à croître, c.-à-d. que plus d'insertions sont effectuées que de suppressions. Nous considérons que la taille des identifiants, qui elle croît avec le nombre d'insertions mais qui est

réinitialisée à chaque renommage, devient négligeable par rapport au nombre d'identifiants. Nous ne prenons donc pas en considération ce paramètre dans nos complexités et considérons que les manipulations d'identifiants (comparaison, génération) s'effectuent en temps constant. Afin de simplifier les complexités, nous considérons que les *anciens états* associés aux époques contiennent aussi n identifiants. Finalement, nous considérons que nous utilisons comme structures de données un arbre AVL pour représenter l'état interne de la séquence, des tableaux pour les *anciens états* et une table de hachage pour l'*arbre des époques*.

Complexité en temps des opérations *insert* et *remove*

À partir de ces hypothèses, nous établissons les complexités en temps des opérations. Nous distinguons pour chaque opération deux complexités : une complexité pour l'intégration de l'opération *locale*, une pour l'intégration de l'opération *distante*.

Nous désignons par intégration de l'opération *locale* le processus d'application d'une modification issue du noeud lui-même sur son état courant, e.g. l'insertion d'un nouvel élément à partir de son index et l'allocation de l'identifiant de position correspondant, et de génération de l'opération correspondante. L'intégration de l'opération *distante* correspond quant à elle au processus d'application d'une opération provenant d'un autre noeud, e.g. l'insertion d'un nouvel élément à partir de son identifiant de position.

La complexité de l'intégration de l'opération *insert* locale est inchangée par rapport à celle obtenue pour LogootSplit. Son intégration consiste toujours à déterminer entre quels identifiants se situe les nouveaux éléments insérés, à générer de nouveaux identifiants correspondants à l'ordre souhaité puis à insérer le bloc dans l'arbre AVL. D'après [26], nous obtenons donc une complexité de $\mathcal{O}(\log b)$ pour cette opération locale, où b représente le nombre de blocs dans la séquence.

La complexité de l'intégration de l'opération *insert* distante, elle, évolue par rapport à celle définie pour LogootSplit. En effet, plusieurs étapes se rajoutent au processus d'intégration de l'opération notamment dans le cas où celle-ci provient d'une autre époque que l'époque courante.

Tout d'abord, il est nécessaire d'identifier l'époque PPAC entre l'époque de l'opération et l'époque courante. L'algorithme correspondant consiste à déterminer la première intersection entre deux branches de l'*arbre des époques*. Cette étape peut être effectuée en $\mathcal{O}(h)$, où h représente la hauteur de l'*arbre des époques*.

L'obtention de l'époque PPAC entre l'époque de l'opération et l'époque courante permet de déterminer les k renommages dont les effets doivent être retirés de l'opération et les l renommages dont les effets doivent être intégrés à l'opération. Le noeud intégrant l'opération procède ainsi aux k inversions de renommages successives puis aux l application de renommages, et ce pour tous les s identifiants insérés par l'opération.

Pour retirer les effets des renommages à inverser, le noeud intégrant l'opération utilise `revertRenameId`. Cet algorithme retourne pour un identifiant donné un nouvel identifiant correspondant à l'époque précédente. Pour cela, `revertRenameId` utilise le prédécesseur et le successeur de l'identifiant donné dans l'*ancien état* renommé. Pour retrouver ces deux identifiants au sein de l'*ancien état*, `revertRenameId` utilise l'offset du premier tuple de

l'identifiant donné. Par définition, cet élément correspond à l'index du prédécesseur de l'identifiant donné dans l'*ancien état*. Aucun parcours de l'*ancien état* n'est nécessaire. Le reste de `revertRenameId` consistant en des comparaisons et manipulations d'identifiants, nous obtenons que `revertRenameId` s'effectue en $\mathcal{O}(1)$.

Pour inclure les effets des renommages à appliquer, le noeud utilise ensuite `renameId`. De manière similaire à `revertRenameId`, `renameId` génère pour un identifiant donné un nouvel identifiant équivalent à l'époque suivante en se basant sur son prédécesseur. Cependant, il est nécessaire ici de faire une recherche pour déterminer le prédécesseur de l'identifiant donné dans l'*ancien état*. L'*ancien état* étant un tableau trié d'identifiants, il est possible de procéder à une recherche dichotomique. Cela permet de trouver le prédécesseur en $\mathcal{O}(\log n)$, où n correspond ici au nombre d'identifiants composant l'*ancien état*. Comme pour `revertRenameId`, les instructions restantes consistent en des comparaisons et manipulations d'identifiants. La complexité de `renameId` est donc de $\mathcal{O}(\log n)$.

Une fois les identifiants introduits par l'opération *insert* renommés pour l'époque courante, il ne reste plus qu'à les insérer dans la séquence. Cette étape se réalise en $\mathcal{O}(\log b)$ pour chaque identifiant, le temps nécessaire pour trouver son emplacement dans l'arbre AVL.

Ainsi, en reprenant l'ensemble des étapes composant l'intégration de l'opération *insert* distante, nous obtenons la complexité suivante : $\mathcal{O}(h + s \cdot (k + l \cdot \log n + \log b))$.

Le procédé de l'intégration de l'opération *remove* étant similaire à celui de l'opération *insert*, aussi bien en local qu'en distant, nous obtenons les mêmes complexités en temps.

Complexité en temps de l'opération *rename*

L'opération *rename* locale se décompose en 2 étapes :

- (i) La génération de l'*ancien état* à intégrer au message de l'opération (cf. Définition 50, page 72).
- (ii) Le remplacement de la séquence courante par une séquence équivalente, renommée.

La première étape consiste à parcourir la séquence actuelle pour en extraire les intervalles d'identifiants. Elle s'effectue donc en $\mathcal{O}(b)$. La seconde étape consiste à instancier une nouvelle séquence vide, et à y insérer un bloc qui associe le contenu actuel de la séquence à l'intervalle d'identifiants $pos_{0..n-1}^{nodeId\ nodeSeq}$, avec *pos* la position du premier tuple du premier identifiant de l'état, *nodeId* et *nodeSeq* l'identifiant et le numéro de séquence actuel du noeud et n la taille du contenu. Cette seconde étape s'effectue en $\mathcal{O}(1)$. L'opération *rename* locale a donc une complexité de $\mathcal{O}(b)$.

L'intégration de l'opération distante *rename* se décompose en les étapes suivantes :

- (i) L'insertion de la nouvelle époque et de l'*ancien état* associé dans l'*arbre des époques*.
- (ii) La récupération des n identifiants formant l'état courant.
- (iii) Le calcul de l'époque PPAC entre l'époque courante et l'époque cible.
- (iv) L'identification des k opérations *rename* à inverser et des l opérations *rename* à jouer.

- (v) Le renommage de chacun des identifiants à l'aide de `revertRenameId` et `renameId`.
- (vi) L'insertion de chacun des identifiants renommés dans une nouvelle séquence.

L'arbre des époques étant représenté à l'aide d'une table de hachage, la première étape s'effectue en $\mathcal{O}(1)$. La seconde étape nécessite elle de parcourir l'arbre AVL et de convertir chaque intervalle d'identifiants en liste d'identifiants, ce qui nécessite $\mathcal{O}(n)$ instructions.

Les étapes (iii) à (vi) peuvent être effectuées en réutilisant pour chaque identifiant l'algorithme pour l'intégration d'opérations *insert* distantes analysé précédemment. Ces étapes s'effectuent donc en $\mathcal{O}(n \cdot (k + l \cdot \log n + \log b))$.

Nous obtenons donc une complexité en temps de $\mathcal{O}(h + n \cdot (k + l \cdot \log n + \log b))$ pour l'intégration de l'opération *rename* distante.

Nous pouvons néanmoins améliorer ce premier résultat. Notamment, nous pouvons tirer parti des faits suivants :

- (i) Le fonctionnement de `renameId` repose sur l'utilisation de l'identifiant prédecesseur comme préfixe.
- (ii) Les identifiants de l'état courant et de l'*ancien état* forment tous deux des listes triées.

Ainsi, plutôt que d'effectuer une recherche dichotomique sur l'*ancien état* pour trouver le prédecesseur de l'identifiant à renommer, nous pouvons parcourir les deux listes en parallèle. Ceci nous permet de renommer l'intégralité des identifiants en un seul parcours de l'état courant et de l'*ancien état*, c.-à-d. en $\mathcal{O}(n)$ instructions. Ensuite, plutôt que d'insérer les identifiants un à un dans la nouvelle séquence, nous pouvons recomposer au préalable les différents blocs en parcourant la liste des identifiants et en les agrégeant au fur et à mesure. Il ne reste plus qu'à constituer la nouvelle séquence à partir des blocs obtenus. Ces actions s'effectuent respectivement en $\mathcal{O}(n)$ et $\mathcal{O}(b)$ instructions.

Ainsi, ces améliorations nous permettent d'obtenir une complexité en temps en $\mathcal{O}(h + n \cdot (k + l) + b)$ pour le traitement de l'opération *rename* distante.

Récapitulatif

Nous récapitulons les complexités en temps présentées précédemment dans le tableau 3.1.

Complexité en temps du mécanisme de GC des anciens états obsolètes

Pour compléter notre analyse théorique des performances de `RenamableLogootSplit`, nous proposons une analyse en complexité en temps du mécanisme présenté en section 3.3 qui permet de supprimer les époques devenues obsolètes et de récupérer la mémoire occupée par leur *ancien état* respectif.

L'algorithme du mécanisme de récupération de la mémoire se compose des étapes suivantes. Tout d'abord, il établit le vecteur de versions des opérations causalement stables. Pour cela, chaque noeud doit maintenir une matrice des vecteurs de versions de tous les noeuds. L'algorithme génère le vecteur de versions des opérations causalement stable en

TABLE 3.1 – Complexité en temps des différentes opérations

Type d'opération	Complexité en temps	
	Locale	Distante
<i>insert</i>	$\mathcal{O}(\log b)$	$\mathcal{O}(h + s \cdot (k + l \cdot \log n + \log b))$
<i>remove</i>	$\mathcal{O}(\log b)$	$\mathcal{O}(h + s \cdot (k + l \cdot \log n + \log b))$
<i>naive rename</i>	$\mathcal{O}(b)$	$\mathcal{O}(h + n \cdot (k + l \cdot \log n + \log b))$
<i>rename</i>	$\mathcal{O}(b)$	$\mathcal{O}(h + n \cdot (k + l) + b)$

b : nombre de blocs, n : nombre d'éléments de l'état courant et des *anciens états*, h : hauteur de l'*arbre des époques*, k : nombre de renommages à inverser, l : nombre de renommages à appliquer, s : nombre d'éléments insérés/supprimés par l'opération

récupérant pour chaque noeud la valeur minimale qui y est associée dans la matrice des vecteurs de versions. Cette étape correspond à fusionner p vecteurs de versions contenant p entrées, elle s'exécute donc en $\mathcal{O}(p^2)$ instructions.

La seconde étape consiste à parcourir l'arbre des époques de manière inverse à l'ordre défini par la relation *priority*. Ce parcours s'effectue jusqu'à trouver l'époque maximale causalement stable, c.-à-d. la première époque pour laquelle l'opération *rename* associée est causalement stable. Pour chaque époque parcourue, le mécanisme de récupération de mémoire calcule et stocke son chemin jusqu'à la racine. Cette étape s'exécute donc en $\mathcal{O}(e \cdot h)$, avec e le nombre d'époques composant l'arbre des époques et h la hauteur de l'arbre.

À partir de ces chemins, le mécanisme calcule l'époque PPAC. Pour ce faire, l'algorithme calcule de manière successive la dernière intersection entre le chemin de la racine jusqu'à l'époque PPAC courante et les chemins précédemment calculés. L'époque PPAC est la dernière époque du chemin résultant. Cette étape s'exécute aussi en $\mathcal{O}(e \cdot h)$.

L'algorithme peut alors calculer l'ensemble des *époques requises*. Pour cela, il parcourt les chemins calculés au cours de la seconde étape. Pour chaque chemin, il ajoute les époques se trouvant après l'époque PPAC à l'ensemble des *époques requises*. De nouveau, cette étape s'exécute en $\mathcal{O}(e \cdot h)$.

Après avoir déterminé l'ensemble des *époques requises*, le mécanisme peut supprimer les époques obsolètes. Il parcourt l'arbre des époques et supprime toute époque qui n'appartient pas à cet ensemble. Cette étape finale s'exécute en $\mathcal{O}(e)$.

Ainsi, nous obtenons que la complexité en temps du mécanisme de récupération de mémoire des époques est en $\mathcal{O}(p^2 + e \cdot h)$. Nous récapitulons ce résultat dans la tableau 3.2.

Malgré sa complexité en temps, le mécanisme de récupération de mémoire des époques devrait avoir un impact limité sur les performances de l'application. En effet, ce mécanisme n'appartient pas au chemin critique de l'application, c.-à-d. l'intégration des modifications. Il peut être déclenché occasionnellement, en tâche de fond. Nous pouvons même viser des fenêtres spécifiques pour le déclencher, e.g. pendant les périodes d'inactivité. Ainsi, nous avons pas étudié plus en détails cette partie de *RenamableLogootSplit* dans le cadre de cette thèse. Des améliorations de ce mécanisme doivent donc être possibles.

TABLE 3.2 – Complexité en temps du mécanisme de GC des anciens états obsolètes

Étape	Temps
<i>calculer le vecteur de versions des opérations causalement stables</i>	$\mathcal{O}(p^2)$
<i>calculer les chemins de la racine aux</i> potentielles époques courantes	$\mathcal{O}(e \cdot h)$
<i>identifier le PPAC</i>	$\mathcal{O}(e \cdot h)$
<i>calculer l'ensemble des</i> époques requises	$\mathcal{O}(e \cdot h)$
<i>supprimer les époques obsolètes</i>	$\mathcal{O}(e)$
<i>total</i>	$\mathcal{O}(p^2 + e \cdot h)$

p : nombre de noeuds (ou pairs) du système, e : nombre d'époques dans l'*arbre des époques*,
 h : hauteur de l'*arbre des époques*

3.4.2 Expérimentations

Afin de valider l'approche que nous proposons, nous avons procédé à une évaluation expérimentale. Les objectifs de cette évaluation étaient de mesurer :

- (i) Le surcoût mémoire de la séquence répliquée.
- (ii) Le surcoût en calculs ajouté aux opérations *insert* et *remove* par le mécanisme de renommage.
- (iii) Le coût d'intégration des opérations *rename*.

Pour produire le jeu de données nécessaire à nos benchmarks, c.-à-d. des instantanés de l'état de séquences répliquées à différents stades de leur vie ainsi que les logs d'opérations correspondant, nous avons mené des simulations de sessions d'édition collaborative. Ces simulations suivaient le scénario suivant.

Scénario d'expérimentation

Le scénario reproduit la rédaction d'un article par plusieurs pairs de manière collaborative, en temps réel. La collaboration ainsi décrite se décompose en 2 phases.

Dans un premier temps, les pairs spécifient principalement le contenu de l'article. Quelques opérations *remove* sont tout même générées pour simuler des fautes de frappes. Une fois que le document atteint une taille critique (définie de manière arbitraire), les pairs passent à la seconde phase de la collaboration. Lors de cette seconde phase, les pairs arrêtent d'ajouter du nouveau contenu mais se concentre à la place sur la reformulation et l'amélioration du contenu existant. Ceci est simulé en équilibrant le ratio entre les opérations *insert* et *remove*.

Chaque pair doit émettre un nombre donné d'opérations *insert* et *remove*. La simulation prend fin une fois que tous les pairs ont reçu toutes les opérations. Pour suivre l'évolution de l'état des pairs, nous prenons des instantanés de leur état à plusieurs points donnés de la simulation.

Implémentation des simulations

Nous avons effectué nos simulations avec les paramètres expérimentaux suivants : nous avons déployé 10 agents à l'aide de conteneurs Docker sur une même machine. Chaque

conteneur correspond à un processus Node.js mono-threadé et permet de simuler un pair. Les agents sont connectés entre eux par le biais d'un réseau P2P maillé entièrement connecté. Enfin, ils partagent et éditent le document de manière collaborative en utilisant soit LogootSplit soit RenamableLogootSplit en fonction des paramètres de la session.

Toutes les 200 ± 50 ms, chaque agent génère localement une opération *insert* ou *remove* et la diffuse immédiatement aux autres noeuds. Au cours de la première phase, la probabilité d'émettre une opération *insert* (resp. *remove*) est de 80% (resp. 20%). Une fois que leur copie locale du document atteint 60k caractères (environ 15 pages), les agents basculent dans la seconde phase et redéfinissent chaque probabilité à 50%. De plus, tout au long de la collaboration, les agents ont une probabilité de 5% de déplacer leur curseur à une position aléatoire dans le document après chaque opération locale.

Chaque agent doit générer 15k opérations *insert* ou *remove*, et s'arrête donc une fois qu'il a intégré les 150k opérations. Pour chaque agent, nous enregistrons un instantané de son état toutes les 10k opérations intégrées. Nous enregistrons aussi son journal des opérations à l'issue de la simulation.

De plus, dans le cas de RenamableLogootSplit, 1 à 4 agents sont désignés de façon arbitraire comme des *renaming bots* en fonction de la session. Le rôle des *renaming bots* est générer des opérations *rename* toutes les 7.5k ou toutes les 30k opérations qu'ils observent, en fonction des paramètres de la simulation. Ces opérations *rename* sont générées de manière à assurer qu'elles soient concurrentes.

Dans un but de reproductibilité, nous avons mis à disposition notre code, nos benchmarks et les résultats à l'adresse suivante :

<https://github.com/coast-team/mute-agent-random/>.

3.4.3 Résultats

En utilisant les instantanés et les logs d'opérations générés, nous avons effectué plusieurs benchmarks. Ces benchmarks évaluent les performances de RenamableLogootSplit et les comparent à celles de LogootSplit. Sauf mention contraire, les benchmarks utilisent les données issues des simulations au cours desquelles les opérations *rename* étaient générées toutes les 30k opérations. Les résultats sont présentés et analysés ci-dessous.

Convergence

Nous avons tout d'abord vérifié la convergence de l'état des noeuds à l'issue des simulations. Pour chaque simulation, nous avons comparé l'état final de chaque noeud à l'aide de leur instantanés respectifs. Nous avons pu confirmer que les noeuds convergèrent sans aucune autre forme de communication que les opérations, satisfaisant donc le modèle de la Cohérence forte à terme (SEC) [19].

Ce résultat établit un premier jalon dans la validation de la correction de RenamableLogootSplit. Il n'est cependant qu'empirique. Des travaux supplémentaires pour prouver formellement sa correction doivent être entrepris.

Consommation mémoire

Nous avons ensuite procédé à l'évaluation de l'évolution de la consommation mémoire du document au cours des simulations, en fonction du CRDT utilisé et du nombre de *renaming bots*. Nous présentons les résultats obtenus dans la figure 3.12.

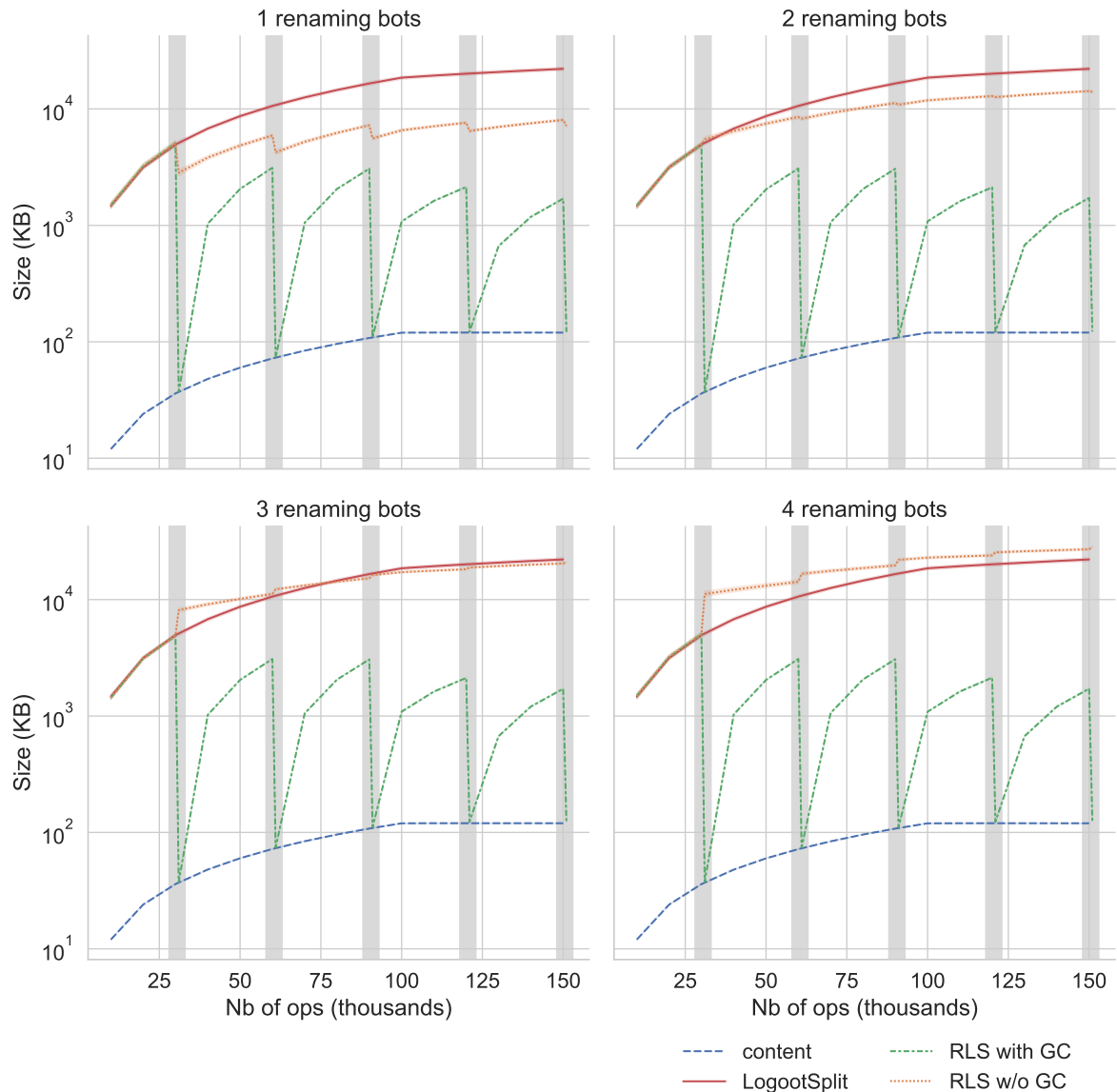


FIGURE 3.12 – Évolution de la taille du document en fonction du CRDT utilisé et du nombre de *renaming bots* dans la collaboration

Pour chaque graphique dans la figure 3.12, nous représentons les données suivantes. Les barres grises représentent quand des opérations *rename* sont effectuées, c.-à-d. aux paliers de 30k, 60k, 90k, 120k et 150k opérations. La ligne tiretée bleue correspond à la taille du contenu du document, c.-à-d. du texte, tandis que la ligne continue rouge

représente la taille complète du document LogootSplit.

La ligne verte pointillée-tirée représente la taille du document RenamableLogootSplit dans son meilleur cas. Dans ce scénario, les noeuds considèrent que les opérations *rename* sont causalement stables dès qu'ils les reçoivent. Les noeuds peuvent alors bénéficier des effets du mécanisme de renommage tout en supprimant les métadonnées qu'il introduit : les *anciens états* et époques. Ce faisant, les noeuds peuvent minimiser de manière périodique le surcoût en métadonnées de la structure de données, indépendamment du nombre de *renaming bots* et d'opérations *rename* concurrentes générées.

La ligne pointillée orange représente la taille du document RenamableLogootSplit dans son pire cas. Dans ce scénario, les noeuds considèrent que les opérations *rename* ne deviennent jamais causalement stables. Les noeuds doivent alors conserver de façon permanente les métadonnées introduites par le mécanisme de renommage. Les performances de RenamableLogootSplit diminuent donc au fur et à mesure que le nombre de *renaming bots* et d'opérations *rename* générées augmente. Néanmoins, même dans ces conditions, nous observons que RenamableLogootSplit offre de meilleures performances que LogootSplit tant que le nombre de *renaming bots* reste faible (1 ou 2). Ce résultat s'explique par le fait que le mécanisme de renommage permet aux noeuds de supprimer les métadonnées de la structure de données utilisée en interne pour représenter la séquence (c.-à-d. l'arbre AVL).

Pour récapituler les résultats présentés, le mécanisme de renommage introduit un surcoût temporaire en métadonnées qui augmente avec chaque opération *rename*. Mais ce surcoût se résorbe à terme une fois que le système devient quiescent et que les opérations *rename* deviennent causalement stables. Pour être précis, l'utilisation du mécanisme de renommage puis la suppression des métadonnées de ce dernier permet à RenamableLogootSplit de minimiser les métadonnées de la séquence répliquée, c.-à-d. de ne conserver qu'une seule époque dans son arbre des époques et d'associer qu'un unique intervalle d'identifiants à l'ensemble des éléments de la séquence. RenamableLogootSplit obtient ainsi, d'après nos mesures, une empreinte en métadonnées 100 fois inférieure à celle de LogootSplit.

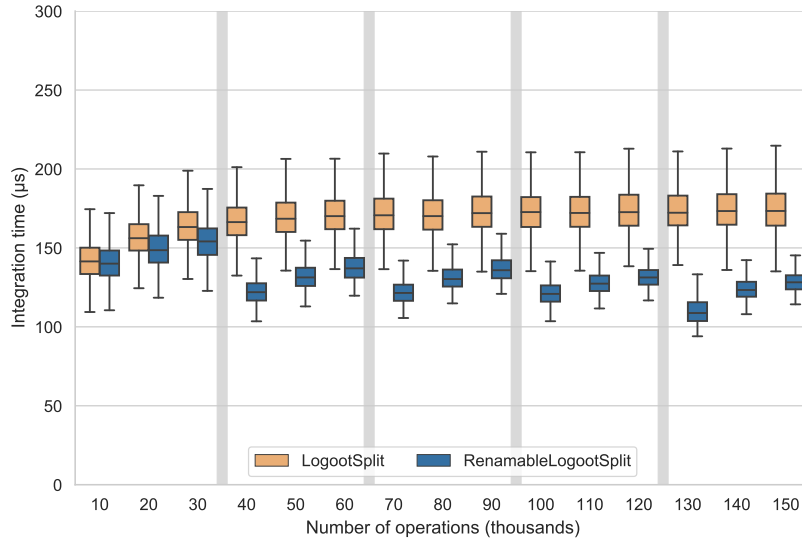
Il convient de noter que la stabilité causale peut être difficile à atteindre dans un système pair-à-pair dynamique, e.g. en cas d'absence prolongée d'un des pairs. Afin de limiter l'impact de l'accumulation de métadonnées du mécanisme de renommage sur la séquence répliquée, nous proposons que les *anciens états* soient déchargés sur le disque en attendant que la stabilité causale soit atteinte. Nous détaillons cette suggestion dans la sous-section 3.5.2.

Temps d'intégration des opérations d'insertion et de suppression

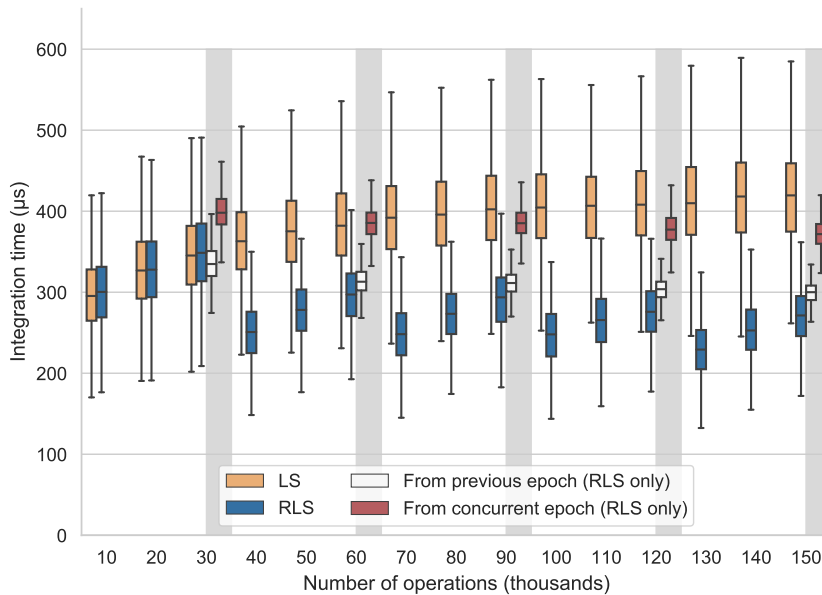
Nous avons ensuite comparé l'évolution du temps d'intégration des opérations standards, c.-à-d. les opérations *insert* et *remove*³², sur des documents LogootSplit et RenamableLogootSplit. Puisque nous nous intéressons au surcoût introduit par le mécanisme de renommage, c.-à-d. par le système d'époques et le renommage éventuel d'identifiants, nous ne mesurons uniquement que le temps d'intégration des opérations, c.-à-d. le temps

³². Puisque les opérations *insert* et *remove* partagent la même complexité en temps (cf. sous-section 3.4.1, page 91), nous avons seulement utilisé des opérations *insert* dans nos benchmarks.

mis par la séquence répliquée pour appliquer une modification donnée. La figure 3.13 présente les résultats obtenus.



(a) Modifications locales



(b) Modifications distantes

FIGURE 3.13 – Temps d'intégration des opérations standards

Les complexités en temps des algorithmes d'intégration des opérations étant différentes selon que l'opération soit *locale* ou *distante*, c.-à-d. soit issue du noeud lui-même ou provenant d'un autre noeud (cf. sous-section 3.4.1, page 91), nous distinguons les temps obtenus selon ce paramètre. Ainsi, nous représentons l'évolution du temps d'intégration des opérations *locales* et *distantes* dans les figures 3.13a et 3.13b respectivement.

De la même manière que dans la figure 3.12, les barres grises délimitent quand des

opérations *rename* sont effectuées. Les boxplots oranges correspondent aux temps d'intégration sur des documents `LogootSplit`, les boxplots bleues sur des documents `RenamableLogootSplit`. Bien que les temps d'intégration soient initialement équivalents, les temps d'intégration sur des documents `RenamableLogootSplit` sont ensuite réduits par rapport à ceux de `LogootSplit` une fois que des opérations *rename* ont été intégrées. Cette amélioration s'explique par le fait que l'opération *rename* optimise la représentation interne de la séquence (c.-à-d. elle réduit le nombre de blocs stockés dans l'arbre AVL).

Dans le cadre des opérations distantes, nous avons mesuré des temps d'intégration spécifiques à `RenamableLogootSplit` : le temps d'intégration d'opérations distantes provenant d'époques *parentes* et d'époques *soeurs*, respectivement affiché sous la forme de boxplots blanches et rouges dans la Figure 3.13b.

Les opérations distantes provenant d'époques *parentes* sont des opérations générées de manière concurrente à l'opération *rename* mais appliquées après cette dernière. Puisque l'opération doit être transformée au préalable en utilisant `renameId`, nous observons un surcoût computationnel par rapport aux autres opérations. Mais ce surcoût est compensé par l'optimisation de la représentation interne de la séquence effectuée par l'opération *rename*.

Concernant les opérations provenant d'époques *soeurs*, nous observons de nouveau un surcoût puisque les noeuds doivent tout d'abord annuler les effets de l'opération *rename* concurrente en utilisant `revertRenameId`. À cause de cette étape supplémentaire, les performances de `RenamableLogootSplit` pour ces opérations sont comparables à celles de `LogootSplit`.

Pour récapituler, les fonctions de transformation ajoutent un surcoût aux temps d'intégration des opérations concurrentes aux opérations *rename*. Malgré ce surcoût, `RenamableLogootSplit` offre de meilleures performances que `LogootSplit` pour intégrer ces opérations grâce aux réductions de la taille de l'état effectuées par les opérations *rename*. Cependant, cette affirmation n'est vraie que tant que la distance entre l'époque de génération de l'opération et l'époque courante du noeud reste limitée, puisque les performances de `RenamableLogootSplit` dépendent linéairement de cette dernière (cf. tableau 3.1, page 95). Néanmoins, ce surcoût ne concerne que les opérations concurrentes aux opérations *rename*. Il ne concerne pas la majorité des opérations, c.-à-d. les opérations générées entre deux séries d'opérations *rename*. Ces opérations, elles, ne souffrent d'aucun surcoût tout en bénéficiant des réductions de taille de l'état.

Temps d'intégration de l'opération de renommage

Finalement, nous avons mesuré l'évolution du temps d'intégration de l'opération *rename* en fonction du nombre d'opérations émises précédemment, c.-à-d. en fonction de la taille de l'état. Comme précédemment, nous distinguons les performances des modifications *locales* et *distantes*.

Nous rappelons que le traitement d'une opération *rename* dépend de l'ordre défini par la relation *priority* entre l'époque qu'elle introduit et l'époque courante du noeud qui intègre l'opération. Le cas des opérations *rename* distantes se décompose donc en trois catégories.

- (i) Les opérations *distantes directes* désignent les opérations *rename* distantes qui introduisent une nouvelle époque *enfant* de l'époque courante du noeud.
- (ii) (resp. (iii)) Les opérations *concurrentes introduisant une époque plus* (resp. *moins prioritaire*) désignent les opérations *rename* qui introduisent une époque *soeur* de l'époque courante du noeud. D'après la relation *priority*, l'époque introduite par l'opération concurrente est plus (resp. moins) prioritaire que l'époque courante du noeud.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.3.

TABLE 3.3 – Temps d'intégration de l'opération *rename*

Type	Paramètres	Temps d'intégration (ms)					
	Nb Ops (k)	Moyenne	Médiane	IQR	1 ^{er} Percent.	99 ^{ème} Percent.	
Locale	30	41.8	38.7	5.66	37.3	71.7	
	60	78.3	78.2	1.58	76.2	81.4	
	90	119	119	2.17	116	124	
	120	144	144	3.24	139	149	
	150	158	158	3.71	153	164	
Distante directe	30	481	477	15.2	454	537	
	60	982	978	28.9	926	1073	
	90	1491	1482	58.8	1396	1658	
	120	1670	1664	41	1568	1814	
	150	1694	1676	60.6	1591	1853	
Cc. int. époque plus prioritaire	30	644	644	16.6	620	683	
	60	1318	1316	26.5	1263	1400	
	90	1998	1994	46.6	1906	2112	
	120	2240	2233	54	2144	2368	
	150	2242	2234	63.5	2139	2351	
Cc. int. époque moins prioritaire	30	1.36	1.3	0.038	1.22	3.53	
	60	2.82	2.69	0.476	2.43	4.85	
	90	4.45	4.23	1.1	3.69	5.81	
	120	5.33	5.1	1.34	4.42	8.78	
	150	5.53	5.26	1.05	4.84	8.7	

Le principal résultat de ces mesures est que les opérations *rename* sont particulièrement coûteuses quand comparées aux autres types d'opérations. Les opérations *rename* locales s'intègrent en centaines de millisecondes tandis que les opérations *distantes directes* et *concurrentes introduisant une époque plus prioritaire* s'intègrent en secondes lorsque la taille du document dépasse 40k éléments. Ces résultats s'expliquent facilement par la complexité en temps de l'opération *rename* qui dépend supra-linéairement du nombre de blocs et d'éléments stockés dans l'état (cf. tableau 3.1, page 95). Il est donc nécessaire de prendre en compte ce résultat et de

- (i) Concevoir des stratégies de génération des opérations *rename* pour éviter d'impacter négativement l'expérience utilisateur.
- (ii) Proposer des versions améliorées des algorithmes `renameId` et `revertRenameId` pour réduire ces temps d'intégration.

Nous identifions plusieurs pistes d'amélioration de `renameId` et `revertRenameId` :

- (i) Au lieu d'utiliser `renameId`, qui renomme l'état identifiant par identifiant, nous pourrions définir et utiliser `renameBlock`. Cette fonction permettrait de renommer l'état bloc par bloc, offrant ainsi une meilleur complexité en temps. De plus, puisque

les opérations *rename* fusionnent les blocs existants en un unique bloc, `renameBlock` permettrait de mettre en place un cercle vertueux où chaque opération *rename* réduirait le temps d'exécution de la suivante.

- (ii) Puisque chaque appel à `revertRenameId` et `revertRenameId` est indépendant des autres, ces fonctions sont adaptées à la programmation parallèle. Au lieu de renommer les identifiants (ou blocs) de manière séquentielle, nous pourrions diviser la séquence en plusieurs parties et les renommer en parallèle.

Un autre résultat intéressant de ces benchmarks est que les opérations *concurrentes introduisant une époque moins prioritaire* sont rapides à intégrer. Puisque ces opérations introduisent une époque qui n'est pas sélectionnée comme nouvelle époque cible, les noeuds ne procèdent pas au renommage de leur état. L'intégration des opérations *concurrentes introduisant une époque moins prioritaire* consiste simplement à ajouter l'époque introduite et l'*ancien état* correspondant à l'*arbre des époques*. Les noeuds peuvent donc réduire de manière significative le coût d'intégration d'un ensemble d'opérations *rename* concurrentes en les appliquant dans l'ordre le plus adapté en fonction du contexte. Nous développons ce sujet dans la sous-section 3.5.5.

Temps pour rejouer le journal des opérations

Afin de comparer les performances de `RenamableLogootSplit` et de `LogootSplit` de manière globale, nous avons mesuré le temps nécessaire pour un nouveau noeud pour rejouer l'entièreté du journal des opérations d'une session de collaboration, en fonction du nombre de *renaming bots* de la session. Nous présentons les résultats obtenus dans la figure 3.14.

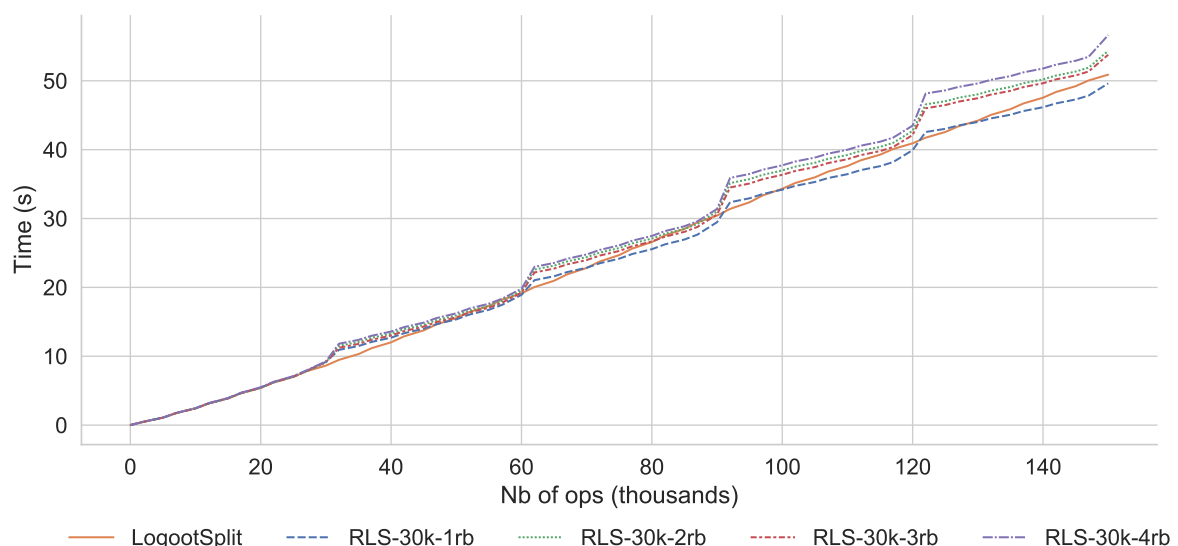


FIGURE 3.14 – Progression du nombre d'opérations du journal rejouées en fonction du temps

Nous observons que le gain sur le temps d'intégration des opérations *insert* et *remove* permet initialement de contrebalancer le surcoût des opérations *rename*. Mais au fur et à mesure que la collaboration progresse, le temps nécessaire pour intégrer les opérations *rename* augmente car plus d'éléments sont impliqués. Cette tendance est accentuée dans les scénarios avec des opérations *rename* concurrentes.

Dans un cas réel d'utilisation, ce scénario (c.-à-d. rejouer l'entièreté du log) ne correspond pas au scénario principal et peut être mitigé, par exemple en utilisant un mécanisme de compression du journal des opérations. Dans la sous-section 3.5.6, nous présentons comment mettre en place un tel mécanisme en se basant justement sur les possibilités offertes par l'opération *rename*.

Impact de la fréquence de l'opération de renommage sur les performances

Pour évaluer l'impact de la fréquence de l'opération *rename* sur les performances, nous avons réalisé un benchmark supplémentaire. Ce benchmark consiste à rejouer les logs d'opérations des simulations en utilisant divers CRDTs et configurations : LogootSplit, RenamableLogootSplit effectuant des opérations *rename* toutes les 30k opérations, RenamableLogootSplit effectuant des opérations *rename* toutes les 7.5k opérations. Au fur et à mesure que le benchmark rejoue le journal des opérations, il mesure le temps d'intégration des opérations ainsi que leur taille. Nous présentons les résultats obtenus dans le tableau 3.4 et le tableau 3.5.

Paramètres		Temps d'intégration (μ s)				
Type	CRDT	Moyenne	Médiane	IQR	1 ^{er} Percent.	99 ^{ème} Percent.
insert	LS	471	460	130	224	768
	RLS - 30k	397	323	66.7	171	587
	RLS - 7.5k	393	265	54.5	133	381
remove	LS	280	270	71.4	140	435
	RLS - 30k	247	181	39	97.9	308
	RLS - 7.5k	296	151	34.8	74.9	214

Paramètres		Temps d'intégration (ms)				
Type	CRDT	Moyenne	Médiane	IQR	1 ^{er} Percent.	99 ^{ème} Percent.
rename	RLS - 30k	1022	1188	425	540	1276
	RLS - 7.5k	861	974	669	123	1445

TABLE 3.4 – Temps d'intégration par type et par fréquence d'opérations *rename*

D'après les résultats du tableau 3.4, nous observons que des opérations *rename* plus fréquentes permettent d'améliorer les temps d'intégration des opérations *insert* et *remove*. Cela confirme les résultats attendus puisque l'opération *rename* réduit la taille des identifiants de la structure ainsi que le nombre de blocs composant la séquence.

Nous remarquons aussi que la fréquence n'a aucun impact significatif sur le temps d'intégration des opérations *rename*. Il s'agit là aussi d'un résultat attendu puisque la complexité en temps de l'implémentation de l'opération *rename* dépend du nombre d'éléments dans la séquence, un facteur qui n'est pas impacté par les opérations *rename*.

Paramètres		Taille (o)				
Type	CRDT	Moyenne	Médiane	IQR	1 ^{er} Percent.	99 ^{ème} Percent.
insert	LS	593	584	184	216	1136
	RLS - 30k	442	378	92	314	958
	RLS - 7.5k	389	378	0	314	590
remove	LS	632	618	184	250	1170
	RLS - 30k	434	412	0	320	900
	RLS - 7.5k	401	412	0	320	596

Paramètres		Taille (Ko)				
Type	CRDT	Moyenne	Médiane	IQR	1 ^{er} Percent.	99 ^{ème} Percent.
rename	RLS - 30k	1366	1258	514	635	3373
	RLS - 7.5k	273	302	132	159	542

TABLE 3.5 – Taille des opérations par type et par fréquence d’opérations *rename*

Le tableau 3.5 permet d’observer que les opérations *insert* et *remove* de *RenamableLogootSplit* sont initialement plus lourdes que les opérations correspondantes de *LogootSplit*. Ce résultat s’explique de part le fait qu’elles intègrent leur époque de génération comme donnée additionnelle. Mais alors que la taille des opérations de *LogootSplit* augmentent indéfiniment, celle des opérations de *RenamableLogootSplit* est bornée. La valeur de cette borne est définie par la fréquence de l’opération *rename*. Cela permet à *RenamableLogootSplit* d’atteindre un coût moindre par opération.

D’un autre côté, le coût des opérations *rename* est bien plus important (1000x) que celui des autres types d’opérations. Ceci s’explique par le fait que l’opération *rename* intègre l’*ancien état*, c.-à-d. la liste de tous les blocs composant l’état de la séquence au moment de la génération de l’opération. Cependant, nous observons le même phénomène pour les opérations *rename* que pour les autres opérations : la fréquence des opérations *rename* permet d’établir une borne pour la taille des opérations *rename*. Nous pouvons donc choisir d’émettre fréquemment des opérations *rename* pour limiter leur taille respective. Ceci implique néanmoins un surcoût en calculs pour chaque opération *rename* dans l’implémentation actuelle. Nous présentons une autre approche possible pour limiter la taille des opérations *rename* dans la sous-section 3.5.3. Cette approche consiste à implémenter un mécanisme de compression pour les opérations *rename* pour ne transmettre que les composants nécessaires à l’identifiant de chaque bloc de l’*ancien état*.

3.5 Discussion

3.5.1 Stratégie de génération des opérations de renommage

Les opérations *rename* sont des opérations systèmes. C’est donc aux concepteurs de systèmes qu’incombe la responsabilité de déterminer quand les noeuds devraient générer des opérations *rename* et de définir une stratégie correspondante. Il n’existe cependant pas de solution universelle, chaque système ayant ses particularités et contraintes.

Plusieurs aspects doivent être pris en compte lors de la définition de la stratégie de génération des opérations *rename*. Le premier porte sur la taille de la structure de données. Comme illustré dans la figure 3.12 (cf. section 3.4.3, page 98), les métadonnées augmentent de manière progressive jusqu'à représenter 99% de la structure de données. En utilisant les opérations *rename*, les noeuds peuvent supprimer les métadonnées et ainsi réduire la taille de la structure à un niveau acceptable. Pour déterminer quand générer des opérations *rename*, les noeuds peuvent donc monitorer le nombre d'opérations effectuées depuis la dernière opération *rename*, le nombre de blocs qui composent la séquence ou encore la taille des identifiants.

Un second aspect à prendre en compte est le temps d'intégration des opérations *rename*. Comme indiqué dans le tableau 3.3 (cf. section 3.4.3, page 101), l'intégration des opérations *rename* distantes peut nécessiter des secondes si elles sont retardées trop longtemps. Bien que les opérations *rename* travaillent en coulisses, elles peuvent néanmoins impacter négativement l'expérience utilisateur. Notamment, les noeuds ne peuvent pas intégrer d'autres opérations *distantes* tant qu'ils sont en train de traiter des opérations *rename*. Du point de vue des utilisateurs, les opérations *rename* peuvent alors être perçues comme des pics de latence. Dans le domaine de l'édition collaborative temps réel, IGNAT et al. [85, 86] ont montré que le délai dégradait la qualité des collaborations. Il est donc important de générer fréquemment des opérations *rename* pour conserver leur temps d'intégration sous une limite perceptible.

Finalement, le dernier aspect à considérer est le nombre d'opérations *rename* concurrentes. La figure 3.12 montre que les opérations *rename* concurrentes accroissent la taille de la structure de données tandis que la figure 3.14 (cf. section 3.4.3, page 103) illustre qu'elles augmentent le temps nécessaire pour rejouer le journal des opérations. La stratégie proposée doit donc viser à minimiser le nombre d'opérations *rename* concurrentes générées. Cependant, elle doit éviter d'utiliser des coordinations synchrones entre les noeuds pour cela (e.g. algorithmes de consensus), pour des raisons de performances. Pour réduire la probabilité de générer des opérations *rename* concurrentes, plusieurs méthodes peuvent être proposées. Par exemple, les noeuds peuvent monitorer à quels autres noeuds ils sont connectés actuellement et déléguer au noeud ayant le plus grand *identifiant de noeud* la responsabilité de générer les opérations *rename*.

Pour récapituler, nous pouvons proposer plusieurs stratégies de génération des opérations *rename*, pour minimiser de manière individuelle chacun des paramètres présentés. Mais bien que certaines de ces stratégies convergent (minimiser la taille de la structure de données et minimiser le temps d'intégration des opérations *rename*), d'autres entrent en conflit (générer une opération *rename* dès qu'un seuil est atteint vs. minimiser le nombre d'opérations *rename* concurrentes générées). Les concepteurs de systèmes doivent proposer un compromis entre les différents paramètres en fonction des contraintes du système concerné (application temps réel ou asynchrone, limitations matérielles des noeuds...). Il est donc nécessaire d'analyser le système pour évaluer ses performances sur chaque aspect, ses usages et trouver le bon compromis entre tous les paramètres de la stratégie de renommage. Par exemple, dans le contexte des systèmes d'édition collaborative temps réel, [85] a montré que le délai diminue la qualité de la collaboration. Dans de tels systèmes, nous viserions donc à conserver le temps d'intégration des opérations (en incluant

les opérations *rename*) en dessous du temps limite correspondant à leur perception par les utilisateurs.

3.5.2 Stockage des états précédents sur disque

Les noeuds doivent conserver les *anciens états* associés aux opérations *rename* pour transformer les opérations issues d'époques précédentes ou concurrentes. Les noeuds peuvent recevoir de telles opérations dans deux cas précis :

- (i) Des noeuds ont émis récemment des opérations *rename*.
- (ii) Des noeuds se sont récemment reconnectés.

Entre deux de ces événements spécifiques, les *anciens états* ne sont pas nécessaires pour traiter les opérations.

Nous pouvons donc proposer l'optimisation suivante : décharger les *anciens états* sur le disque jusqu'à leur prochaine utilisation ou jusqu'à ce qu'ils puissent être supprimés de manière sûre. Décharger les *anciens états* sur le disque permet de mitiger le surcoût en mémoire introduit par le mécanisme de renommage. En échange, cela augmente le temps d'intégration des opérations nécessitant un *ancien état* qui a été déchargé précédemment.

Les noeuds peuvent adopter différentes stratégies, en fonction de leurs contraintes, pour déterminer les *anciens états* comme déchargeables et pour les récupérer de manière préemptive. La conception de ces stratégies peut reposer sur différentes heuristiques : les époques des noeuds actuellement connectés, le nombre de noeuds pouvant toujours émettre des opérations concurrentes, le temps écoulé depuis la dernière utilisation de l'*ancien état*...

3.5.3 Compression et limitation de la taille de l'opération de renommage

Pour limiter la consommation en bande passante des opérations *rename*, nous proposons la technique de compression suivante. Au lieu de diffuser les identifiants complets formant l'*ancien état*, les noeuds peuvent diffuser seulement les éléments nécessaires pour identifier de manière unique les intervalles d'identifiants. En effet, un identifiant peut être caractérisé de manière unique par le triplet composé de l'*identifiant de noeud*, du *numéro de séquence* et de l'*offset* de son dernier tuple. Par conséquent, un intervalle d'identifiants peut être identifié de manière unique à partir du triplet signature de son identifiant de début et de sa longueur, c.-à-d. du quadruplet $\langle nodeId, nodeSeq, offsetBegin, offsetEnd \rangle$. Cette méthode nous permet de réduire les données à diffuser dans le cadre de l'opération *rename* à un montant fixe par intervalle.

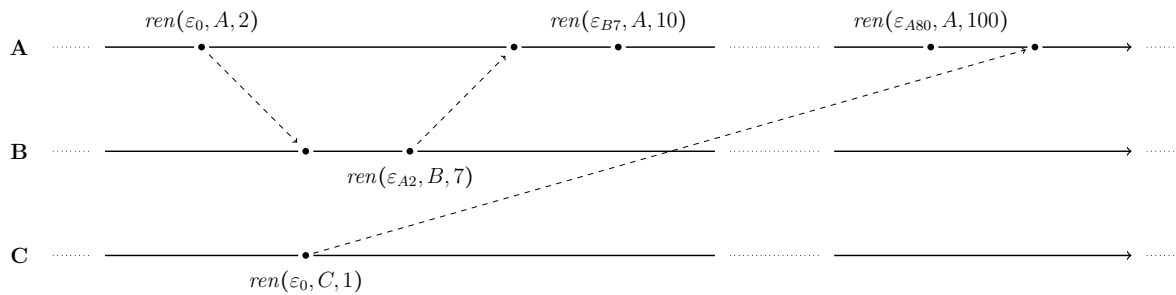
Pour décompresser l'opération reçue, les noeuds doivent reformer les intervalles d'identifiants correspondant aux quadruplets reçus. Pour cela, ils parcourent leur état. Lorsqu'ils rencontrent un identifiant partageant le même couple $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$ qu'un des intervalles de l'opération *rename*, les noeuds disposent de l'ensemble des informations requises pour le reconstruire. Cependant, certains couples $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$ peuvent avoir été supprimés en concurrence et ne plus être présents dans la séquence. Dans ce cas, il est

nécessaire de parcourir le journal des opérations *remove* concurrentes pour retrouver les identifiants correspondants et reconstruire l'opération *rename* originale.

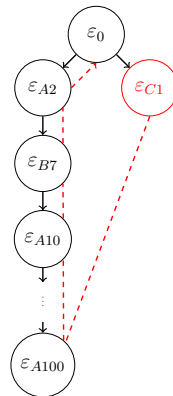
Grâce à cette méthode de compression, nous pouvons instaurer une taille maximale à l'opération *rename*. En effet, les noeuds peuvent émettre une opération *rename* dès que leur état courant atteint un nombre donné d'intervalles d'identifiants, bornant ainsi la taille du message à diffuser.

3.5.4 Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements

Bien que la relation *priority* proposée dans ce manuscrit soit simple et garantisse que tous les noeuds désignent la même époque comme époque cible (cf. sous-section 3.2.2, page 80), elle introduit un surcoût computationnel significatif dans certains cas. La figure 3.15 présente un tel cas.



(a) Exécution d'opérations *rename* concurrentes



(b) Arbre des époques final correspondant avec la relation *priority* illustrée

FIGURE 3.15 – Livraison d'une opération *rename* d'un noeud

Dans cet exemple, les noeuds A et B éditent en collaboration un document. Au fur et à mesure de leur collaboration, ils effectuent plusieurs opérations *rename*. Cependant, après un nombre conséquent de modifications de leur part, un autre noeud C se reconnecte. Celui-ci leur transmet sa propre opération *rename*, concurrente à toutes leurs opérations. D'après la relation *priority*, nous avons $\varepsilon_0 <_{\varepsilon} \varepsilon_{A2} <_{\varepsilon} \dots <_{\varepsilon} \varepsilon_{A100} <_{\varepsilon} \varepsilon_{C1}$. La nouvelle

époque cible étant ε_{C1} , les noeuds A et B doivent pour l'atteindre annuler successivement l'ensemble des opérations *rename* composant leur branche de l'*arbre des époques*. Ainsi, un noeud isolé peut forcer l'ensemble des noeuds à effectuer un lourd calcul. Il serait plus efficace que, dans cette situation, ce soit seulement le noeud isolé qui doive se mettre à jour.

La relation *priority* devrait donc être conçue pour garantir la convergence des noeuds, mais aussi pour minimiser les calculs effectués globalement par les noeuds du système. Pour concevoir une relation *priority* efficace, nous pourrions incorporer dans les opérations *rename* des métriques qui représentent l'état du système et le travail accumulé sur le document (nombre de noeuds actuellement à l'époque *parente*, nombre d'opérations générées depuis l'époque *parente*, taille du document...). De cette manière, nous pourrions favoriser la branche de l'*arbre des époques* regroupant les collaborateurs les plus actifs et empêcher les noeuds isolés d'imposer leurs opérations *rename*.

Afin d'offrir une plus grande flexibilité dans la conception de la relation *priority*, il est nécessaire de retirer la contrainte interdisant aux noeuds de rejouer une opération *rename*. Pour cela, un couple de fonctions réciproques doit être proposée pour `renameId` et `revertRenameId`. Une solution alternative est de proposer une implémentation du mécanisme de renommage qui repose sur les identifiants originaux plutôt que sur ceux transformés, par exemple en utilisant le journal des opérations.

3.5.5 Report de la transition vers la nouvelle époque cible

Comme illustré par le tableau 3.3 (cf. section 3.4.3, page 101), intégrer des opérations *rename* distantes est généralement coûteux. Ce traitement peut générer un surcoût computationnel significatif en cas de multiples opérations *rename* concurrentes. En particulier, un noeud peut recevoir et intégrer les opérations *rename* concurrentes dans l'ordre inverse défini par la relation *priority* sur leur époques. Dans ce scénario, le noeud considérerait chaque nouvelle époque introduite comme la nouvelle époque cible et renommerait son état en conséquence à chaque fois.

En cas d'un grand nombre d'opérations *rename* concurrentes, nous proposons que les noeuds retardent le renommage de leur état vers l'époque cible jusqu'à ce qu'ils aient obtenu un niveau de confiance donné en l'époque cible. Ce délai réduit la probabilité que les noeuds effectuent des traitements inutiles. Plusieurs stratégies peuvent être proposées pour calculer le niveau de confiance en l'époque cible. Ces stratégies peuvent reposer sur une variété de métriques pour produire le niveau de confiance, tel que le temps écoulé depuis que le noeud a reçu une opération *rename* concurrente et le nombre de noeuds en ligne qui n'ont pas encore reçu l'opération *rename*.

Durant cette période d'incertitude introduite par le report, les noeuds peuvent recevoir des opérations provenant d'époques différentes, notamment de l'époque cible. Néanmoins, les noeuds peuvent toujours intégrer les opérations *insert* et *remove* en utilisant `renameId` et `revertRenameId` au prix d'un surcoût computationnel pour chaque identifiant. Cependant, ce coût est négligeable (plusieurs centaines de microsecondes par identifiant d'après la Figure 3.13b (cf. section 3.4.3, page 99)) comparé au coût de renommer, de manière

inutile, complètement l'état (plusieurs centaines de millisecondes à des secondes complètes d'après le tableau 3.3).

Notons que ce mécanisme nécessite que `renameId` et `revertRenameId` soient des fonctions réciproques. En effet, au cours de la période d'incertitude, un noeud peut avoir à utiliser `revertRenameId` pour intégrer les identifiants d'opérations *insert* distantes provenant de l'époque cible. Ensuite, le noeud peut devoir renommer son état vers l'époque cible une fois que celle-ci a obtenu le niveau de confiance requis. Il s'ensuit que `renameId` doit restaurer les identifiants précédemment transformés par `revertRenameId` à leur valeur initiale pour garantir la convergence.

3.5.6 Utilisation de l'opération de renommage comme mécanisme de compression du journal des opérations

Lorsqu'un nouveau pair rejoint la collaboration, il doit tout d'abord récupérer l'état courant du document avant de pouvoir participer. Le nouveau pair utilise un mécanisme d'anti-entropie [53] pour récupérer l'ensemble des opérations via un autre pair. Puis il reconstruit l'état courant en appliquant successivement chacune des opérations. Ce processus peut néanmoins s'avérer coûteux pour les documents comprenant des milliers d'opérations.

Pour pallier ce problème, des mécanismes de compression du journal ont été proposés dans la littérature. Les approches présentées dans [90, 91] consistent à remplacer un sous-ensemble des opérations du journal par une opération équivalente, par exemple en agrégeant les opérations *insert* adjacentes. Une autre approche, présentée dans [43], définit une relation *obsolete* sur les opérations. La relation *obsolete* permet de spécifier qu'une nouvelle opération rend obsolètes des opérations précédentes et permet de les retirer du log. Pour donner un exemple, une opération d'ajout d'un élément donné dans un AW-Set CRDT rend obsolètes toutes les opérations précédentes d'ajout et de suppression de cet élément.

Dans notre contexte, il est intéressant de noter que l'opération *rename* peut endosser un rôle comparable à ces mécanismes de compression du log. En effet, l'opération *rename* prend un état donné, somme des opérations passées, et génère en retour un nouvel état équivalent et compacté. Une opération *rename* rend donc obsolète l'ensemble des opérations dont elle dépend causalement, et peut être utilisée pour les remplacer. En partant de cette observation, nous proposons le mécanisme de compression du journal suivant.

Le mécanisme consiste à réduire le nombre d'opérations transmises à un nouveau pair rejoignant la collaboration grâce à l'opération *rename* de l'époque courante. L'opération *rename* ayant introduite l'époque courante fournit un état initial au nouveau pair. À partir de cet état initial, le nouveau pair peut obtenir l'état courant en intégrant les opérations *insert* et *remove* qui ont été générées de manière concurrente ou causale par rapport à l'opération *rename*. En réponse à une demande de synchronisation d'un nouveau pair, un pair peut donc simplement lui envoyer un sous-ensemble de son journal composé de :

- (i) L'opération *rename* ayant introduite son époque courante.

- (ii) Les opérations *insert* et *remove* dont l'opération *rename* courante ne dépend pas causalement.

Notons que les données contenues dans l'opération *rename* telle que nous l'avons définie précédemment (cf. Définition 50, page 72) sont insuffisantes pour cette utilisation. En effet, les données incluses (*ancien état* au moment du renommage, identifiant du noeud auteur de l'opération *rename* et son numéro de séquence au moment de la génération) nous permettent seulement de recréer la structure de la séquence après le renommage. Mais le contenu de la séquence est omis, celui-ci n'étant jusqu'ici d'aucune utilité pour l'opération *rename*. Afin de pouvoir utiliser l'opération *rename* comme état initial, il est nécessaire d'y inclure cette information.

De plus, des informations de causalité doivent être intégrées à l'opération *rename*. Ces informations doivent permettre aux noeuds d'identifier les opérations supplémentaires nécessaires pour obtenir l'état courant, c.-à-d. toutes les opérations desquelles l'opération *rename* ne dépend pas causalement. L'ajout à l'opération *rename* d'un *vecteur de versions*, structure représentant l'ensemble des opérations intégrées par l'auteur de l'opération *rename* au moment de sa génération, permettrait cela.

Nous définissons donc de la manière suivante l'opération *rename* enrichie compatible avec ce mécanisme de compression du journal :

Définition 57 (*rename enrichie*). Une opération *rename enrichie* est un quintuplet $\langle nodeId, nodeSeq, formerState, versionVector, content \rangle$ où

- (i) *nodeId* est l'identifiant du noeud qui a généré l'opération *rename*.
- (ii) *nodeSeq* est le numéro de séquence du noeud au moment de la génération de l'opération *rename*.
- (iii) *formerState* est l'ancien état du noeud au moment du renommage.
- (iv) *versionVector* est le vecteur de versions représentant l'ancien état du noeud au moment du renommage.
- (v) *content* est le contenu du document au moment du renommage.

Ce mécanisme de compression du journal introduit néanmoins le problème suivant. Un nouveau pair synchronisé de cette manière ne possède qu'un sous-ensemble du journal des opérations. Si ce pair reçoit ensuite une demande de synchronisation d'un second pair, il est possible qu'il ne puisse répondre à la requête. Par exemple, le pair ne peut pas fournir des opérations faisant partie des dépendances causales de l'opération *rename* qui lui a servi d'état initial.

Une solution possible dans ce cas de figure est de rediriger le second pair vers un troisième pour qu'il se synchronise avec lui. Cependant, cette solution pose des problèmes de latence/temps de réponse si le troisième pair s'avère indisponible à ce moment. Une autre approche possible est de généraliser le processus de synchronisation que nous avons présenté ici (opération *rename* comme état initial puis application des autres opérations) à l'ensemble des pairs, et non plus seulement aux nouveaux pairs. Nous présentons les avantages et inconvénients de cette approche dans la sous-section suivante.

3.5.7 Implémentation alternative de l'intégration de l'opération de renommage basée sur le journal des opérations

Nous avons décrit précédemment l'algorithme que nous utilisons pour intégrer une opération de renommage (cf. section 3.4.1, page 93). Pour rappel, cet algorithme se compose principalement des étapes suivantes :

- (i) L'identification de l'époque PPAC entre l'époque courante et l'époque cible, de façon à déterminer les opérations de renommage à annuler et celles à appliquer.
- (ii) L'utilisation successive des fonctions `revertRenameId` et `renameId` sur l'ensemble des identifiants de l'état courant pour obtenir l'état correspondant à l'époque cible.
- (iii) La création d'une nouvelle séquence à partir des identifiants calculés et du contenu courant.

Dans cette section, nous abordons une implémentation alternative de l'intégration de l'opération *rename*. Cette implémentation repose sur le journal des opérations.

Cette implémentation se base sur les observations suivantes :

- (i) L'état courant est obtenu en intégrant successivement l'ensemble des opérations.
- (ii) L'opération *rename* est une opération subsumant les opérations passées : elle prend un état donné (l'*ancien état*), somme des opérations précédentes, et génère un nouvel état équivalent compacté.
- (iii) L'ordre d'intégration des opérations concurrentes n'a pas d'importance sur l'état final obtenu.

Ainsi, pour intégrer une opération *rename* distante, un noeud peut :

- (i) Générer l'état correspondant au renommage de l'*ancien état*.
- (ii) Identifier le chemin entre l'époque courante et l'époque cible.
- (iii) Identifier les opérations concurrentes à l'opération *rename* présentes dans son journal des opérations.
- (iv) Transformer et intégrer successivement les opérations concurrentes à l'opération *rename* à ce nouvel état.

Cet algorithme est équivalent à ré-ordonner le journal des opérations de façon à intégrer les opérations précédant l'opération *rename*, puis à intégrer l'opération *rename* elle-même, puis à intégrer les opérations concurrentes à cette dernière.

Cette approche présente plusieurs avantages par rapport à l'implémentation décrite précédemment. Tout d'abord, elle modifie le facteur du nombre de transformations à effectuer. La version précédente transforme de l'époque courante vers l'époque cible chaque identifiant (ou chaque bloc si nous disposons de `renameBlock`) de l'état courant. La version présentée ici effectue une transformation pour chaque opération concurrente à l'opération *rename* à intégrer présente dans le journal des opérations. Le nombre de transformation peut donc être réduit de plusieurs ordres de grandeur avec cette approche, notamment si les opérations sont propagées aux pairs du réseau rapidement.

Un autre avantage de cette approche est qu'elle permet de récupérer et de réutiliser les identifiants originaux des opérations. Lorsqu'une suite de transformations est appliquée sur les identifiants d'une opération, elle est appliquée sur les identifiants originaux

et non plus sur leur équivalents présents dans l'état courant. Ceci permet de réinitialiser les transformations appliquées à un identifiant et d'éviter le cas de figure mentionné dans la sous-section 3.2.3 : le cas où `revertRenameId` est utilisé pour retirer l'effet d'une opération *rename* sur un identifiant, avant d'utiliser `renameId` pour ré-intégrer l'effet de la même opération *rename*. Cette implémentation supprime donc la contrainte de définir un couple de fonctions réciproques `renameId` et `revertRenameId`, ce qui nous offre une plus grande flexibilité dans le choix de la relation $<_\varepsilon$ et du couple de fonctions `renameId` et `revertRenameId`.

Cette implémentation dispose néanmoins de plusieurs limites. Tout d'abord, elle nécessite que chaque noeud maintienne localement le journal des opérations. Les métadonnées accumulées par la structure de données répliquées vont alors croître avec le nombre d'opérations effectuées. Cependant, ce défaut est à nuancer. En effet, les noeuds doivent déjà maintenir le journal des opérations pour le mécanisme d'anti-entropie, afin de renvoyer une opération passée à un noeud l'ayant manquée. Plus globalement, les noeuds doivent aussi conserver le journal des opérations pour permettre à un nouveau noeud de rejoindre la collaboration et de calculer l'état courant en rejouant l'ensemble des opérations. Il s'agit donc d'une contrainte déjà imposée aux noeuds pour d'autres fonctionnalités du système.

Un autre défaut de cette implémentation est qu'elle nécessite de détecter les opérations concurrentes à l'opération *rename* à intégrer. Cela implique d'ajouter des informations de causalité à l'opération *rename*, tel qu'un vecteur de versions. Cependant, la taille des vecteurs de versions croît de façon monotone avec le nombre de noeuds qui participent à la collaboration. Diffuser cette information à l'ensemble des noeuds peut donc représenter un coût significatif dans les collaborations à large échelle. Néanmoins, il faut rappeler que les noeuds échangent déjà régulièrement des vecteurs de versions dans le cadre du fonctionnement du mécanisme d'anti-entropie. Les opérations *rename* étant rares en comparaison, ce surcoût nous paraît acceptable.

Finalement, cette approche implique aussi de parcourir le journal des opérations à la recherche d'opérations concurrentes. Comme dit précédemment, la taille du journal croît de façon monotone au fur et à mesure que les noeuds émettent des opérations. Cette étape du nouvel algorithme d'intégration de l'opération *rename* devient donc de plus en plus coûteuse. Des méthodes permettent néanmoins de réduire son coût computationnel. Notamment, chaque noeud traquent les informations de progression des autres noeuds afin de supprimer les métadonnées du mécanisme de renommage (cf. section 3.3, page 88). Ces informations permettent de déterminer la stabilité causale des opérations et donc d'identifier les opérations qui ne peuvent plus être concurrentes à une nouvelle opération *rename*. Les noeuds peuvent ainsi maintenir, en plus du journal complet des opérations, un journal composé uniquement des opérations non stables causalement. Lors du traitement d'une nouvelle opération *rename*, les noeuds peuvent alors parcourir ce journal réduit à la recherche des opérations concurrentes.

3.6 Comparaison avec les approches existantes

Dans cette section, nous comparons `RenamableLogootSplit` aux travaux existants de la littérature qui visent à réduire la croissance monotone du surcoût en métadonnées et en calculs des CRDTs pour le type Séquence à identifiants densément ordonnés. Pour cela, nous rappelons tout d’abord les contributions de ces travaux. Puis, nous mettons en lumière comment `RenamableLogootSplit` se différencie de ces derniers.

3.6.1 Ré-équilibrage de l’arbre des identifiants de position

[20] puis [21] définissent un mécanisme de ré-équilibrage de l’arbre des identifiants de position pour `Treedoc` [72]. Ce mécanisme, qui prend la forme d’une nouvelle opération *rebalance*, permet aux noeuds de réassigner des identifiants plus courts aux éléments du document. Cependant, cette nouvelle opération n’est ni commutative avec les opérations *insert* et *remove*, ni avec elle-même. Pour assurer la cohérence à terme [14] du système, [21] fait le choix d’empêcher la génération d’opérations *rebalance* concurrentes. Pour cela, cette approche requiert un consensus entre les noeuds pour générer les opérations *rebalance*. Les opérations *insert* et *remove* sont elles toujours générées sans coordination entre les noeuds et peuvent donc être concurrentes aux opérations *rebalance*. Pour gérer les opérations concurrentes aux opérations *rebalance*, les auteurs proposent de transformer les opérations concernées par rapport aux effets des opérations *rebalance*, à l’aide un mécanisme de *catch-up*, avant de les appliquer.

Cependant, les protocoles de consensus ne passent pas à l’échelle et ne sont pas adaptés aux systèmes distribués à large échelle. Pour pallier ce problème, les auteurs proposent de répartir les noeuds dans deux groupes : le *core* et la *nebula*. Le *core* est un ensemble, de taille réduite, de noeuds stables et hautement connectés tandis que la *nebula* est un ensemble, de taille non-bornée, de noeuds. Seuls les noeuds du *core* participent à l’exécution du protocole de consensus. Les noeuds de la *nebula* contribuent toujours au document par le biais des opérations *insert* et *remove*.

Notre travail peut être vu comme une extension des travaux. Avec `RenamableLogootSplit`, nous adaptions l’opération *rebalance* et le mécanisme de *catch-up* à `LogootSplit` pour tirer partie de la fonctionnalité offerte par les blocs. De plus, nous proposons un mécanisme pour supporter les opérations *rename* concurrentes, ce qui supprime la nécessité de l’utilisation d’un protocole de consensus. Notre contribution est donc une approche plus générique puisque `RenamableLogootSplit` est utilisable dans des systèmes composés d’un *core* et d’une *nebula*, ainsi que dans les systèmes ne disposant pas de noeuds stables pour former un *core*.

Dans les systèmes disposant d’un *core*, nous pouvons donc combiner `RenamableLogootSplit` avec un protocole de consensus pour éviter la génération d’opérations *rename* concurrentes. Cette approche offre plusieurs avantages. Elle permet de se passer de tout ce qui à attiré au support d’opérations *rename* concurrentes, c.-à-d. la définition d’une relation *priority* et l’implémentation de `revertRenameId`. Elle permet aussi de simplifier l’implémentation du mécanisme de récupération de mémoire des époques et *anciens états* pour reposer seulement sur la stabilité causale des opérations. Concernant ses perfor-

mances, cette approche se comporte de manière similaire à `RenamableLogootSplit` avec un seul *renaming bot* (cf. sous-section 3.4.3, page 97), mais avec un surcoût correspondant au coût du protocole de consensus sélectionné.

3.6.2 Ralentissement de la croissance des identifiants de position

L'approche LSEQ [87, 88] est une approche visant à ralentir la croissance des identifiants dans les CRDTs pour le type Séquence à identifiants densément ordonnés. Au lieu de réduire périodiquement la taille des métadonnées liées aux identifiants à l'aide d'un mécanisme de renommage coûteux, les auteurs définissent de nouvelles stratégies d'allocation des identifiants pour ralentir leur vitesse de croissance. Dans ces travaux, les auteurs notent que la stratégie d'allocation des identifiants proposée dans Logoot [68] n'est adaptée qu'à un seul comportement d'édition : de gauche à droite, de haut en bas. Si les insertions sont effectuées en suivant d'autres comportements, les identifiants générés saturent rapidement l'espace des identifiants pour une taille donnée. Les insertions suivantes déclenchent alors une augmentation de la taille des identifiants. En conséquent, la taille des identifiants dans Logoot augmente de façon linéaire au nombre d'insertions, au lieu de suivre la progression logarithmique attendue.

LSEQ définit donc plusieurs stratégies d'allocation d'identifiants adaptées à différents comportements d'édition. Les noeuds choisissent aléatoirement une de ces stratégies pour chaque taille d'identifiants. De plus, LSEQ adopte une structure d'arbre exponentiel pour allouer les identifiants : l'intervalle des identifiants possibles double à chaque fois que la taille des identifiants augmente. Cela permet à LSEQ de choisir avec soin la taille des identifiants et la stratégie d'allocation en fonction des besoins. En combinant les différentes stratégies d'allocation avec la structure d'arbre exponentiel, LSEQ offre une croissance polylogarithmique de la taille des identifiants en fonction du nombre d'insertions.

Bien que l'approche LSEQ ralentisse la vitesse de croissance des identifiants des CRDTs pour le type Séquence à identifiants densément ordonnés, le surcoût de la séquence reste proportionnel à son nombre d'éléments. À l'inverse, le mécanisme de renommage de `RenamableLogootSplit` permet de réduire les métadonnées à une quantité fixe, indépendamment du nombre d'éléments.

Ces deux approches sont néanmoins orthogonales et peuvent, comme avec l'approche précédente, être combinées. Le système résultant réinitialiserait périodiquement les métadonnées de la séquence répliquée à l'aide de l'opération *rename* tandis que les stratégies d'allocation d'identifiants de LSEQ ralentiraient leur croissance entretemps. Cela permettrait aussi de réduire la fréquence de l'opération *rename*, réduisant ainsi les calculs effectués par le système de manière globale.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouveau CRDT pour le type Séquence : `RenamableLogootSplit`. Ce nouveau type de données répliquées associe à `LogootSplit` un

mécanisme de renommage optimiste permettant de réduire périodiquement les métadonnées stockées et d'optimiser l'état interne de la structure de données.

Ce mécanisme prend la forme d'une nouvelle opération, l'opération *rename*, qui peut être émise à tout moment par n'importe quel noeud. Cette opération génère une nouvelle séquence LogootSplit, équivalente à l'état précédent, avec une empreinte minimale en métadonnées. L'opération *rename* transporte aussi suffisamment d'informations pour que les noeuds puissent intégrer les opérations concurrentes à l'opération *rename* dans le nouvel état.

En cas d'opérations *rename* concurrentes, la relation d'ordre strict total $<_\epsilon$ permet aux noeuds de décider quelle opération *rename* utiliser, sans coordination. Les autres opérations *rename* sont quant à elles ignorées. Seules leurs informations sont stockées par RenamableLogootSplit, afin de gérer les opérations concurrentes potentielles.

Une fois qu'une opération *rename* a été propagée à l'ensemble des noeuds, elle devient causalement stable. À partir de ce point, il n'est plus possible qu'un noeud émette une opération concurrente à cette dernière. Les informations incluses dans l'opération *rename* pour intégrer les opérations concurrentes potentielles peuvent donc être supprimées par l'ensemble des noeuds.

Ainsi, le mécanisme de renommage permet à RenamableLogootSplit d'offrir de meilleures performances que LogootSplit. La génération du nouvel état minimal et la suppression à terme des métadonnées du mécanisme de renommage divisent par 100 la taille de la structure de données répliquée. L'optimisation de l'état interne représentant la séquence réduit aussi le coût d'intégration des opérations suivantes, amortissant ainsi le coût de transformation et d'intégration des opérations concurrentes à l'opération *rename*.

RenamableLogootSplit souffre néanmoins de plusieurs limitations. La première d'entre elles est le besoin d'observer la stabilité causale des opérations *rename* pour supprimer de manière définitive les métadonnées associées. Il s'agit d'une contrainte forte, notamment dans les systèmes dynamiques à grande échelle dans lesquels nous n'avons aucune garantie et aucun contrôle sur les noeuds. Il est donc possible qu'un noeud déconnecté ne se reconnecte jamais, bloquant ainsi la progression de la stabilité causale pour l'ensemble des opérations. Il s'agit toutefois d'une limite partagée avec les autres mécanismes de réduction des métadonnées pour Sequence CRDTs proposés dans la littérature [71, 21], à l'exception de l'approche LSEQ [88]. En pratique, il serait intéressant d'étudier la mise en place d'un mécanisme d'éviction des noeuds inactifs pour répondre à ce problème.

La seconde limitation de RenamableLogootSplit concerne la génération d'opérations *rename* concurrentes. Chaque opération *rename* est coûteuse, aussi bien en terme de métadonnées à stocker et diffuser qu'en terme de traitements à effectuer. Il est donc important de chercher à minimiser le nombre d'opérations *rename* concurrentes émises par les noeuds. Une approche possible est d'adopter une architecture du type *core-nebula*[21]. Mais pour les systèmes incompatibles avec ce type d'architecture système, il serait intéressant de proposer d'autres approches ne nécessitant aucune coordination entre les noeuds. Mais par définition, ces approches ne pourraient offrir de garanties fortes sur le nombre d'opérations concurrentes possibles.

Chapitre 4

MUTE, un éditeur de texte web collaboratif P2P temps réel chiffré de bout en bout

Sommaire

4.1	Présentation	118
4.1.1	Objectifs	118
4.1.2	Fonctionnalités	119
4.1.3	Architecture système	120
4.1.4	Architecture logicielle	122
4.2	Couche interface utilisateur	124
4.3	Couche réplication	125
4.3.1	Modèle de données du document texte	125
4.3.2	Collaborateur-rices	126
4.3.3	Curseurs	131
4.4	Couche livraison	131
4.4.1	Livraison des opérations en exactement un exemplaire	132
4.4.2	Livraison de l'opération <i>remove</i> après l'opération <i>insert</i>	134
4.4.3	Livraison des opérations après l'opération <i>rename</i> introduisant leur époque	136
4.4.4	Livraison des opérations à terme	138
4.5	Couche réseau	140
4.5.1	Établissement d'un réseau P2P entre navigateurs	140
4.5.2	Topologie réseau et protocole de diffusion des messages	142
4.6	Couche sécurité	143
4.7	Conclusion	145

Les systèmes collaboratifs temps réels permettent à plusieurs utilisateur-rices de réaliser une tâche de manière coopérative. Ils permettent aux utilisateur-rices de consulter le contenu actuel, de le modifier et d'observer en direct les modifications effectuées par

les autres collaborateur·rices. L'observation en temps réel des modifications des autres favorise une réflexion de groupe et permet une répartition efficace des tâches. L'utilisation des systèmes collaboratifs se traduit alors par une augmentation de la qualité du résultat produit [92, 93].

Plusieurs outils d'édition collaborative centralisés basés sur l'approche Operational Transformation (OT) [60] ont permis de populariser l'édition collaborative temps réel de texte [94, 95]. Ces approches souffrent néanmoins de leur architecture centralisée. Notamment, ces solutions rencontrent des difficultés à passer à l'échelle [86, 96] et posent des problèmes de confidentialité [11, 10].

L'approche CRDT offre une meilleure capacité de passage à l'échelle et est compatible avec une architecture P2P [74]. Ainsi, de nombreux travaux [97, 98, 99] ont été entrepris pour proposer une alternative distribuée répondant aux limites des éditeurs collaboratifs centralisés. De manière plus globale, ces travaux s'inscrivent dans le nouveau paradigme d'application des Local-First Softwares (LFSs) [12, 100]. Ce paradigme vise le développement d'applications collaboratives, P2P, pérennes et rendant la souveraineté de leurs données aux utilisateurs.

De manière semblable, l'équipe Coast conçoit depuis plusieurs années des applications avec ces mêmes objectifs et étudient les problématiques de recherche liées. Elle développe Multi User Text Editor (MUTE) [25]^{33 34}, un éditeur collaboratif P2P temps réel chiffré de bout en bout. MUTE sert de plateforme d'expérimentation et de démonstration pour les travaux de l'équipe.

Ainsi, nous avons contribué à son développement dans le cadre de cette thèse. Notamment, nous avons participé à :

- (i) L'implémentation des CRDTs LogootSplit [26] et RenamableLogootSplit [24] pour représenter le document texte.
- (ii) L'implémentation de leur modèle de livraison de livraison respectifs.
- (iii) L'implémentation d'un protocole d'appartenance au réseau, SWIM [30].

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter le projet MUTE : ses objectifs, ses fonctionnalités et son architecture système et logicielle. Puis nous détaillons ses différentes couches logicielles : leur rôle, l'approche choisie pour leur implémentation et finalement leurs limites actuelles. Au cours de cette description, nous mettons l'emphase sur les composants auxquelles nous avons contribué, c.-à-d. les sections 4.3, et 4.4.

4.1 Présentation

4.1.1 Objectifs

Comme indiqué dans l'introduction (cf. section 1.1, page 1), le but de ce projet est de proposer un éditeur de texte collaboratif Local-First Software (LFS), c.-à-d. un éditeur de texte collaboratif qui satisfait les propriétés suivantes :

33. Disponible à l'adresse : <https://mutehost.loria.fr>

34. Code source disponible à l'adresse suivante : <https://github.com/coast-team/mute>

- (i) Toujours disponible, c.-à-d. qui permet à tout moment à un-e utilisateur-riche de consulter, créer ou éditer un document, même par exemple en l'absence de connexion internet.
- (ii) Collaboratif, c.-à-d. qui permet à un-e utilisateur-riche de partager un document avec d'autres utilisateur-rices pour éditer à plusieurs le document, de manière synchrone et asynchrone. Nous considérons la capacité d'un-e utilisateur-riche à partager le document avec ses propres autres appareils comme un cas particulier de collaboration.
- (iii) Performant, c.-à-d. qui garantit que le délai entre la génération d'une modification par un pair et l'intégration de cette dernière par un autre pair connecté soit assimilable à du temps réel et que ce délai ne soit pas impacté par le nombre de pairs dans la collaboration.
- (iv) Pérenne, c.-à-d. qui garantit à ses utilisateur-rices qu'ils pourront continuer à utiliser l'application sur une longue période. Notamment, nous considérons la capacité des utilisateur-rices à configurer et déployer aisément leur propre instance du système comme un gage de pérennité du système.
- (v) Garantissant la confidentialité des données, c.-à-d. qui permet à un-e utilisateur-riche de contrôler avec quelles personnes une version d'un document est partagée. Aussi, le système doit garantir qu'un adversaire ne doit pas être en mesure d'espionner les utilisateur-rices, e.g. en usurpant l'identité d'un-e utilisateur-riche ou en interceptant les messages diffusés sur le réseau.
- (vi) Garantissant la souveraineté des données, c.-à-d. qui permet à un-e utilisateur-riche de maîtriser l'usage de ses données, e.g. pouvoir les consulter, modifier, partager ou encore exporter vers d'autres formats ou applications.

Ainsi, ces différentes propriétés nous conduisent à concevoir un éditeur de texte collaboratif P2P temps réel chiffré de bout en bout et qui est dépourvu d'autorités centrales.

4.1.2 Fonctionnalités

MUTE prend la forme d'une application web qui permet de créer et de gérer des documents textes. Chaque document se voit attribuer un identifiant, supposé unique. L'utilisateur-riche peut alors ouvrir et partager un document à partir de son URL.

L'application permet à l'utilisateur-riche d'être mis-e en relation avec les autres pairs actuellement connectés qui travaillent sur ce même document. Pour cela, l'application utilise le protocole WebRTC afin d'établir des connexions P2P avec ces derniers. Une fois les connexions P2P établies, le service fourni par le système pour mettre en relation les pairs n'est plus nécessaire.

Une fois connecté à un autre pair, l'utilisateur-riche récupère automatiquement les modifications effectuées par ses pairs de façon à obtenir la version courante du document. Iel peut alors modifier le document, c.-à-d. ajouter, supprimer du contenu ou encore modifier son titre. Ses modifications sont partagées en temps réel aux autres pairs connectés. À la réception de modifications, celles-ci sont intégrées à la copie locale du document. figure 4.1 illustre l'interface utilisateur de l'éditeur de document de MUTE.

Pour garantir la confidentialité des échanges, MUTE utilise un protocole de génération de clés de groupe. Ce protocole permet d'établir une clé de chiffrement connue seulement

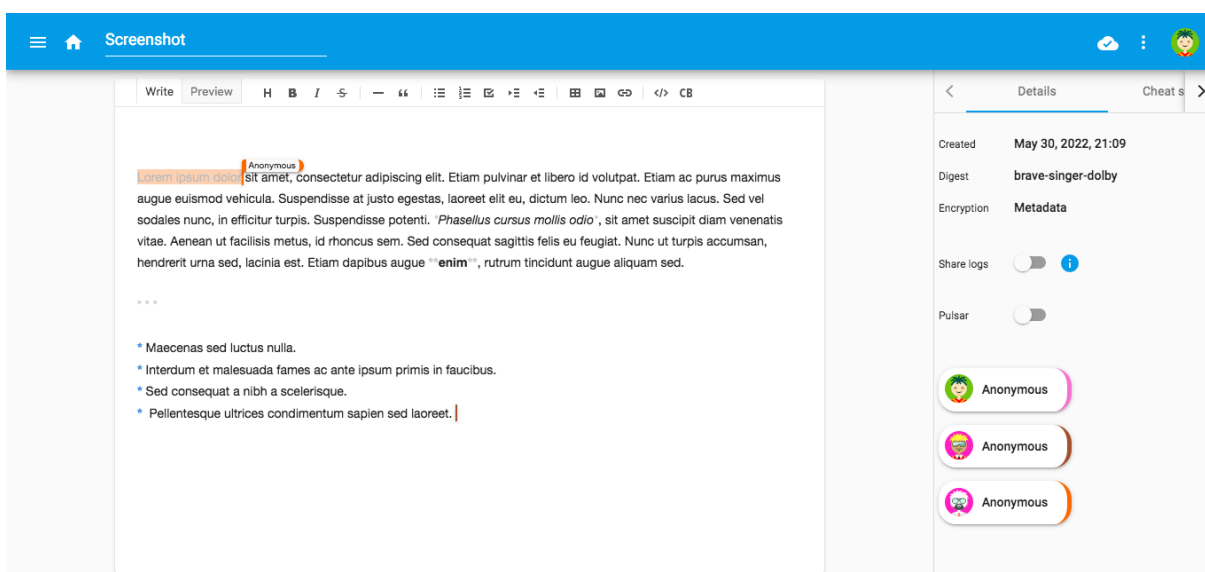


FIGURE 4.1 – Capture d’écran d’une session d’édition collaborative avec MUTE

des pairs actuellement connectés, qui est ensuite utilisée pour chiffrer les messages entre pairs. Ce protocole permet de garantir les propriétés de *backward secrecy* et de *forward secrecy*.

Définition 58 (Backward Secrecy). La *Backward Secrecy* est une propriété de sécurité garantissant qu’un nouveau noeud ne pourra pas déchiffrer avec la nouvelle clé de chiffrement les anciens messages chiffrés avec une clé de chiffrement précédente.

Définition 59 (Forward Secrecy). La *Forward Secrecy* est une propriété de sécurité garantissant qu’un nouveau noeud ne pourra pas déchiffrer avec la nouvelle clé de chiffrement les futurs messages chiffrés avec une prochaine clé de chiffrement.

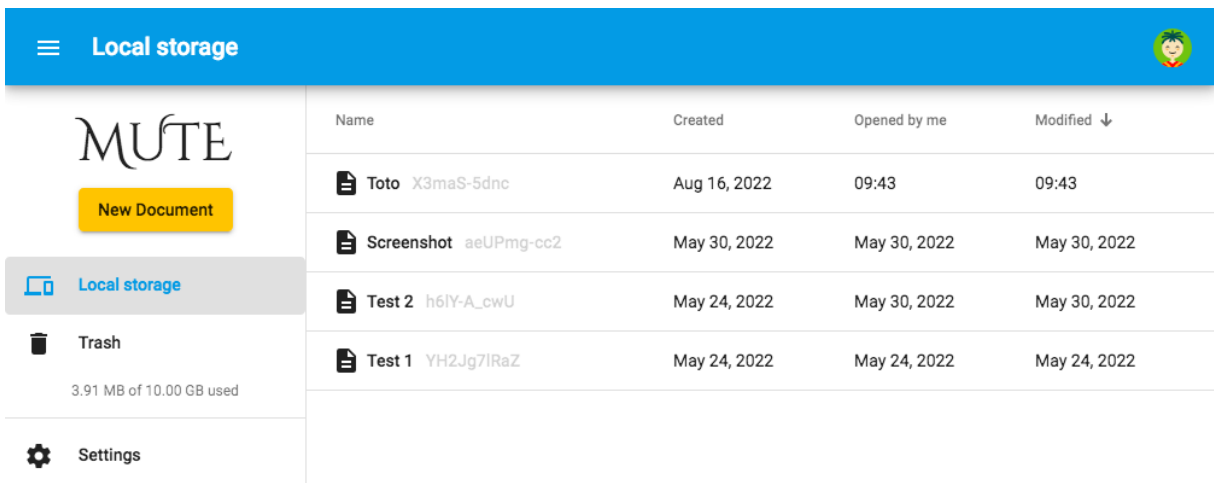
Une copie locale du document est sauvegardée dans le navigateur, avec l’ensemble des modifications. L’utilisateur-riche peut ainsi accéder à ses documents même sans connexion internet, pour les consulter ou modifier. Les modifications effectuées dans ce mode hors-ligne seront partagées aux collaborateur-rices à la prochaine connexion de l’utilisateur-riche.

Finalement, la page d’accueil de l’application permet aussi de lister ses documents. L’utilisateur-riche peut ainsi facilement parcourir ses documents, récupérer leur url pour les partager ou encore supprimer leur copie locale. figure 4.2 illustre cette page de l’application.

4.1.3 Architecture système

Nous représentons l’architecture système d’une collaboration utilisant MUTE par la figure 4.3.

Plusieurs types de noeuds composent cette architecture. Nous décrivons ci-dessous le type de chacun de ces noeuds ainsi que leurs rôles.



Name	Created	Opened by me	Modified ↓
Toto X3maS-5dnc	Aug 16, 2022	09:43	09:43
Screenshot aeUPmg-cc2	May 30, 2022	May 30, 2022	May 30, 2022
Test 2 h6lY-A_cwU	May 24, 2022	May 30, 2022	May 30, 2022
Test 1 YH2Jg7lRaZ	May 24, 2022	May 24, 2022	May 24, 2022

FIGURE 4.2 – Capture d'écran de la liste des documents.

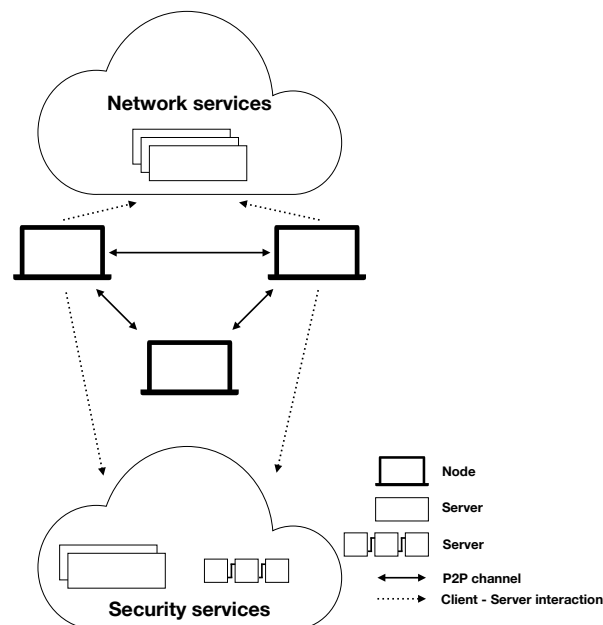


FIGURE 4.3 – Architecture système de l'application MUTE

Pairs

Au centre de la collaboration se trouvent les noeuds qui correspondent aux utilisatrices de l'application et à leurs appareils. Chaque noeud correspond à une instance de l'application MUTE, c.-à-d. l'éditeur collaboratif de texte. Chacun de ces noeuds peut donc consulter des documents et les modifier.

Ces noeuds forment un réseau P2P, qui leur permet d'échanger directement notamment pour diffuser les modifications effectuées sur le document. Les pairs interagissent aussi avec les autres types de noeuds, que nous décrivons dans les parties suivantes.

Notons qu'un noeud peut toutefois être déconnecté du système, c.-à-d. dans l'incapa-

cité de se connecter aux autres pairs et d'interagir avec les autres types de noeuds. Cela ne l'empêche toutefois pas l'utilisateur-riche d'utiliser MUTE.

Services réseau

Nous décrivons par cette appellation l'ensemble des composants nécessaires à l'établissement et le bon fonctionnement du réseau P2P entre les appareils des utilisateur-rices.

Il s'agit de serveurs ayant pour buts de :

- (i) Permettre à un pair d'obtenir les informations sur son propre état nécessaires pour l'établissement de connexions P2P.
- (ii) Permettre à un pair de découvrir les autres pairs travaillant sur le même document et d'établir une connexion avec eux.
- (iii) Permettre à des pairs de communiquer même si leur configurations réseaux respectives empêchent l'établissement d'une connexion P2P directe.

Nous détaillons plus précisément chacun de ces services et les interactions entre les pairs et ces derniers dans la section 4.5.

Services sécurité

Nous décrivons par cette appellation l'ensemble des composants nécessaires à l'authentification des utilisateur-rices et à l'établissement de clés de groupe de chiffrement.

Il s'agit de serveurs ayant pour buts de :

- (i) Permettre à un pair de s'authentifier.
- (ii) Permettre à un pair de faire connaître sa clé publique de chiffrement.
- (iii) Vérifier l'identité d'un pair.
- (iv) Permettre à un pair de vérifier le comportement honnête du ou des serveurs servant les clés publiques de chiffrement.

Nous dédions la section 4.6 à la description de ces différents services et les interactions des pairs avec ces derniers.

4.1.4 Architecture logicielle

Nous décrivons l'architecture logicielle d'un pair, c.-à-d. d'une instance de l'application MUTE dans un navigateur, dans la figure 4.4.

Cette architecture logicielle se compose de plusieurs composants, que nous regroupons par couche. Chacune de ces couches possède un rôle, que nous présentons brièvement ci-dessous avant de les décrire de manière plus détaillée dans leur section respective.

- (i) La couche *interface utilisateur*, qui regroupe l'ensemble des composants permettant de communiquer des informations aux pairs et avec lesquelles ils peuvent interagir, c.-à-d. le document lui-même, son titre mais aussi la liste des collaborateur-rices actuellement connectés. Cette couche se charge de transmettre les actions de l'utilisateur-riche aux couches inférieures, et inversement de présenter à l'utilisateur-riche les modifications effectuées par ses pairs.

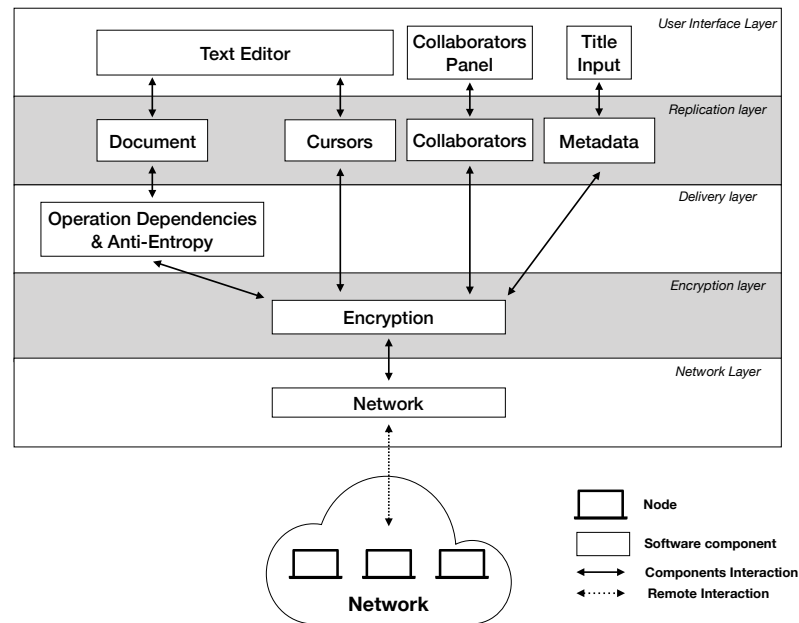


FIGURE 4.4 – Architecture logicielle de l'application MUTE

- (ii) La couche *réplication*, qui regroupe l'ensemble des composants permettant de représenter les données répliquées entre pairs, c.-à-d. les CRDTs utilisés pour représenter le document, ses métadonnées (titre, date de création...), l'ensemble des collaborateurs et leur curseur. Cette couche se charge d'intégrer les modifications effectuées par l'utilisateur-riche et de transmettre les opérations correspondantes aux couches inférieures, et inversement d'intégrer les opérations effectuées par ses pairs et d'indiquer à la couche *interface utilisateur* les modifications correspondantes.
- (iii) La couche *livraison*, qui est constitué d'un unique composant permettant de garantir les modèles de livraison requis par les différents CRDTs implémentés pour représenter le document. Cette couche se charge d'ajouter aux opérations de l'utilisateur-riche leur(s) dépendance(s) avant de les transmettre aux couches inférieures, et de livrer les opérations de ses pairs une fois leur(s) dépendance(s) livrées au préalable, ou de les mettre en attente le cas échéant.
- (iv) La couche *sécurité*, qui est constitué d'un unique composant gérant le chiffrement des messages. Cette couche se charge d'établir la clé de chiffrement de groupe, puis de chiffrer les messages de l'utilisateur-riche avec cette dernière avant de les transmettre à la couche inférieure, et inversement de déchiffrer les messages chiffrés de ses pairs avant de les transmettre aux couches supérieures.
- (v) La couche *réseau*, qui est constitué d'un unique composant permettant d'interagir avec le réseau P2P. Cette couche se charge d'établir les connexions P2P, puis permet de diffuser les messages chiffrés de l'utilisateur-riche à un ou plusieurs de ses pairs, et inversement de transmettre les messages chiffrés de ses pairs à la couche supérieure.

4.2 Couche interface utilisateur

Comme illustré par la figure 4.1, l'interface de la page d'un document se compose principalement d'un éditeur de texte. Ce dernier supporte le langage de balisage Markdown [101]. Ainsi, l'éditeur permet d'inclure plusieurs éléments légers de style. Les balises du langage Markdown étant du texte, elles sont répliquées nativement par le CRDT utilisé en interne par MUTE pour représenter la séquence.

L'interface de la page de l'éditeur de document est agrémentée de plusieurs mécanismes permettant d'établir une conscience de groupe entre les collaborateur-rices. L'indicateur en haut à droite de la page représente le statut de connexion de l'utilisateur-riche. Celui-ci permet d'indiquer à l'utilisateur-riche s'il est actuellement connecté-e au réseau P2P, en cours de connexion, ou si un incident réseau a lieu.

De plus, MUTE affiche sur la droite de l'éditeur la liste des collaborateur-rices actuellement connecté-es. Un curseur ou une sélection distante est associée pour chaque membre de la liste. Ces informations permettent d'indiquer à l'utilisateur-riche dans quelles sections du document ses collaborateur-rices sont en train de travailler. Ainsi, iels peuvent se répartir la rédaction du document de manière implicite ou suivre facilement les modifications d'un-e collaborateur-riche.

Bien que fonctionnelle, cette interface souffre néanmoins de plusieurs limites. Notamment, nous n'avons pas encore pu étudier la littérature concernant les mécanismes de conscience pour supporter la collaboration, au-delà du système de curseurs distants.

Nous identifions ainsi plusieurs axes de travail pour ces mécanismes. Tout d'abord, l'axe des *mécanismes de conscience des changements*. Le but serait de proposer des mécanismes pour :

- (i) Mettre en lumière de manière intelligible les modifications effectuées par les collaborateur-rices dans le cadre de collaborations temps réel à large échelle. Un tel mécanisme représente un défi de part le débit important de changements, potentiellement à plusieurs endroits du document de manière quasi-simultanée, à présenter à l'utilisateur-riche.
- (ii) Mettre en lumière de manière intelligible les modifications effectuées par les collaborateur-rices dans le cadre de collaborations asynchrones. De nouveau, ce mécanisme représente un défi de part la quantité massive de changements, une fois encore potentiellement à plusieurs endroits du document, à présenter à l'utilisateur-riche.

Une piste de travail potentiellement liée serait l'ajout d'une fonctionnalité d'historique du document, permettant aux utilisateur-rices de parcourir ses différentes versions obtenues au fur et à mesure des modifications. L'intégration d'une telle fonctionnalité dans un éditeur P2P pose cependant plusieurs questions : quel historique présenter aux utilisateur-rices, sachant que chacun-e a potentiellement observé un ordre différent des modifications ? Doit-on convenir d'une seule version de l'historique ? Dans ce cas, comment choisir et construire cet historique ?

Le second axe de travail sur les mécanismes de conscience concerne les *mécanismes*

de conscience de groupe. Actuellement, nous affichons l'ensemble des collaborateur-rices actuellement connecté-es. Cette approche s'avère lourde voire entravante dans le cadre de collaborations à large échelle où le nombre de collaborateur-rices dépasse plusieurs centaines. Il convient donc de déterminer quelles informations présenter à l'utilisateur-riche dans cette situation, e.g. une liste compacte de pairs et leur curseur respectif, ainsi que le nombre de pairs total.

4.3 Couche répliation

4.3.1 Modèle de données du document texte

MUTE propose plusieurs alternatives pour représenter le document texte. MUTE permet de soit utiliser une implémentation de `LogootSplit`³⁵ (cf. section 2.4, page 53), soit de `RenamableLogootSplit`³⁵ (cf. chapitre 3, page 70) ou soit de `Dotted LogootSplit`³⁶ [27]. Ce choix est effectué via une valeur de configuration de l'application choisie au moment de son déploiement.

Le modèle de données utilisé interagit avec l'éditeur de texte par l'intermédiaire d'opérations texte, c.-à-d. de messages au format $\langle insert, index, elts \rangle$ ou $\langle remove, index, length \rangle$. Lorsque l'utilisateur effectue des modifications locales, celles-ci sont détectées par l'éditeur et mises sous la forme d'opérations texte. Elles sont transmises au modèle de données, qui les intègre alors à la structure de données répliquées. Le CRDT retourne en résultat l'opération distante à propager aux autres noeuds.

De manière complémentaire, lorsqu'une opération distante est livrée au modèle de données, elle est intégrée par le CRDT pour actualiser son état. Le CRDT génère les opérations texte correspondantes et les transmet à l'éditeur de texte pour mettre à jour la vue.

En plus du texte, MUTE maintient un ensemble de métadonnées par document. Par exemple, les utilisateurs peuvent donner un titre au document. Pour représenter cette donnée additionnelle, nous associons un Last-Writer-Wins Register CRDT synchronisé par états [19] au document. De façon similaire, nous utilisons un First-Writer-Wins Register CRDT synchronisé par états pour représenter la date de création du document.

L'utilisation de ces structures de données nous permet donc de représenter le document texte ainsi que ses métadonnées. Nous identifions cependant plusieurs axes d'évolution pour cette couche. La première d'entre elles concerne l'ajout de styles au document. Comme indiqué dans la section 4.2, nous utilisons le langage de balisage Markdown pour inclure plusieurs éléments de style. Cette solution a pour principal intérêt de reposer sur du texte qui s'intègre directement dans le contenu du document. Ainsi, les balises de style sont répliquées nativement avec le contenu du document par le CRDT représentant

35. Les deux implémentations proviennent de la librairie `mute-structs` : <https://github.com/coast-team/mute-structs>

36. Implémentation fournie par la librairie suivante : <https://github.com/coast-team/dotted-logootsplit>

*****diam *venenatis** vitae****.

FIGURE 4.5 – Entrelacement de balises Markdown produisant une anomalie de style

ce dernier. Cette solution montre cependant ses limites lorsque plusieurs éléments styles sont ajoutés sur des zones de texte se superposant, notamment en concurrence. Les balises Markdown produites sont alors entrelacées. La figure figure 4.5 illustre un tel exemple.

Dans cet exemple, le texte "diam venenatis" a été mis en gras tandis que le texte "venenatis vitae" a été mis en italique. Le résultat attendu est donc "**diam *venenatis vitae***". Il ne s'agit toutefois pas du résultat affiché par notre éditeur de texte, la syntaxe du langage Markdown n'étant pas respectée. Les utilisateur-rices doivent donc manuellement corriger l'anomalie de style engendrée.

Afin de prévenir ce type d'anomalie, il conviendrait d'intégrer un CRDT pour représenter le style du document, tel que Peritext [102]. Un type de donnée dédié nous permettrait de plus d'inclure des effets de style non-disponibles dans le langage Markdown, e.g. la mise en page ou encore l'utilisation de couleurs.

Une second piste d'évolution consiste à rendre possible l'intégration et l'édition collaborative d'autres types de contenu que du texte au sein d'un document MUTE, e.g. des listes de tâches, des feuilles de calcul ou encore des schémas, comme le propose par exemple [103]. L'évolution d'éditeur collaboratif de documents texte à éditeur collaboratif de documents multimédia élargirait ainsi les contextes d'utilisation de MUTE.

Cette piste de recherche nécessite de concevoir et d'intégrer des CRDTs pour chaque type de document supplémentaire. Elle nécessite aussi la conception d'un mécanisme assurant la composition de ces CRDTs, c.-à-d. la conception d'un méta-CRDT. Ce méta-CRDT devrait assurer plusieurs responsabilités. Tout d'abord, il devrait permettre l'ajout et la suppression de CRDTs au sein du document multimédia, ainsi que leur ré-ordonnement. Ensuite, le méta-CRDT devrait définir les sémantiques de résolution de conflits employées en cas de modifications concurrentes sur le document, e.g. la modification du contenu d'un des CRDTs du document en concurrence de la suppression dudit CRDT. Finalement, le méta-CRDT devrait proposer différents modèles de cohérence à l'application. Il devrait par exemple proposer de garantir le modèle de cohérence causal, c.-à-d. d'ordonner les modifications sur le méta-CRDT et les CRDTs qui composent le document en utilisant la relation *happens-before* (cf. Définition 12, page 14).

4.3.2 Collaborateur-rices

Pour assurer la qualité de la collaboration même à distance, il est important d'offrir des fonctionnalités de conscience de groupe aux utilisateurs. Une de ces fonctionnalités est de fournir la liste des collaborateur-rices actuellement connectés. Les protocoles d'appartenance au réseau sont une catégorie de protocoles spécifiquement dédiée à cet effet.

MUTE présente plusieurs contraintes liées à notre modèle du système que le protocole sélectionné doit respecter. Tout d'abord, le protocole doit être compatible avec un environnement P2P, où les noeuds partagent les mêmes droits et responsabilités. De plus, le

protocole doit présenter une capacité de passage à l'échelle pour être adapté aux collaborations à large échelle.

En raison de ces contraintes, notre choix s'est porté sur le protocole SWIM [30]. Ce protocole d'appartenance au réseau offre les propriétés intéressantes suivantes. Tout d'abord, le nombre de messages diffusés sur le réseau est proportionnel linéairement au nombre de pairs. Pour être plus précis, le nombre de messages envoyés par un pair par période du protocole est constant. De plus, il fournit à chaque noeud une vue de la liste des collaborateurs cohérente à terme, même en cas de réception désordonnée des messages du protocole. Finalement, il intègre un mécanisme permettant de réduire le taux de faux positifs, c.-à-d. le taux de pairs déclarés injustement comme défaillants.

Pour cela, SWIM découple les deux composants d'un protocole d'appartenance au réseau : le mécanisme de *détection des défaillances des pairs* et le mécanisme de *dissémination des mises à jour du groupe*.

Mécanisme de détection des défaillances des pairs

Le mécanisme de détection des défaillances des pairs est exécuté de manière périodique, toutes les T unités de temps, par chacun des noeuds du système de manière non-coordonnée. Son fonctionnement est illustré par la figure 4.6.

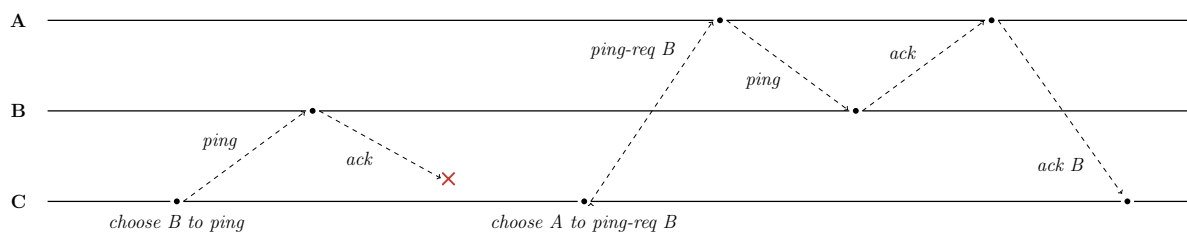


FIGURE 4.6 – Exécution du mécanisme de détection des défaillances par le noeud C pour tester le noeud B

Dans cet exemple, le réseau est composé des trois noeuds A, B et C. Le noeud C démarre l'exécution du mécanisme de détection des défaillances.

Tout d'abord, le noeud C sélectionne un noeud cible de manière aléatoire, ici B, et lui envoie un message *ping*. À la réception de ce message, le noeud B lui signifie qu'il est toujours opérationnel en lui répondant avec un message *ack*. À la réception de ce message par C, cette exécution du mécanisme de détection des défaillances devrait prendre fin. Mais dans l'exemple présenté ici, ce message est perdu par le réseau.

En l'absence de réponse de la part de B au bout d'un temps spécifié au préalable, le noeud C passe à l'étape suivante du mécanisme. Le noeud C sélectionne un autre noeud, ici A, et lui demande de vérifier via le message *ping-req B* si B a eu une défaillance. À la réception de la requête de ping, le noeud A envoie un message *ping* à B. Comme précédemment, B répond au *ping* par le biais d'un *ack* à A. A informe alors C du bon fonctionnement de B via le message *ack B*. Le mécanisme prend alors fin, jusqu'à sa prochaine exécution.

Si C n'avait pas reçu de réponse suite à sa *ping-req* B envoyée à A, C aurait supposé que B a eu une défaillance. Afin de réduire le taux de faux positifs, SWIM ne considère pas directement les noeuds n'ayant pas répondu comme en panne : ils sont tout d'abord *suspectés* d'être en panne. Après un certain temps sans signe de vie d'un noeud suspecté d'être en panne, le noeud est *confirmé* comme défaillant.

L'information qu'un noeud est suspecté d'être en panne est propagé dans le réseau via le mécanisme de dissémination des mises à jour du groupe décrit ci-dessous. Si un noeud apprend qu'il est suspecté d'une panne, il dissémine à son tour l'information qu'il est toujours opérationnel pour éviter d'être confirmé comme défaillant.

Pour éviter qu'un message antérieur n'invalide une suspicion d'une défaillance et retarde ainsi sa détection, SWIM introduit un numéro d'*incarnation*. Chaque noeud maintient un numéro d'incarnation. Lorsqu'un noeud apprend qu'il est suspecté d'une panne, il incrémente son numéro d'incarnation avant de propager l'information contradictoire.

Afin de représenter la liste des collaborateur-rices, le protocole SWIM utilise la structure de données présentée par la Définition 60 :

Définition 60 (Liste des collaborateur-rices). La *liste des collaborateur-rices* est un ensemble de triplets $\langle nodeId, nodeStatus, nodeIncarn \rangle$ avec :

- (i) *nodeId*, l'identifiant du noeud correspondant à ce tuple.
- (ii) *nodeStatus*, le statut courant du noeud correspondant à ce tuple, c.-à-d. *Alive* s'il est considéré comme opérationnel, *Suspect* s'il est suspecté d'une défaillance, *Confirm* s'il est considéré comme défaillant.
- (iii) *nodeIncarn*, le numéro d'incarnation maximal, c.-à-d. le plus récent, connu pour le noeud correspondant à ce tuple.

Chaque noeud réplique cette liste et la fait évoluer au cours de l'exécution du mécanisme présenté jusqu'ici. Lorsqu'une mise à jour est effectuée, celle-ci est diffusée de la manière présentée ci-dessous.

Mécanisme de dissémination des mises à jour du groupe

Quand l'exécution du mécanisme de détection des défaillances par un noeud met en lumière une évolution de la liste des collaborateur-rices, cette mise à jour doit être propagée au reste des noeuds.

Or, diffuser cette mise à jour à l'ensemble du réseau serait coûteux pour un seul noeud. Afin de propager cette information de manière efficace, SWIM propose d'utiliser un protocole de diffusion épidémique : le noeud transmet la mise à jour qu'à un nombre réduit λ^{37} de pairs, qui se chargeront de la transmettre à leur tour. Le mécanisme de dissémination des mises à jour de SWIM fonctionne donc de la manière suivante.

37. [30] montre que choisir une valeur constante faible comme λ suffit néanmoins à garantir la dissémination des mises à jour à l'ensemble du réseau.

Chaque mise à jour du groupe est stockée dans une liste et se voit attribuer un compteur entier, initialisé avec $\lambda \log n$ où n est le nombre de noeuds. À chaque génération d'un message pour le mécanisme de détection des défaillances, un nombre arbitraire de mises à jour sont sélectionnées dans la liste et attachées au message. Leur compteurs respectifs sont décrémentés. Une fois que le compteur d'une mise à jour atteint 0, celle-ci est retirée de la liste.

À la réception d'un message, le noeud le traite comme définit précédemment en section 4.3.2. De manière additionnelle, il intègre dans sa liste des collaborateur-rices les mises à jour attachées au message en utilisant les règles suivantes :

Définition 61 (Relation $<_s$). La relation $<_s$ est la relation d'ordre total strict sur les valeurs de *nodeStatus* suivante :

$$Alive <_s Suspect <_s Confirm$$

Définition 62 (Relation $<_t$). Étant donné deux tuples $t = \langle nodeStatus, nodeIncarn \rangle$ et $t' = \langle nodeStatus', nodeIncarn' \rangle$, nous avons :

$$t <_t t' \quad \text{iff} \quad (nodeStatus <_s nodeStatus') \quad \vee \\ (nodeStatus = nodeStatus' \wedge nodeIncarn < nodeIncarn')$$

Ainsi, le mécanisme de dissémination des mises à jour du groupe réutilise les messages du mécanisme de détection des défaillances pour diffuser les modifications. Cela permet de propager les évolutions de la liste des collaborateur-rices sans ajouter de message supplémentaire. De plus, les règles de précedence sur l'état d'un collaborateur permettent aux noeuds de converger même si les mises à jour sont reçues dans un ordre distinct.

Modifications apportées

Nous avons ensuite apporté plusieurs modifications à la version du protocole SWIM présentée dans [30]. Notre première modification porte sur l'ordre de priorité entre les états d'un pair.

Modification de l'ordre de précedence. Dans la version originale, un pair désigné comme défaillant l'est de manière irrévocable. Ce comportement est dû au fait que la relation d'ordre $<_t$ utilise d'abord les valeurs de *nodeStatus* pour ordonner deux états pour un noeud donné. Ce n'est seulement qu'en cas d'égalité que $<_t$ considère les valeurs de *nodeIncarn*. Ainsi, un noeud déclaré comme défaillant par un autre noeud doit changer d'identité pour rejoindre de nouveau le groupe.

Ce choix n'est cependant pas anodin : il implique que la taille de la liste des collaborateur-rices croît de manière linéaire avec le nombre de connexions. S'agissant du paramètre avec le plus grand ordre de grandeur de l'application, nous avons cherché à le diminuer.

Nous avons donc modifié la relation d'ordre $<_t$ de la manière suivante :

Définition 63 (Relation $<_{\nu}$). Étant donné deux tuples $t = \langle nodeStatus, nodeIncarn \rangle$ et $t' = \langle nodeStatus', nodeIncarn' \rangle$, nous avons :

$$t <_{\nu} t' \quad \text{iff} \quad (nodeIncarn < nodeIncarn') \quad \vee \\ (nodeIncarn = nodeIncarn' \wedge nodeStatus' <_s nodeStatus')$$

Ces modifications permettent de donner la précedence au numéro d'incarnation, et d'utiliser le statut du collaborateur pour trancher seulement en cas d'égalité par rapport au numéro d'incarnation actuel. Ceci permet à un noeud auparavant déclaré comme défaillant de revenir dans le groupe en incrémentant son numéro d'incarnation. La taille de la liste des collaborateur-rices devient dès lors linéaire par rapport au nombre de noeuds.

Ces modifications n'ont pas d'impact sur la convergence des listes des collaborateur-rices des différents noeuds. Une étude approfondie reste néanmoins à effectuer pour déterminer si ces modifications ont un impact sur la vitesse à laquelle un noeud défaillant est déterminé comme tel par l'ensemble des noeuds.

Ajout d'un mécanisme de synchronisation. La seconde modification que nous avons effectué concerne l'ajout d'un mécanisme de synchronisation entre pairs. En effet, le papier ne précise pas de procédure particulière lorsqu'un nouveau pair rejoint le réseau. Pour obtenir la liste des collaborateur-rices, ce dernier doit donc la demander à un autre pair.

Nous avons donc implémenté pour la liste des collaborateur-rices un mécanisme d'anti-entropie : à sa connexion, puis de manière périodique, un noeud envoie une requête de synchronisation à un noeud cible choisi de manière aléatoire. Ce message sert aussi au noeud source à transmettre l'état courant de sa liste des collaborateurs au noeud cible. En réponse, le noeud cible lui envoie l'état courant de sa propre liste. À la réception de cette dernière, le noeud source fusionne la liste reçue avec sa propre liste. Cette fusion conserve l'entrée la plus récente pour chaque noeud.

Pour récapituler, les mises à jour du groupe sont diffusées de manière atomique de façon épidémique, en utilisant les messages du mécanisme de détection des défaillances des noeuds. De manière additionnelle, un mécanisme d'anti-entropie permet à deux noeuds de synchroniser l'état de leur liste des collaborateurs respective. Ce mécanisme nous permet de pallier les défaillances éventuelles du réseau. Ainsi, dans les faits, nous avons mis en place un CRDT synchronisé par différences d'états (cf. section 2.2.2, page 27) pour la liste des collaborateur-rices.

Synthèse

Pour générer et maintenir la liste des collaborateur-rices, nous avons implémenté le protocole distribué d'appartenance au réseau SWIM [30]. Par rapport à la version originale, nous avons procédé à plusieurs modifications, notamment pour gérer plus efficacement les reconnections successives d'un même noeud.

Ainsi, nous avons implémenté un mécanisme dont la complexité spatiale dépend linéairement du nombre de noeuds, et non plus du nombre de connexions (cf. section 4.3.2, page 129). La complexité en temps et la complexité en communication restent quant à elles inchangées par rapport à la version présentée dans [30], c.-à-d. elles dépendent toujours de paramètres dont nous choisissons les valeurs : la fréquence de déclenchement du mécanisme de détection de défaillance et le nombre de mises à jour du groupe propagées par message.

Des améliorations au protocole SWIM ont été proposées dans [31]. Ces modifications visent notamment à réduire le délai de détection d'un noeud défaillant, ainsi que réduire le taux de faux positifs. Ainsi, une perspective est d'implémenter ces améliorations dans MUTE.

4.3.3 Curseurs

Toujours dans le but d'offrir des fonctionnalités de conscience de groupe aux utilisateurs pour leur permettre de se coordonner aisément, nous avons implémenté dans MUTE l'affichage des curseurs distants.

Pour représenter fidèlement la position des curseurs des collaborateur-rices distants, nous nous reposons sur les identifiants du CRDT choisi pour représenter la séquence. Le fonctionnement est similaire à la gestion des modifications du document : lorsque l'éditeur indique que l'utilisateur a déplacé son curseur, nous récupérons son nouvel index. Nous recherchons ensuite l'identifiant correspondant à cet index dans la séquence répliquée et le diffusons aux collaborateur-rices.

À la réception de la position d'un curseur distant, nous récupérons l'index correspondant à cet identifiant dans la séquence répliquée et représentons un curseur à cet index. Il est intéressant de noter que si l'identifiant a été supprimé en concurrence, nous pouvons à la place récupérer l'index de l'élément précédent et ainsi indiquer à l'utilisateur où son collaborateur est actuellement en train de travailler.

De façon similaire, nous gérons les sélections de texte à l'aide de deux curseurs : un curseur de début et un curseur de fin de sélection.

4.4 Couche livraison

Comme indiqué précédemment, la couche livraison est formée d'un unique composant, que nous nommons module de livraison. Ce module est associé aux CRDTs synchronisés par opérations représentant le document texte, c.-à-d. `LogootSplit` ou `RenamableLogootSplit`.

Le rôle de ce module est de garantir que le modèle de livraison des opérations requis par le CRDT pour assurer la cohérence à terme (cf. Définition 10, page 12) soit satisfait, c.-à-d. que l'ensemble des opérations soient livrées dans un ordre correct à l'ensemble des noeuds.

Pour cela, le module de livraison doit implémenter les contraintes imposées par ces CRDTs sur l'ordre de livraison des opérations (cf. Définition 47, page 60 et Définition 52, page 60). Ces contraintes étant spécifiques au CRDT utilisé, nous avons implémenté un module de livraison dédié à chacun. Nous décrivons dans cette section comment nous avons implémenté le module de livraison pour `RenamableLogootSplit`.

Pour rappel, le modèle de livraison de `RenamableLogootSplit` est le suivant :

- (i) Une opération doit être livrée à l'ensemble des noeuds à terme.
- (ii) Une opération doit être livrée qu'une seule et unique fois aux noeuds.

- (iii) Une opération *remove* doit être livrée à un noeud une fois que les opérations *insert* des éléments concernés par la suppression ont été livrées à ce dernier.
- (iv) Une opération peut être délivrée à un noeud qu'à partir du moment où l'opération *rename* qui a introduit son époque de génération a été délivrée à ce même noeud.

4.4.1 Livraison des opérations en exactement un exemplaire

Afin de respecter la contrainte de livraison en exactement un exemplaire, il est nécessaire d'identifier de manière unique chaque opération. Pour cela, le module de livraison ajoute un *Dot* [104] à chaque opération :

Définition 64 (*Dot*). Un *Dot* est une paire $\langle nodeId, nodeSyncSeq \rangle$ où

- (i) *nodeId*, l'identifiant unique du noeud qui a généré l'opération.
- (ii) *nodeSyncSeq*, le numéro de séquence courant du noeud à la génération de l'opération.

Il est à noter que *nodeSyncSeq* est différent du *nodeSeq* utilisé dans LogootSplit et RenamableLogootSplit (cf. section 2.4, page 53). En effet, *nodeSyncSeq* se doit d'augmenter à chaque opération tandis que *nodeSeq* n'augmente qu'à la création d'un nouveau bloc, c.-à-d. lors d'une insertion ou d'un renommage. Les contraintes étant différentes, il est nécessaire de distinguer ces deux données.

Chaque noeud maintient une structure de données représentant l'ensemble des opérations reçues par le pair. Elle permet de vérifier à la réception d'une opération si le dot de cette dernière est déjà connu. S'il s'agit d'un nouveau dot, le module de livraison peut livrer l'opération au CRDT et ajouter son dot à la structure. Le cas échéant, cela indique que l'opération a déjà été livrée précédemment et doit être ignorée cette fois-ci.

Plusieurs structures de données sont adaptées pour maintenir l'ensemble des opérations reçues. Dans le cadre de MUTE, nous avons choisi d'utiliser un vecteur de versions. Cette structure nous permet de réduire à un dot par noeud le surcoût en métadonnées du module de livraison, puisqu'il ne nécessite que de stocker le dot le plus récent par noeud. Cette structure permet aussi de vérifier en temps constant si une opération est déjà connue. La figure 4.7 illustre son fonctionnement.

Dans cet exemple, deux noeuds A et B répliquent une séquence. Initialement, celle-ci contient les éléments "WORLD". Ces éléments ont été insérés un par un par le noeud A, donc par le biais des opérations a_1 à a_4 . Le module de livraison de chaque noeud maintient donc initialement le vecteur de versions $\langle A : 4 \rangle$.

Le noeud A insère l'élément "R" entre les éléments "O" et "L". Cette modification est alors labellisée a_5 par son module de livraison et est envoyée au noeud B. À la réception de cette opération, le module de B compare son dot avec son vecteur de versions local. L'opération a_5 étant la prochaine opération attendue de A, celle-ci est acceptée : elle est alors livrée au CRDT et le vecteur de versions est mis à jour.

Le noeud B supprime ensuite l'élément nouvellement inséré. S'agissant de la première modification de B, cette modification b_1 ajoute l'entrée correspondante dans le vecteur

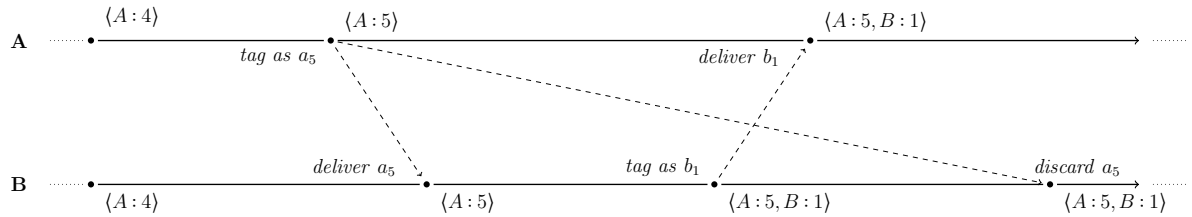
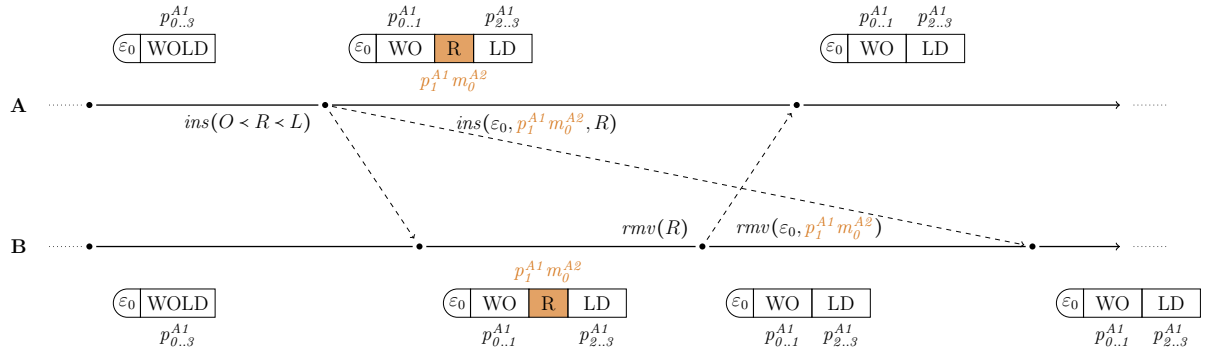


FIGURE 4.7 – Gestion de la livraison en exactement un exemplaire des opérations

de versions $\langle A : 5, B : 1 \rangle$. L'opération est envoyée au noeud A. Cette opération étant la prochaine opération attendue de B, elle est acceptée et livrée.

Finalement, le noeud B reçoit de nouveau l'opération a_5 . Son module de livraison détermine alors qu'il s'agit d'un doublon : l'opération apparaît déjà dans le vecteur de versions $\langle A : 5, B : 1 \rangle$. L'opération est donc ignorée, et la résurgence de l'élément "I" empêchée.

Il est à noter que dans le cas où un noeud recevrait une opération avec un dot plus élevé que celui attendu (e.g. le noeud A recevrait une opération b_3 à la fin de l'exemple), cette opération serait mise en attente. En effet, livrer cette opération nécessiterait de mettre à jour le vecteur de versions à $\langle A : 5, B : 3 \rangle$ et masquerait le fait que l'opération b_2 n'a jamais été reçue. L'opération b_3 est donc mise en attente jusqu'à la livraison de l'opération b_2 .

Ainsi, l'implémentation de livraison en exactement un exemplaire d'une opération avec un vecteur de versions comme structure de données force une livraison First In, First Out (FIFO) des opérations par noeuds. Il s'agit d'une contrainte non-nécessaire et qui peut introduire des délais dans la collaboration, notamment si une opération d'un noeud est perdue par le réseau. Nous jugeons cependant acceptable ce compromis entre le surcoût du mécanisme de livraison en exactement un exemplaire et son impact sur l'expérience utilisateur.

Toutefois, pour retirer cette contrainte superflue, il est possible de remplacer cette structure de données par un *Interval Version Vector* [105]. Au lieu d'enregistrer seulement le dernier dot intégré par noeud, cette structure de données enregistre les intervalles

de dots intégrés. Ceci permet une livraison *dans le désordre* des opérations, c.-à-d. une livraison des opérations dans un ordre différent de leur ordre d'émission. Cette structure de données permet ainsi de garantir une livraison en exactement un exemplaire sans introduire de dépendances superflues entre les opérations, tout en compactant efficacement les données stockées par le module de livraison à terme.

4.4.2 Livraison de l'opération *remove* après l'opération *insert*

La seconde contrainte que le modèle de livraison doit respecter spécifie qu'une opération *remove* doit être livrée après les opérations *insert* insérant les éléments concernés.

Pour cela, le module de livraison ajoute un ensemble *Deps* à chaque opération *remove* avant de la diffuser :

Définition 65 (*Deps*). *Deps* est un ensemble d'opérations. Il représente l'ensemble des opérations dont dépend l'opération *remove* et qui doivent donc être livrées au préalable.

Plusieurs structures de données sont adaptées pour représenter les dépendances de l'opération *remove*. Dans le cadre de MUTE, nous avons choisi d'utiliser un ensemble de dots : pour chaque élément supprimé par l'opération *remove*, nous identifions le noeud l'ayant inséré et nous ajoutons le dot correspondant à l'opération la plus récente de ce noeud à l'ensemble des dépendances. Cette approche nous permet de limiter à un dot par élément supprimé le surcoût en métadonnées des dépendances et de les calculer en un temps linéaire par rapport au nombre d'éléments supprimés. Nous illustrons le calcul et l'utilisation des dépendances de l'opération *remove* à l'aide de la figure 4.8.

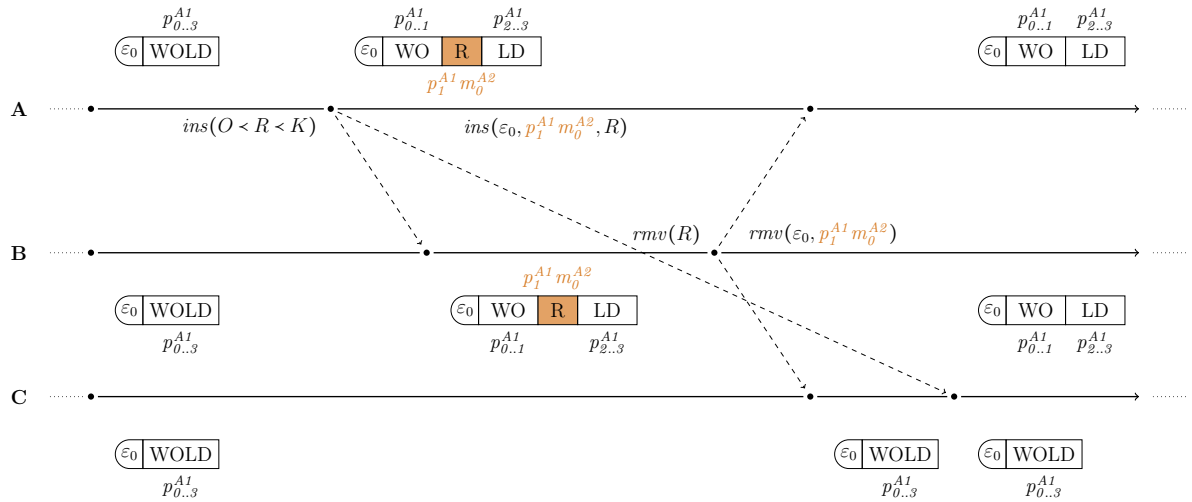
Dans cet exemple, trois noeuds A, B et C répliquent et éditent collaborativement une séquence. Les trois noeuds partagent le même état initial : une séquence contenant les éléments "WORLD" et un vecteur de versions $\langle A : 4 \rangle$.

Le noeud A insère l'élément "L" entre les éléments "R" et "D". Cet élément se voit attribué l'identifiant $p_I^{A1} m_O^{A2}$. L'opération correspondante a_5 est diffusée aux autres noeuds.

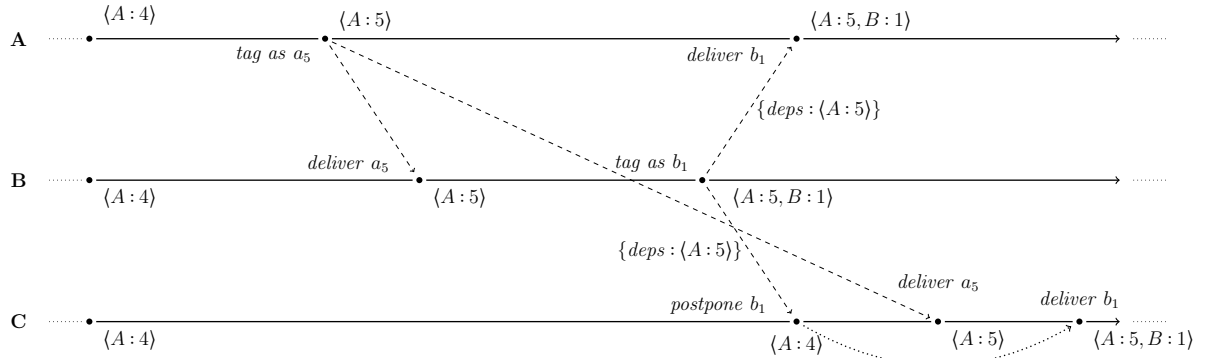
À la réception de cette dernière, le noeud B supprime l'élément "L" nouvellement inséré et génère l'opération b_1 correspondante. Comme indiqué précédemment, l'opération b_1 étant une opération *remove*, le module de livraison calcule ses dépendances avant de la diffuser. Pour chaque élément supprimé ("L"), le module de livraison récupère l'identifiant de l'élément ($p_I^{A1} m_O^{A2}$) et en extrait l'identifiant du noeud qui l'a inséré (A). Le module ajoute alors le dot de l'opération la plus récente reçue de ce noeud ($\langle A : 5 \rangle$) à l'ensemble des dépendances de l'opération. L'opération est ensuite diffusée.

À la réception de l'opération b_1 , le noeud A vérifie s'il possède l'ensemble des dépendances de l'opération. Le noeud A ayant déjà intégré l'opération a_5 , le module de livraison livre l'opération b_1 au CRDT.

À l'inverse, lorsque le noeud C reçoit l'opération b_1 , il n'a pas encore reçu l'opération a_5 . L'opération b_1 est alors mise en attente. À la réception de l'opération a_5 , celle-ci est livrée. Le module de livraison ré-évalue alors le cas de l'opération b_1 et détermine qu'elle peut à présent être livrée.



(a) Exécution avec livraison dans le désordre d'une insertion et de sa suppression



(b) État et comportement du module de livraison au cours de l'exécution décrite en Figure 4.8a

FIGURE 4.8 – Gestion de la livraison des opérations *remove* après les opérations *insert* correspondantes

Il est à noter que notre approche pour générer l'ensemble des dépendances est une approximation. En effet, nous ajoutons les dots des opérations les plus récentes des auteurs des éléments supprimés. Nous n'ajoutons pas les dots des opérations qui ont spécifiquement inséré les éléments supprimés. Pour cela, il serait nécessaire de parcourir le journal des opérations à la recherche des opérations *insert* correspondantes. Cette méthode serait plus coûteuse, sa complexité dépendant du nombre d'opérations dans le journal des opérations, et incompatible avec un mécanisme tronquant le journal des opérations en utilisant la stabilité causale. Notre approche introduit un potentiel délai dans la livraison d'une opération *remove* par rapport à une livraison utilisant ses dépendances exactes, puisqu'elle va reposer sur des opérations plus récentes et potentiellement encore inconnues par le noeud. Mais il s'agit là aussi d'un compromis que nous jugeons acceptable entre le surcoût du mécanisme de livraison et l'expérience utilisateur.

4.4.3 Livraison des opérations après l'opération *rename* introduisant leur époque

La troisième contrainte spécifiée par le modèle de livraison est qu'une opération doit être livrée après l'opération *rename* qui a introduit son époque de génération.

Pour cela, le module de livraison doit donc récupérer l'époque courante de la séquence répliquée, récupérer le dot de l'opération *rename* l'ayant introduite et l'ajouter en tant que dépendance de chaque opération. Cependant, dans notre implémentation, le module de livraison et le module représentant la séquence répliquée sont découplés et ne peuvent interagir directement l'un avec l'autre.

Pour remédier à ce problème, le module de livraison maintient une structure supplémentaire : un vecteur des dots des opérations *rename* connues. À la réception d'une opération *rename* distante, l'entrée correspondante de son auteur est mise à jour avec le dot de la nouvelle époque introduite. À la génération d'une opération locale, l'opération est examinée pour récupérer son époque de génération. Le module conserve alors seulement l'entrée correspondante dans le vecteur des dots des opérations *rename*. À ce stade, le contenu du vecteur est ajouté en tant que dépendance de l'opération. Ensuite, si l'opération locale s'avère être une opération *rename*, le vecteur est modifié pour ne conserver que le dot de l'époque introduite par l'opération. La figure 4.9 illustre ce fonctionnement.

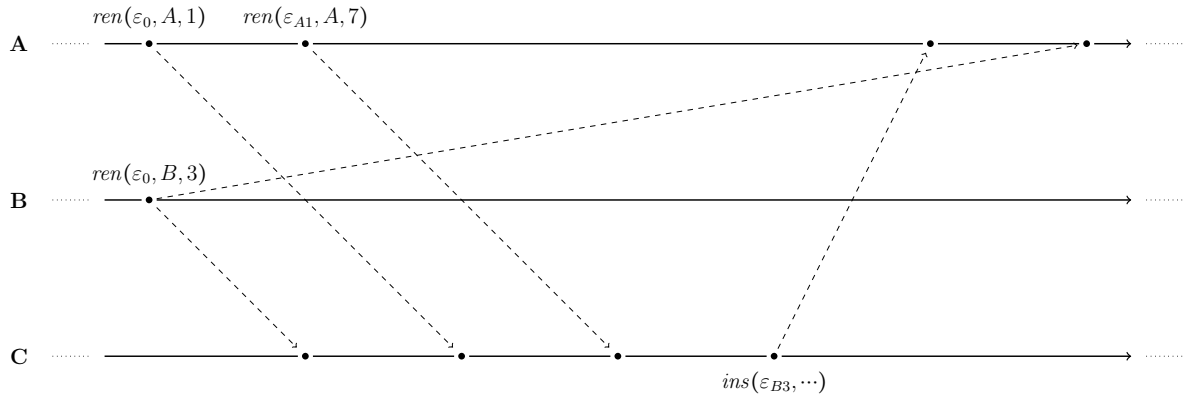
Dans la Figure 4.9a, nous décrivons une exécution suivante en ne faisant apparaître que les opérations importantes : les opérations *rename* et une opération *insert* finale. Dans cette exécution, trois noeuds A, B et C répliquent et éditent collaborativement une séquence. Initialement, aucune opération *rename* n'a encore eu lieu. Le noeud A effectue une première opération *rename* (a_1) puis une seconde opération *rename* (a_7), et les diffuse. En concurrence, le noeud B génère et propage sa propre opération *rename* (b_3). De son côté, le noeud C reçoit les opérations b_3 , puis a_1 et a_7 . Il émet ensuite une opération *insert* c_9 . Le noeud A reçoit cette opération avant de finalement recevoir l'opération c_9 .

Dans la Figure 4.9b, nous faisons apparaître l'état du module de livraison et les décisions prises par ce dernier au cours de l'exécution. Initialement, le vecteur des dots des opérations *rename* connues est vide. Ainsi, lorsque A génère l'opération a_1 , celle-ci ne se voit ajouter aucune dépendance (nous ne représentons pas les dépendances des opérations qui correspondent à l'ensemble vide). A met ensuite à jour son vecteur des dots des opérations *rename* avec le dot $\langle A : 1 \rangle$. B procède de manière similaire avec l'opération b_3 .

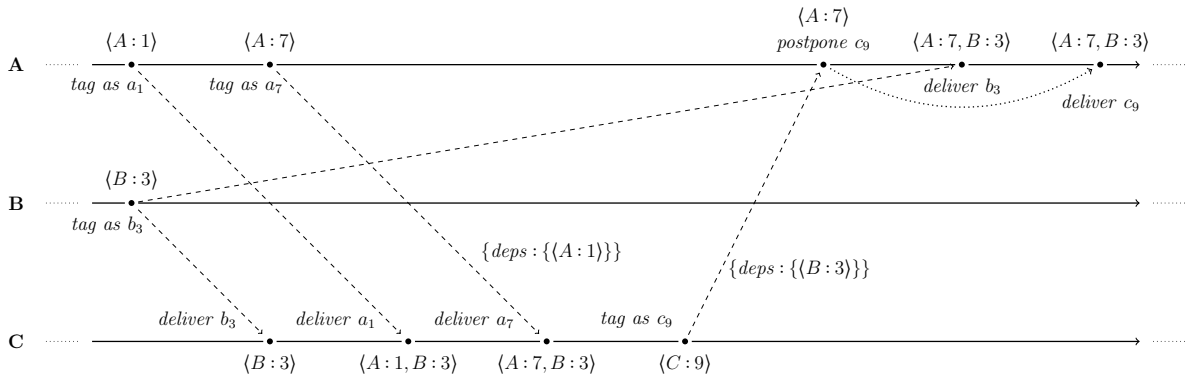
Quand A génère l'opération a_7 , le dot $\langle A : 1 \rangle$ est ajouté en tant que dépendance. Le dot $\langle A : 7 \rangle$ remplace ensuite ce dernier dans le vecteur des dots des opérations *rename*.

À la réception de l'opération b_3 , le module de livraison de C peut la livrer au CRDT, l'ensemble de ses dépendances étant vérifié. Le noeud C ajoute alors à son vecteur des dots des opérations *rename* le dot $\langle B : 3 \rangle$. Il procède de même pour l'opération a_1 : il la livre et ajoute le dot $\langle A : 1 \rangle$. Le module de livraison ne connaissant pas l'époque courante de la séquence répliquée, il maintient les deux dots localement.

Lorsque le noeud C reçoit l'opération a_7 , l'ensemble de ses contraintes est vérifié : l'opération a_1 a été livrée précédemment. L'opération est donc livrée et le vecteur de dots des opérations *rename* mis à jour avec $\langle A : 7 \rangle$.



(a) Exécution



(b) État et comportement du module de livraison au cours de l'exécution décrite en Figure 4.9a

FIGURE 4.9 – Gestion de la livraison des opérations après l'opération *rename* qui introduit leur époque

Quand le noeud C effectue l'opération locale c_9 , le module de livraison obtient l'information de l'époque courante de la séquence : b_3 . C met à jour son vecteur de dots des opérations *rename* pour ne conserver que l'entrée du noeud B : $\langle B : 3 \rangle$. Ce dot est ajouté en tant que dépendance de l'opération c_9 avant sa diffusion.

À la réception de l'opération c_9 par le noeud A, cette opération est mise en attente par le module de livraison, l'opération b_3 n'ayant pas encore été livrée. Le noeud reçoit ensuite l'opération b_3 . Son vecteur des dots des opérations *rename* est mis à jour et l'opération livrée. Les conditions pour l'opération c_9 étant désormais remplies, l'opération est alors livrée.

Cette implémentation de la contrainte de la livraison *epoch-based* dispose de plusieurs avantages : sa complexité spatiale dépend linéairement du nombre de noeuds et les opérations de mise à jour du vecteur des dots des opérations *rename* s'effectuent en temps constant. De plus, seul un dot est ajouté en tant que dépendance des opérations, la taille du vecteur des dots étant ramené à 1 au préalable. Finalement, cette implémentation ne contraint pas une livraison causale des opérations *rename* et permet donc de les appliquer dès que possible.

4.4.4 Livraison des opérations à terme

La contrainte restante du modèle de livraison précise que toutes les opérations doivent être livrées à l'ensemble des noeuds à terme. Cependant, le réseau étant non-fiable, des messages peuvent être perdus au cours de l'exécution. Il est donc nécessaire que les noeuds rediffusent les messages perdus pour assurer leur livraison à terme.

Pour cela, nous implémentons un mécanisme d'anti-entropie basé sur [53]. Ce mécanisme permet à un noeud source de se synchroniser avec un autre noeud cible. Il est exécuté par l'ensemble des noeuds de manière indépendante. Nous décrivons ci-dessous son fonctionnement.

De manière périodique, le noeud choisit un autre noeud cible de manière aléatoire. Le noeud source lui envoie alors une représentation de son état courant, c.-à-d. son vecteur de versions.

À la réception de ce message, le noeud cible compare le vecteur de versions reçu par rapport à son propre vecteur de versions. À partir de ces données, il identifie les dots des opérations de sa connaissance qui sont inconnues au noeud source. Grâce à leur dot, le noeud cible retrouve ces opérations depuis son journal des opérations. Il envoie alors une réponse composée de ces opérations au noeud source.

À la réception de la réponse, le noeud source intègre normalement les opérations reçues. La figure 4.10 illustre ce mécanisme.

Dans la Figure 4.10a, nous représentons le début d'une exécution à laquelle participent trois noeuds : A, B et C. Initialement, les trois noeuds sont synchronisés. Leur vecteurs de versions sont identiques et ont pour valeur $\langle A : 7, B : 3, C : 1 \rangle$.

Le noeud A effectue les opérations a_8 puis a_9 et les diffuse sur le réseau. Le noeud B reçoit ces opérations et les livre à son CRDT. Il effectue ensuite et propage l'opération b_4 , qui est reçue et livrée par A. Ils atteignent tous deux la version représenté par le vecteur $\langle A : 9, B : 4, C : 1 \rangle$

De son côté, le noeud C ne reçoit pas les opérations a_8 et a_9 à cause d'une perte de message du réseau. Néanmoins, cela ne l'empêche pas de livrer l'opération b_4 ³⁸ à sa réception et d'obtenir la version $\langle A : 7, B : 4, C : 1 \rangle$.

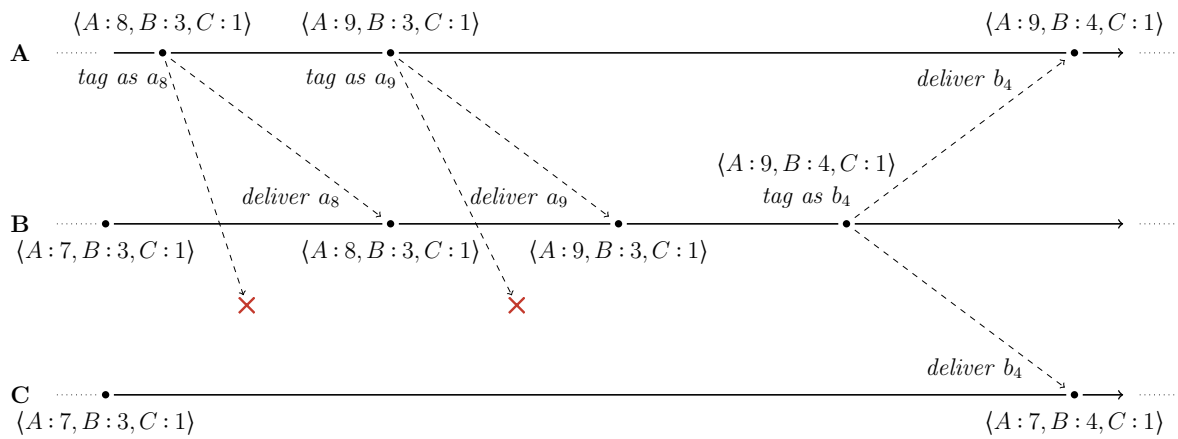
La Figure 4.10b continue ce scénario. Le noeud C déclenche son mécanisme d'anti-entropie. Il choisit aléatoirement le noeud B comme noeud cible. Il lui envoie un message de synchronisation avec pour contenu le vecteur de versions $\langle A : 7, B : 8, C : 1 \rangle$.

À la réception de ce message, le noeud B compare ce vecteur avec le sien. Il détermine que le noeud C n'a pas reçu les opérations a_8 et a_9 . B les récupère depuis son journal des opérations et les envoie à C par le biais d'un nouveau message.

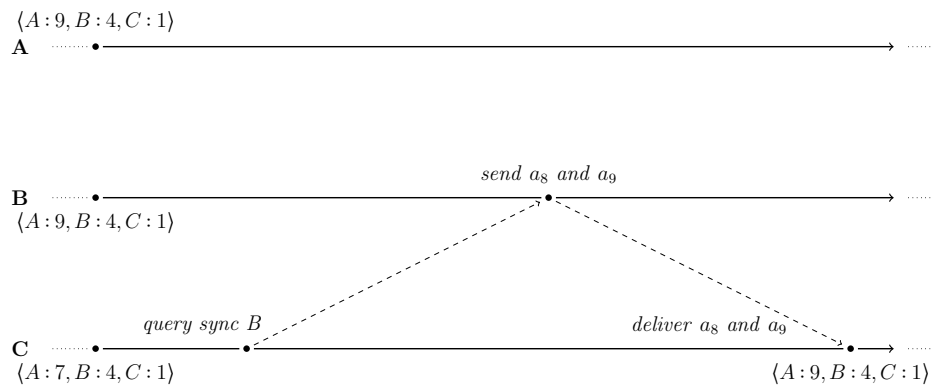
À la réception de la réponse de B, le noeud C livre les opérations a_8 et a_9 . Il atteint alors le même état que A et B, représenté par le vecteur de versions $\langle A : 9, B : 4, C : 1 \rangle$.

Ce mécanisme d'anti-entropie nous permet ainsi de garantir la livraison à terme de toutes les opérations et de compenser les pertes de message. Il nous sert aussi de mécanisme de synchronisation : à la connexion d'un pair, celui-ci utilise ce mécanisme pour

38. On considère que a_8 , a_9 et b_4 sont des opérations d'insertion, c.-à-d. n'ont pas de dépendances.



(a) Exécution avec pertes de messages à destination du noeud C



(b) Utilisation du mécanisme d'anti-entropie par le noeud C pour se synchroniser avec le noeud B

FIGURE 4.10 – Gestion de la livraison des opérations à terme

recupérer les opérations effectuées depuis sa dernière connexion. Dans le cas où il s'agit de la première connexion du pair, il lui suffit d'envoyer un vecteur de versions vide pour récupérer l'intégralité des opérations.

Ce mécanisme propose plusieurs avantages. Son exécution n'implique que le noeud source et le noeud cible, ce qui limite les coûts de coordination. De plus, si une défaillance a lieu lors de l'exécution du mécanisme (perte d'un des messages, panne du noeud cible...), cette défaillance n'est pas critique : le noeud source se synchronisera à la prochaine exécution du mécanisme. Ensuite, ce mécanisme réutilise le vecteur de versions déjà nécessaire pour la livraison en exactement un exemplaire, comme présenté en sous-section 4.4.1. Il ne nécessite donc pas de stocker une nouvelle structure de données pour détecter les différences entre noeuds.

En contrepartie, la principale limite de ce mécanisme d'anti-entropie est qu'il nécessite de maintenir et de parcourir périodiquement le journal des opérations pour répondre aux requêtes de synchronisation. La complexité spatiale et en temps du mécanisme dépend donc linéairement du nombre d'opérations. Qui plus est, nous sommes dans l'incapacité de tronquer le journal des opérations en se basant sur la stabilité causale des opérations puisque nous utilisons ce mécanisme pour mettre à niveau les nouveaux pairs. À

moins de mettre en place un mécanisme de compression du journal comme évoqué en sous-section 3.5.6, ce journal des opérations croît de manière monotone. Néanmoins, une alternative possible est de mettre en place un système de chargement différé des opérations pour ne pas surcharger la mémoire.

4.5 Couche réseau

Pour permettre aux différents noeuds de communiquer, MUTE repose sur la librairie *Netflux*³⁹. Développée au sein de l'équipe *Coast*, cette librairie permet de construire un réseau P2P entre des navigateurs, mais aussi des agents logiciels.

4.5.1 Établissement d'un réseau P2P entre navigateurs

Pour créer un réseau P2P entre navigateurs, *Netflux* utilise la technologie *Web Real-Time Communication (WebRTC)*. *WebRTC* est une API⁴⁰ de navigateur spécifiée en 2011, et en cours d'implémentation dans les différents navigateurs depuis 2013. Elle permet de créer une connexion directe entre deux navigateurs pour échanger des médias audio et/ou vidéo, ou simplement des données.

Cette API utilise pour cela un ensemble de protocoles. Ces protocoles réintroduisent des serveurs dans l'architecture système de MUTE. Dans la figure 4.11, nous représentons une collaboration réalisée avec MUTE, composé de noeuds formant un réseau P2P, de différents serveurs nécessaires à la mise en place du réseau P2P. Finalement, nous représentons les interactions entre les noeuds et ces serveurs.

Nous décrivons ci-dessous le rôle respectif de chaque type de serveur dans la collaboration.

Serveur de signalisation

Pour rejoindre un réseau P2P déjà établi, un nouveau noeud a besoin de découvrir les noeuds déjà connectés et de pouvoir communiquer avec eux. Le serveur de signalisation offre ces fonctionnalités.

Au moins un noeud du réseau P2P doit maintenir une connexion avec le serveur de signalisation. À sa connexion, un nouveau noeud contacte le serveur de signalisation. Il est mis en relation avec un noeud du réseau P2P par son intermédiaire et échange les différents messages de *WebRTC* nécessaires à l'établissement d'une connexion P2P entre eux.

Une fois cette première connexion P2P établie, le nouveau noeud contacte et communique avec les autres noeuds par l'intermédiaire du premier noeud. Il peut alors terminer sa connexion avec le serveur de signalisation.

39. <https://github.com/coast-team/netflux>

40. Application Programming Interface (API) : Interface de Programmation

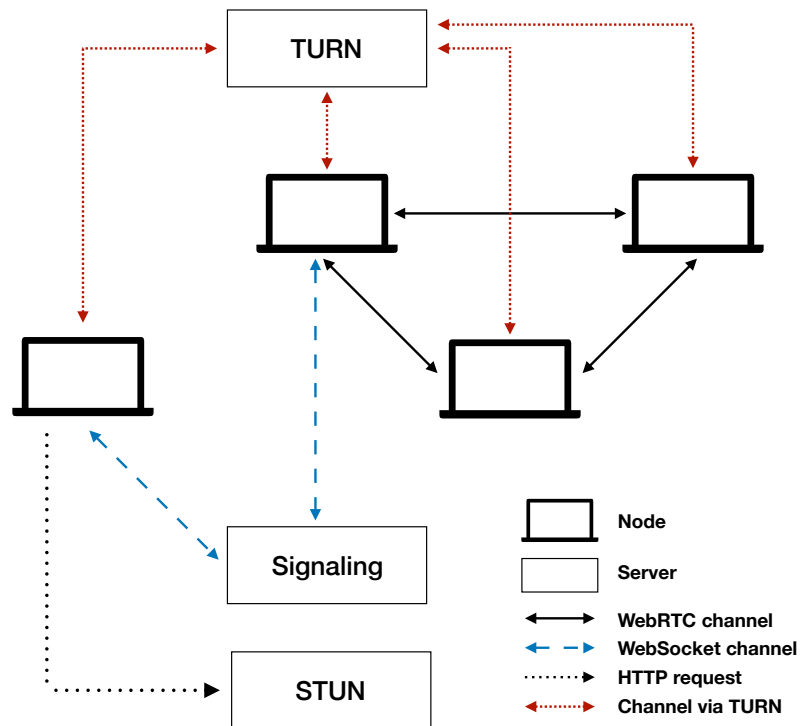


FIGURE 4.11 – Architecture système pour la couche réseau de MUTE

Serveur STUN

Pour se connecter, les noeuds doivent s'échanger plusieurs informations logicielles et matérielles, notamment leur adresse IP publique respective. Cependant, un noeud n'a pas accès à cette donnée lorsque son routeur utilise le protocole NAT. Le noeud doit alors la récupérer.

Pour permettre aux noeuds de découvrir leur adresse IP publique, WebRTC repose sur le protocole STUN. Ce protocole consiste simplement à contacter un serveur tiers dédié à cet effet. Ce serveur retourne en réponse au noeud qui le contacte son adresse IP publique.

Serveur TURN

Il est possible que des noeuds provenant de réseaux différents ne puissent établir une connexion P2P directe entre eux, par exemple à cause de restrictions imposées par leur pare-feux respectifs. Pour contourner ce cas de figure, WebRTC utilise le protocole TURN.

Ce protocole consiste à utiliser un serveur tiers comme relais entre les noeuds. Ainsi, les noeuds peuvent communiquer par son intermédiaire tout au long de la collaboration. Les échanges sont chiffrés, afin que le serveur TURN ne représente pas une faille de sécurité.

Rôles des serveurs

Ainsi, WebRTC implique l'utilisation de plusieurs serveurs.

Les serveurs de signalisation et STUN sont nécessaires pour permettre à de nouveaux noeuds de rejoindre la collaboration. Autrement dit, leur rôle est ponctuel : une fois le réseau P2P établi, les noeuds n'ont plus besoin d'eux. Ces serveurs peuvent alors être coupés sans impacter la collaboration.

À l'inverse, les serveurs TURN jouent un rôle plus prédominant dans la collaboration. Ils sont nécessaires dès lors que des noeuds proviennent de réseaux différents et sont alors requis tout au long de la collaboration. Une panne de ces derniers entraverait la collaboration puisqu'elle résulterait en une partition des noeuds. Il est donc primordial de s'assurer de la disponibilité et fiabilité de ces serveurs.

4.5.2 Topologie réseau et protocole de diffusion des messages

Netflux établit un réseau P2P par document. Chacun de ces réseaux est un réseau entièrement maillé : chaque noeud se connecte à l'ensemble des autres noeuds. Nous illustrons cette topologie par la figure 4.12.

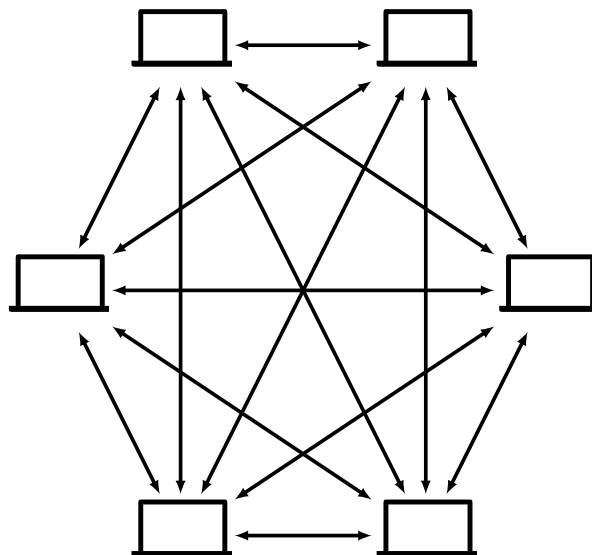


FIGURE 4.12 – Topologie réseau entièrement maillée

Cette topologie présente les avantages suivants :

- (i) Sa simplicité.
- (ii) Le nombre de sauts entre les noeuds, minimal, qui permet de minimiser le délai de communication.
- (iii) La redondance de ses routes, qui permet aux noeuds de continuer à communiquer même en cas de défaillance d'une ou plusieurs routes.

Cependant, cette topologie est limitée par sa capacité de passage à l'échelle. En effet, elle implique un nombre de connexions qui dépend linéairement du nombre de noeuds. Chacune de ces connexions impliquant un coût, cette topologie n'est adaptée qu'à des groupes de taille réduite.

De plus, nous associons à cette topologie réseau un protocole de diffusion des messages tout aussi simple : lorsqu'un noeud effectue une modification, il diffuse le message correspondant à l'ensemble des noeuds, c.-à-d. il envoie une copie du message à chacun des noeuds. La charge de travail pour la diffusion d'un message est donc assumée uniquement par son auteur, ce qui s'avère prohibitif dans le cadre de collaborations à large échelle.

Afin de supporter des collaborations à large échelle, il est donc nécessaire de mettre en place :

- (i) Une topologie limitant le nombre de connexions par noeud.
- (ii) Un protocole de diffusion des messages répartissant la charge entre les noeuds.

Le protocole d'échantillonnage aléatoire de pairs adaptatif Spray [32] répond à notre première limite. Ce protocole permet d'établir un réseau P2P connecté. Toutefois, la topologie adoptée limite le voisinage de chaque noeud, c.-à-d. le nombre de connexions que chaque noeud possède, à un facteur logarithmique par rapport au nombre total de noeuds. De plus, ce protocole est adapté à un réseau P2P dynamique, c.-à-d. il ajuste le voisinage des noeuds au fur et à mesure des connexions et déconnexions des noeuds.

La topologie résultante est propice à l'emploi d'un protocole de diffusion épidémique des messages, tel que celui utilisé par SWIM (cf. section 4.3.2, page 128). Pour rappel, ce type de protocole consiste à ce qu'un noeud ne diffuse un message qu'à un sous-ensemble de ses voisins. À la réception de son message, ses voisins diffusent à leur tour le message à une partie de leur voisinage, et ainsi de suite. L'emploi de ce type de protocole permet ainsi de répartir entre les noeuds la charge de travail nécessaire à la diffusion du message à l'ensemble des noeuds.

Ces modifications rendraient donc viables les collaborations à large échelle sur MUTE. En contrepartie, le délai nécessaire pour la diffusion d'une modification augmenterait, c.-à-d. le temps nécessaire pour qu'une modification effectuée par un noeud soit intégrée par les autres noeuds. Il s'agit toutefois d'un compromis que nous jugeons nécessaire.

4.6 Couche sécurité

La couche sécurité a pour but de garantir l'authenticité et la confidentialité des messages échangés par les noeuds. Pour cela, elle implémente un mécanisme de chiffrement de bout en bout.

Pour chiffrer les messages, MUTE utilise un mécanisme de chiffrement à base de clé de groupe. Le protocole choisi est le protocole Burmester-Desmedt [33]. Il nécessite que chaque noeud possède une paire de clés de chiffrement et enregistre sa clé publique auprès d'un PKI⁴¹.

Afin d'éviter qu'un PKI malicieux n'effectue une attaque de l'homme au milieu sur la collaboration, les noeuds doivent vérifier le bon comportement des PKI de manière non-coordonnée. À cet effet, MUTE implémente le mécanisme d'audit de PKI Trusternity [28, 29]. Son fonctionnement nécessite l'utilisation d'un registre public sécurisé *append-only*,

41. Public Key Infrastructure (PKI) : Infrastructure de gestion de clés

c.-à-d. une blockchain.

L'architecture système nécessaire pour la couche sécurité est présentée dans la figure 4.13.

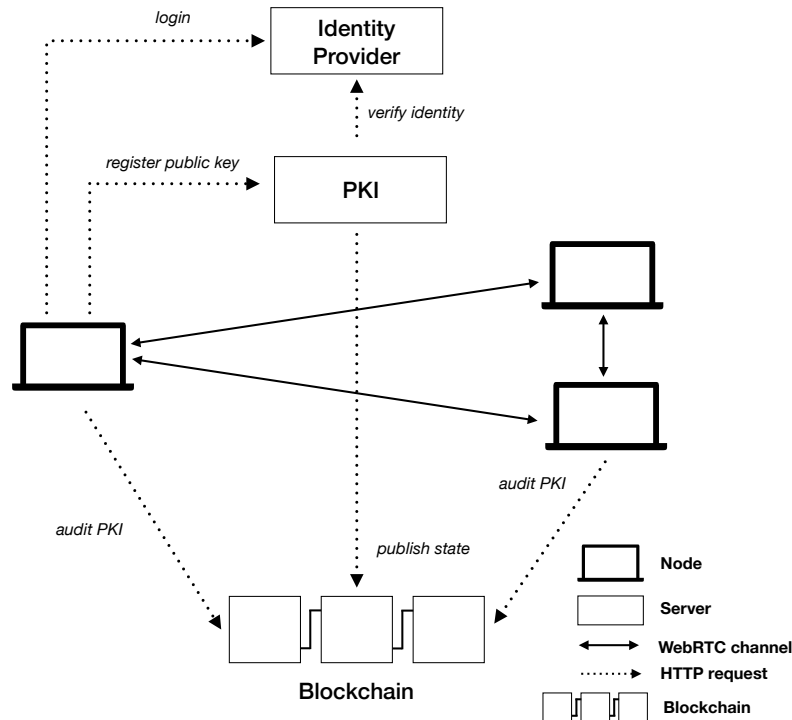


FIGURE 4.13 – Architecture système pour la couche sécurité de MUTE

Cette couche sécurité s'ajoute au mécanisme de chiffrement des messages inhérent à WebRTC. Cela nous offre de nouvelles possibilités : plutôt que de créer un réseau P2P par document, nous pouvons désormais mettre en place un réseau P2P global. Les messages étant chiffrés de bout en bout, les nœuds peuvent communiquer en toute sécurité et confidentialité par l'intermédiaire de nœuds tiers, c.-à-d. des nœuds extérieurs à la collaboration.

Une limite de l'approche actuelle est que la clé de groupe change à chaque évolution des nœuds connectés : à chaque connexion ou déconnexion d'un nœud, une nouvelle clé est recalculée avec les collaborateurs présents. Ce facteur de changement de la clé de chiffrement, nécessaire pour garantir la *backward secrecy* et *forward secrecy* (cf. Définition 58, page 120 et Définition 59, page 120), induit plusieurs problèmes.

Tout d'abord, ce facteur nous empêche de réutiliser cette même clé de chiffrement pour mettre en place un mécanisme de stockage des opérations chiffrées chez un ou des tiers, e.g. sur des nœuds du réseau P2P extérieurs à la collaboration ou sur des agents de messages.

Le stockage des opérations chiffrées chez des tiers est une fonctionnalité qui améliorerait l'utilisabilité de l'application sans sacrifier la confidentialité des données. En effet, elle

permettrait à un noeud déconnecté de manière temporaire de récupérer à sa reconnexion les modifications effectuées entretemps par ses collaborateurs, même si ceux-ci se sont depuis déconnectés.

Cependant, la clé de chiffrement est modifiée à la déconnexion du noeud. Ainsi, les opérations suivantes sont chiffrées avec une nouvelle clé que le noeud déconnecté ne possède pas. À sa reconnexion, ce dernier ne sera pas en mesure de déchiffrer et d'intégrer les opérations effectuées en son absence.

L'évolution de la clé de chiffrement de groupe à chaque connexion ou déconnexion d'un noeud est donc incompatible avec l'utilisation de cette même clé pour le stockage sécurisé des opérations chez des tiers. Une autre clé de chiffrement, dédiée, devrait donc être mise en place.

Une seconde limite liée à ce facteur d'évolution est la complexité en temps du protocole de génération de la clé de groupe. En effet, nos évaluations ont montré que ce protocole met jusqu'à 6 secondes pour s'exécuter.

Dans le cadre d'un système P2P à large échelle sujet au churn, des périodes d'activités où des noeuds se connectent et déconnectent toutes les 6 secondes sont à envisager. Lors de tels pics d'activités, les noeuds seraient incapables de collaborer, faute de clé de chiffrement de groupe. Il convient donc soit d'étudier l'utilisation d'autres protocoles de génération de clés de chiffrement de groupe plus efficaces, soit de considérer relaxer les garanties de *backward secrecy* et de *forward secrecy* dans le cadre des collaborations à large échelle.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté Multi User Text Editor (MUTE), l'éditeur collaboratif temps réel P2P chiffré de bout en bout développé par notre équipe de recherche.

MUTE permet d'éditer de manière collaborative des documents texte. Pour représenter les documents, MUTE propose plusieurs CRDTs pour le type Séquence [26, 27, 24] issus des travaux de l'équipe. Ces CRDTs offrent de nouvelles méthodes de collaborer, notamment en permettant de collaborer de manière synchrone ou asynchrone de manière transparente.

Pour permettre aux noeuds de communiquer, MUTE repose sur la technologie Web Real-Time Communication (WebRTC). Cette technologie permet de construire un réseau P2P directement entre plusieurs navigateurs. Plusieurs serveurs sont néanmoins requis, notamment pour la découverte des pairs et pour la communication entre des noeuds lorsque leur pare-feux respectifs empêchent l'établissement d'une connexion directe.

Finalement, MUTE implémente un mécanisme de chiffrement de bout en bout garantissant l'authenticité et la confidentialité des échanges entre les noeuds. Ce mécanisme repose sur une clé de groupe de chiffrement qui est établie à l'aide du protocole [33].

Ce protocole nécessite que chaque noeud possède une paire de clés de chiffrement et qu'ils partagent leur clé publique. Pour partager leur clé publique, les noeuds utilisent

des Public Key Infrastructures (PKIs). Cependant, afin de détecter un éventuel comportement malicieux de la part de ces derniers, MUTE intègre un mécanisme d'audit [28, 29].

Plusieurs tâches restent néanmoins à réaliser afin de répondre à notre objectif initial, c.-à-d. la conception d'un éditeur collaboratif P2P temps réel, à large échelle, sûr et sans autorités centrales. Une première d'entre elles concerne les droits d'accès aux documents. Actuellement, tout-e utilisateur-riche possédant l'URL d'un document peut découvrir les noeuds travaillant sur ce document, établir une connexion avec eux, participer à la génération d'une nouvelle clé de chiffrement de groupe puis obtenir l'état du document en se synchronisant avec un noeuds. Pour empêcher un tier ou un-e collaborateur-riche expulsé-e précédemment d'accéder au document, il est nécessaire d'intégrer un mécanisme de gestion de droits d'accès adapté aux systèmes P2P à large échelle [106, 107].

Une seconde piste de travail concerne l'amélioration de la couche réseau de MUTE. Comme mentionné précédemment (cf. sous-section 4.5.2, page 142), notre couche réseau actuelle souffre de plusieurs limites. Tout d'abord, les noeuds qui travaillent sur un même document établissent un réseau P2P entièrement maillé. Cette topologie réseau requiert un nombre de connexions par noeud qui dépend linéairement du nombre total de noeuds. Cette topologie s'avère donc coûteuse et inadaptée aux collaborations à large échelle.

Ensuite, le protocole de diffusion des messages que nous employons s'avère lui aussi inadapté aux collaborations à large échelle. En effet, c'est le noeud auteur d'un message qui a pour responsabilité d'en envoyer une copie à chacun des noeuds de la collaboration. Ainsi, ce protocole concentre toute la charge de travail pour la diffusion d'un message sur un seul noeud. Cette tâche s'avère excessive pour un unique noeud quand la collaboration est à large échelle.

Ces limites entravent donc la capacité à utiliser MUTE dans le cadre de collaborations à large échelle. Pour y répondre, nous identifions deux pistes d'amélioration :

- (i) L'utilisation d'un protocole d'échantillonnage aléatoire de pairs adaptatif, tel que Spray [32], qui limite la taille du voisinage d'un noeud à un facteur logarithmique du nombre total de noeuds.
- (ii) L'emploi d'un protocole de diffusion épidémique des messages [108], qui répartit sur l'ensemble des noeuds la charge de travail pour diffuser d'un message à tout le réseau.

Chapitre 5

Conclusions et perspectives

Sommaire

5.1	Résumés des contributions	147
5.1.1	Réflexions sur l'état de l'art des CRDTs	147
5.1.2	Ré-identification sans coordination pour les CRDTs pour le type Séquence	149
5.1.3	Éditeur de texte collaboratif P2P chiffré de bout en bout	151
5.2	Perspectives	153
5.2.1	Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements	153
5.2.2	Étude comparative des différents modèles de synchronisation pour CRDTs	155
5.2.3	Proposition d'un framework pour la conception de CRDTs synchronisés par opérations	156

Dans ce chapitre, nous revenons sur les contributions présentées dans cette thèse. Nous rappelons le contexte dans lequel elles s'inscrivent, récapitulons leurs spécificités et apports, et finalement précisons plusieurs de leurs limites. Puis, nous concluons ce manuscrit en présentant plusieurs pistes de recherche qui nous restent à explorer à l'issue de cette thèse. La première s'inscrit dans la continuité directe de nos travaux sur un mécanisme de ré-identification pour CRDTs pour le type Séquence pour les applications Local-First Software (LFS). Les dernières traduisent quant à elles notre volonté de recentrer nos travaux sur le domaine plus général des CRDTs.

5.1 Résumés des contributions

5.1.1 Réflexions sur l'état de l'art des CRDTs

Les Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs) [19] sont de nouvelles spécifications des types de données. Ils sont conçus pour permettre à un ensemble de noeuds d'un système de répliquer une même donnée et pour leur permettre de la consulter et de la modifier sans aucune coordination préalable. Les copies des noeuds divergent alors temporairement. Les noeuds se synchronisent ensuite pour s'échanger leurs modifications

respectives. Les CRDTs garantissent alors la cohérence forte à terme [19], c.-à-d. que les noeuds obtiennent de nouveau des copies équivalentes de la donnée.

L'absence de coordination entre les noeuds avant modifications implique que des noeuds peuvent modifier la donnée en concurrence. De telles modifications peuvent donner lieu à des conflits, e.g. l'ajout et la suppression en concurrence d'un même élément dans un ensemble. Pour pallier ce problème, les CRDTs incorporent un mécanisme de résolution de conflits automatiques directement au sein de leur spécification.

Il convient de noter qu'il existe plusieurs solutions possibles pour résoudre un conflit. Pour reprendre l'exemple de l'élément ajouté et supprimé en concurrence d'un ensemble, nous pouvons par exemple soit le conserver l'élément, soit le supprimer. Nous parlons alors de sémantique du mécanisme de résolution de conflits automatique.

De la même manière, il existe plusieurs approches possibles pour synchroniser les noeuds, e.g. diffuser chaque modification de manière atomique ou diffuser l'entière de l'état périodiquement. Ainsi, lors de la définition d'un CRDT, il convient de préciser les sémantiques de résolution de conflits qu'il adopte et le modèle de synchronisation qu'il utilise [38].

Depuis leur formalisation, de nombreux travaux ont abouti à la conception de nouveaux CRDTs, soit en spécifiant de nouvelles sémantiques de résolution de conflits pour un type de données [41], soit en spécifiant de nouveaux modèles de synchronisation [46] ou en enrichissant les spécifications des modèles existants [44, 52].

Dans notre présentation des CRDTs (cf. section 2.2, page 13), nous présentons chacun de ces aspects. Cependant, nous nous ne limitons pas à retranscrire l'état de l'art de la littérature. Notamment au sujet du modèle de synchronisation par opérations, nous précisons que le modèle de livraison causal n'est pas nécessaire pour l'ensemble des CRDTs synchronisés par opérations, c.-à-d. que certains peuvent adopter des modèles de livraison moins contraints et donc moins coûteux. Cette précision nous permet de proposer une étude comparative des différents modèles de synchronisation qui est, à notre connaissance, l'une des plus précises de la littérature (cf. section 2.2.2, page 28).

Nous présentons ensuite les différents CRDTs pour le type Séquence de la littérature (cf. section 2.3, page 30). Nous mettons alors en exergue les deux approches proposées pour concevoir le mécanisme de résolution de conflits automatiques pour le type Séquence, c.-à-d. l'approche à pierres tombales et l'approche à identifiants densément ordonnés. De nouveau, cette rétrospective nous permet d'explicitier des angles morts des articles d'origine, notamment vis-à-vis des modèle de livraison des opérations des CRDTs proposés. Puis, nous mettons en lumière les limites des évaluations comparant les deux approches, c.-à-d. le couplage entretenu entre approche du mécanisme de résolution de conflits et choix d'implémentations. Cette limite empêche d'établir la supériorité d'une des approches par rapport à l'autre. Finalement, nous conjecturons que le surcoût de ces deux approches est le même, c.-à-d. le coût nécessaire à la représentation d'un espace dense. Nous précisons dès lors par le biais de notre propre étude comparative comment ce surcoût s'exprime dans chacune des approches, c.-à-d. le compromis entre surcoût en métadonnées, calculs et bande-passante proposé par les deux approches (cf. sous-section 2.3.3, page 50).

Ces réflexions que nous présentons sur l'état des CRDTs définissent plusieurs pistes de recherches. Une première d'entre elles concerne notre étude comparative des modèles de synchronisation. D'après les critères que nous utilisons, une conclusion possible de cette comparaison est que le modèle de synchronisation par différences d'états rend obsolètes les modèles de synchronisation par états et par opérations. En effet, le modèle de synchronisation par différences d'états apparaît comme adapté à l'ensemble des contextes d'utilisation qui étaient jusqu'alors exclusifs à ces derniers, de par les multiples stratégies qu'il permet, e.g. synchronisation par états complets, synchronisation par états irréductibles...

Cette conclusion nous paraît cependant hâtive. Il convient d'étendre notre étude comparative pour prendre en compte des critères de comparaison additionnels pour confirmer cette conjecture, ou l'invalidier et définir plus précisément les spécificités de chacun des modèles de synchronisation. Nous détaillons cette piste de recherche dans la sous-section 5.2.2.

Une seconde piste de recherche possible concerne les deux approches utilisées pour concevoir le mécanisme de résolution de conflits des CRDTs pour le type Séquence. Comme dit précédemment, nous conjecturons que ces deux approches ne sont finalement que deux manières différentes de représenter une même information : la position d'un élément dans un espace dense. La différence entre ces approches résiderait uniquement dans la manière que chaque représentation influe sur les performances du CRDT. Une piste de travail serait donc de confirmer cette conjecture, en proposant une formalisation unique des CRDTs pour le type Séquence.

5.1.2 Ré-identification sans coordination pour les CRDTs pour le type Séquence

Pour privilégier leur disponibilité, latence et tolérance aux pannes, les systèmes distribués peuvent adopter le paradigme de la réplication optimiste [13]. Ce paradigme consiste à relaxer la cohérence de données entre les noeuds du système pour leur permettre de consulter et modifier leur copie locale sans se coordonner. Leur copies peuvent alors temporairement diverger avant de converger de nouveau une fois les modifications de chacun propagées. Cependant, cette approche nécessite l'emploi d'un mécanisme de résolution de conflits pour assurer la convergence même en cas de modifications concurrentes. Pour cela, l'approche des CRDTs [18, 19] propose d'utiliser des types de données dont les modifications commutent nativement.

Depuis la spécification des CRDTs, la littérature a proposé plusieurs de ces mécanismes résolution de conflits automatiques pour le type de données Séquence [70, 71, 72, 68]. Cependant, ces approches souffrent toutes d'un surcoût croissant de manière monotone de leurs métadonnées et calculs. Ce problème a été identifié par la communauté, et celle-ci a proposé pour y répondre des mécanismes permettant soit de réduire la croissance de leur surcoût [87, 88], soit d'effectuer une Garbage Collection (GC) de leur surcoût [71, 20, 21]. Nous avons cependant déterminé que ces mécanismes ne sont pas adaptés aux systèmes P2P à large échelle souffrant de churn et utilisant des CRDTs pour le type Séquence à granularité variable.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons donc souhaité proposer un nouveau mécanisme

adapté à ce type de systèmes. Pour cela, nous avons suivi l’approche proposée par [20, 21] : l’utilisation d’un mécanisme pour ré-assigner de nouveaux identifiants aux éléments stockés dans la séquence. Nous avons donc proposé un nouveau mécanisme appartenant à cette approche pour le CRDT LogootSplit [26].

Notre proposition prend la forme d’un nouveau CRDT pour le type Séquence à granularité variable : `RenamableLogootSplit`. Ce nouveau CRDT associe à `LogootSplit` un nouveau type de modification, `ren`, permettant de produire un nouvel état de la séquence équivalent à son état précédent. Cette nouvelle modification tire profit de la granularité variable de la séquence pour produire un état de taille minimale : elle assigne à tous les éléments des identifiants de position issus d’un même intervalle. Ceci nous permet de minimiser les métadonnées que la séquence doit stocker de manière effective, c.-à-d. le premier et le dernier des identifiants composant l’intervalle.

Afin de gérer les opérations concurrentes aux opérations `ren`, nous définissons pour ces dernières un algorithme de transformation. Pour cela, nous définissons un mécanisme d’époques nous permettant d’identifier la concurrence entre opérations. Nous introduisons une relation d’ordre strict total, `priority`, pour résoudre de manière déterministe le conflit provoqué par deux opérations `ren`, c.-à-d. pour déterminer quelle opération `ren` privilégier. Finalement, nous définissons deux algorithmes, `renameId` et `revertRenameId`, qui permettent de transformer les opérations concurrentes à une opération `ren` pour prendre en compte l’effet de cette dernière. Ainsi, notre algorithme permet de détecter et de transformer les opérations concurrentes aux opérations `ren`, sans nécessiter une coordination synchrone entre les noeuds.

Pour valider notre approche, nous proposons une évaluation expérimentale de cette dernière. Cette évaluation se base sur des traces de sessions d’édition collaborative que nous avons générées par simulations.

Notre évaluation nous permet de valider de manière empirique les résultats attendus. Le premier d’entre eux concerne la convergence des noeuds. En effet, nos simulations nous ont permis de valider que l’ensemble des noeuds obtenaient des états finaux équivalents, même en cas d’opérations `ren` concurrentes.

Notre évaluation nous a aussi permis de valider que le mécanisme de renommage réduit à une taille minimale le surcoût du mécanisme de résolution de conflits incorporé dans le CRDT pour le type Séquence.

L’évaluation expérimentale nous a aussi permis de prendre conscience d’effets additionnels du mécanisme de renommage que nous n’avions pas anticipé. Notamment, elle montre que le surcoût éventuel du mécanisme de renommage, notamment en termes de calculs, est toutefois contrebalancé par l’amélioration précisée précédemment, c.-à-d. la réduction de la taille de la séquence.

Finalement, notons que le mécanisme que nous proposons est partiellement générique : il peut être adapté à d’autres CRDTs pour le type Séquence à granularité variable, e.g. un CRDT pour le type Séquence appartenant à l’approche à pierres tombales. Dans le cadre d’une telle démarche, nous pourrions réutiliser le système d’époques, la relation `priority` et l’algorithme de contrôle qui identifie les transformations à effectuer. Pour compléter une

telle adaptation, nous devrions cependant concevoir de nouveaux algorithmes `renameId` et `revertRenameId` spécifiques et adaptés au CRDT choisi.

Le mécanisme de renommage que nous présentons souffre néanmoins de plusieurs limites. Une d’entre elles concerne ses performances. En effet, notre évaluation expérimentale a mis en lumière le coût important en l’état de la modification *ren* par rapport aux autres modifications en termes de calculs (cf. section 3.4.3, page 101). De plus, chaque opération *ren* comporte une représentation de l’ancien état qui doit être maintenue par les noeuds jusqu’à leur stabilité causale. Le surcoût en métadonnées introduit par un ensemble d’opérations *ren* concurrentes peut donc s’avérer important, voire pénalisant (cf. section 3.4.3, page 98). Pour répondre à ces problèmes, nous identifions trois axes d’amélioration :

- (i) La définition de stratégies de déclenchement du renommage efficaces. Le but de ces stratégies serait de déclencher le mécanisme de renommage de manière fréquente, de façon à garder son temps d’exécution acceptable, mais tout visant à minimiser la probabilité que les noeuds produisent des opérations *ren* concurrentes, de façon à minimiser le surcoût en métadonnées.
- (ii) La définition de relations *priority* efficaces. Nous développons ce point dans nos perspectives, c.-à-d. dans la sous-section 5.2.1.
- (iii) La proposition d’algorithmes de renommage efficaces. Cette amélioration peut prendre la forme de nouveaux algorithmes pour `renameId` et `revertRenameId` offrant une meilleure complexité en temps. Il peut aussi s’agir de la conception d’une nouvelle approche pour renommer l’état et gérer les modifications concurrentes, e.g. un mécanisme de renommage basé sur le journal des opérations (cf. sous-section 3.5.7, page 112).

Une seconde limite de `RenamableLogootSplit` que nous identifions concerne son mécanisme de GC des métadonnées introduites par le mécanisme de renommage. En effet, pour fonctionner, ce dernier repose sur la stabilité causale des opérations *ren*. Pour rappel, la stabilité causale représente le contexte causal commun à l’ensemble des noeuds du système. Pour le déterminer, chaque noeud doit récupérer le contexte causal de l’ensemble des noeuds du système. Ainsi, l’utilisation de la stabilité causale comme pré-requis pour la GC de métadonnées constitue une contrainte forte, voire prohibitive, dans les systèmes P2P à large échelle sujet au churn. En effet, un noeud du système déconnecté de manière définitive suffit pour empêcher la stabilité causale de progresser, son contexte causal étant alors indéterminé du point de vue des autres noeuds. Il s’agit toutefois d’une limite récurrente des mécanismes de GC distribués et asynchrones [71, 44, 109].

5.1.3 Éditeur de texte collaboratif P2P chiffré de bout en bout

Les applications collaboratives permettent à des utilisateur-rices de réaliser collaborativement une tâche. Elles permettent à plusieurs utilisateur-rices de consulter la version actuelle du document, de la modifier et de partager leurs modifications avec les autres. Ceci permet de mettre en place une réflexion de groupe, ce qui améliore la qualité du résultat produit [92, 93].

Cependant, les applications collaboratives sont historiquement des applications centralisées, e.g. Google Docs [94]. Ce type d'architecture induit des défauts d'un point de vue technique, e.g. faible capacité de passage à l'échelle et faible tolérance aux pannes, mais aussi d'un point de vue utilisateur, e.g. perte de la souveraineté des données et absence de garantie de pérennité.

Les travaux de l'équipe Coast s'inscrivent dans une mouvance souhaitant résoudre ces problèmes et qui a conduit à la définition d'un nouveau paradigme d'applications : les applications Local-First Software (LFS) [12]. Le but de ce paradigme est la conception d'applications collaboratives, P2P, pérennes et rendant la souveraineté de leurs données aux utilisateur-rices.

Dans le cadre de cette démarche, l'équipe Coast développe depuis plusieurs années l'application Multi User Text Editor (MUTE), un éditeur de texte web collaboratif P2P temps réel chiffré de bout en bout. Cette application sert à la fois de plateforme de démonstration et de recherche pour les travaux de l'équipe, mais aussi de Proof of Concept (PoC) pour les LFS. Ainsi, MUTE propose au moment où nous écrivons ces lignes un aperçu des travaux de recherche existants concernant :

- (i) Les mécanismes de résolution de résolutions de conflits automatiques pour l'édition collaborative de documents textes [26, 27, 24].
- (ii) Les protocoles distribués d'appartenance au groupe [30].
- (iii) Les mécanismes d'anti-entropie [53].
- (iv) Les protocoles distribués d'authentification d'utilisateur-rices [28, 29].
- (v) Les protocoles distribués d'établissement de clés de chiffrement de groupe [33].
- (vi) Les mécanismes de conscience de groupe.

Dans cette liste, nous avons personnellement contribué à l'implémentation des CRDTs LogootSplit [26] et RenamableLogootSplit [24], et du protocole d'appartenance au groupe SWIM [30].

En son état actuel, MUTE présente cependant plusieurs limites. Tout d'abord, l'environnement web implique un certain nombre de contraintes, notamment au niveau des technologies et protocoles disponibles. Notamment, le protocole Web Real-Time Communication (WebRTC) repose sur l'utilisation de serveurs de signalisation, c.-à-d. de points de rendez-vous des pairs, et de serveurs de relais, c.-à-d. d'intermédiaires pour communiquer entre pairs lorsque les configurations de leur réseaux respectifs interdisent l'établissement d'une connexion directe. Ainsi, les applications P2P web doivent soit déployer et maintenir leur propre infrastructure de serveurs, soit reposer sur une infrastructure existante, e.g. celle proposée par OpenRelay [110].

Dans le cadre de MUTE, nous avons opté pour cette seconde solution. Cependant, ce choix introduit un Single Point Of Failure (SPOF)⁴² dans MUTE : OpenRelay elle-même. Afin de garantir la pérennité de MUTE, nous devrions reposer non pas sur une unique infrastructure de serveurs de signalisation et de relais mais sur une multitude. Malheureusement, l'écosystème actuel brille par la rareté d'infrastructures publiques offrant ces

42. Single Point Of Failure (SPOF) : Point de défaillance unique

services. Nous devons donc encourager et supporter la mise en place de telles infrastructures par une pluralité d'organisations.

Une autre limite de ce système que nous identifions concerne l'utilisabilité des systèmes P2P de manière générale. L'expérience vécue suivante constitue à notre avis un exemple éloquent des limites actuelles de l'application MUTE dans ce domaine. Après avoir rédigé une version initiale d'un document, nous avons envoyé le lien du document à notre collaborateur pour relecture et validation. Lorsque notre collaborateur a souhaité accéder au document, celui-ci s'est retrouvé devant une page blanche : comme nous nous étions déconnecté du système entretemps, plus aucun pair possédant une copie n'était disponible pour se synchroniser.

Notre collaborateur était donc dans l'incapacité de récupérer le document et d'effectuer sa tâche. Afin de pallier ce problème, une solution possible est de faire reposer MUTE sur un réseau P2P global, e.g. le réseau de InterPlanetary File System (IPFS) [111], et d'utiliser les pairs de ce dernier, potentiellement des pairs étrangers à l'application, comme pairs de stockage pour permettre une synchronisation future. Cette solution limiterait ainsi le risque qu'un pair ne puisse récupérer l'état du document faute de pairs disponibles. Pour garantir l'utilisabilité du système P2P, une telle solution devrait donc permettre à un pair de récupérer l'état du document à sa reconnexion, malgré la potentielle évolution du groupe des collaborateur-rices et des pairs de stockage, e.g. l'ajout, l'éviction ou la déconnexion d'un des pairs. Cependant, la solution devrait en parallèle garantir qu'elle n'introduit aucune vulnérabilité, e.g. la possibilité pour les pairs de stockage sélectionnés de reconstruire et consulter le document.

5.2 Perspectives

5.2.1 Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements

Dans la sous-section 3.2.2, nous avons spécifié la relation *priority* (cf. Définition 53, page 80). Pour rappel, cette relation doit établir un ordre strict total sur les époques de notre mécanisme de renommage.

Cette relation nous permet ainsi de résoudre le conflit provoqué par la génération de modifications *ren* concurrentes en les ordonnant. Grâce à cette relation d'ordre, les noeuds peuvent déterminer vers quelle époque de l'ensemble des époques connues progresser. Cette relation permet ainsi aux noeuds de converger à une époque commune à terme.

La cohérence à terme à une époque commune présente plusieurs avantages :

- (i) Réduire la distance entre les époques courantes des noeuds, et ainsi minimiser le surcoût en calculs par opération du mécanisme de renommage. En effet, il n'est pas nécessaire de transformer une opérations livrée avant de l'intégrer si celle-ci provient de la même époque que le noeud courant.

- (ii) Définir un nouveau Plus Petit Ancêtre Commun (PPAC) entre les époques courantes des noeuds. Cela permet aux noeuds d'appliquer le mécanisme de GC pour supprimer les époques devenues obsolètes et leur anciens états associés, pour ainsi minimiser le surcoût en métadonnées du mécanisme de renommage.

Il existe plusieurs manières pour définir la relation *priority* tout en satisfaisant les propriétés indiquées. Dans le cadre de ce manuscrit, nous avons utilisé l'ordre lexicographique sur les chemins des époques dans l'*arbre des époques* pour définir *priority*. Cette approche se démarque par :

- (i) Sa simplicité.
- (ii) Son surcoût limité, c.-à-d. cette approche n'introduit pas de métadonnées supplémentaires à stocker et diffuser, et l'algorithme de comparaison utilisé est simple.
- (iii) Sa propriété arrangeante sur les déplacements des noeuds dans l'arbre des époques. De manière plus précise, cette définition de *priority* impose aux noeuds de se déplacer que vers l'enfant le plus à droite de l'arbre des époques. Ceci empêche les noeuds de faire un aller-retour entre deux époques données. Cette propriété permet de passer outre une contrainte concernant le couple de fonctions `renameId` et `revertRenameId` : leur réciprocity.

Cette définition présente cependant plusieurs limites. La limite que nous identifions est sa décorrélation avec le coût et le bénéfice de progresser vers l'époque cible désignée. En effet, l'époque cible est désignée de manière arbitraire par rapport à sa position dans l'arbre des époques. Il est ainsi possible que progresser vers cette époque détériore l'état de la séquence, c.-à-d. augmente la taille des identifiants et augmente le nombre de blocs, e.g. si l'état courant comporte majoritairement des éléments ayant été insérés en concurrence de la génération de l'époque cible. De plus, la transition de l'ensemble des noeuds depuis leur époque courante respective vers cette nouvelle époque cible induit un coût en calculs, potentiellement important (cf. figure 3.15, page 108).

Pour pallier ce problème, il est nécessaire de proposer une définition de *priority* prenant l'aspect efficacité en compte. L'approche considérée consisterait à inclure dans les opérations *ren* une ou plusieurs métriques qui représente le travail accumulé sur la branche courante de l'arbre des époques, e.g. le nombre d'opérations intégrées, les noeuds actuellement sur cette branche... L'ordre strict total entre les époques serait ainsi construit à partir de la comparaison entre les valeurs de ces métriques de leur opération *ren* respective.

Il conviendra d'adjoindre à cette nouvelle définition de *priority* un nouveau couple de fonctions `renameId` et `revertRenameId` respectant la contrainte de réciprocity de ces fonctions, ou de mettre en place une autre implémentation du mécanisme de renommage ne nécessitant pas cette contrainte, telle qu'une implémentation basée sur le journal des opérations (cf. sous-section 3.5.7, page 112).

Il conviendra aussi d'étudier la possibilité de combiner l'utilisation de plusieurs relations *priority* pour minimiser le surcoût global du mécanisme de renommage, e.g. en fonction de la distance entre deux époques.

Finalement, il sera nécessaire de valider l'approche proposée par une évaluation comparative par rapport à l'approche actuelle. Cette évaluation pourrait consister à mesurer

le coût du système pour observer si l’approche proposée permet de réduire les calculs de manière globale. Plusieurs configurations de paramètres pourraient aussi être utilisées pour déterminer l’impact respectif de chaque paramètre sur les résultats.

5.2.2 Étude comparative des différents modèles de synchronisation pour CRDTs

Comme évoqué dans l’état de l’art (cf. section 2.2.2, page 27), un nouveau modèle de synchronisation pour CRDT fut proposé récemment [45]. Ce dernier propose une synchronisation des noeuds par le biais de différences d’états. Dans notre étude comparative des différents modèles de synchronisation (cf. section 2.2.2, page 28), nous avons justifié que ce modèle de synchronisation est adapté à l’ensemble des contextes d’utilisation qui étaient jusqu’alors exclusifs soit au modèle de synchronisation par états, soit par opérations. Dans cette piste de recherche, nous souhaitons approfondir notre étude comparative pour déterminer si le modèle de synchronisation par différences d’états rend obsolètes les modèles de synchronisation précédents.

Pour rappel, ce nouveau modèle de synchronisation se base sur le modèle de synchronisation par états. Il partage les mêmes pré-requis, à savoir la nécessité d’une fonction `merge` associative, commutative et idempotente. Cette dernière doit permettre la fusion de toute paire d’états possible en calculant leur borne supérieure, c.-à-d. leur Least Upper Bound (LUB) [37].

La spécificité de ce nouveau modèle de synchronisation est de calculer pour chaque modification la différence d’état correspondante. Cette différence correspond à un élément irréductible du sup-demi-treillis du CRDT [52], c.-à-d. un état particulier de ce dernier. Cet élément irréductible peut donc être diffusé et intégré par les autres noeuds, toujours à l’aide de la fonction `merge`.

Ce modèle de synchronisation permet alors d’adopter une variété de stratégies de synchronisation, e.g. diffusion des différences de manière atomique, fusion de plusieurs différences puis diffusion du résultat..., et donc de répondre à une grande variété de cas d’utilisation.

Ainsi, un CRDT synchronisé par différences d’états correspond à un CRDT synchronisé par états dont nous avons identifié les éléments irréductibles. La différence entre ces deux modèles de synchronisation semble reposer seulement sur la possibilité d’utiliser ces éléments irréductibles pour propager les modifications, en place et lieu des états complets. Nous conjecturons donc que le modèle de synchronisation par états est rendu obsolète par celui par différences d’états. Il serait intéressant de confirmer cette supposition.

En revanche, l’utilisation du modèle de synchronisation par opérations conduit généralement à une spécification différente du CRDT, les opérations permettant d’encoder plus librement les modifications. Notamment, l’utilisation d’opérations peut mener à des algorithmes d’intégration des modifications différents que ceux de la fonction `merge`. Il convient de comparer ces algorithmes pour déterminer si le modèle de synchronisation par

opérations peut présenter un intérêt en termes de surcoût.

Au-delà de ce premier aspect, il convient d'explorer d'autres pistes pouvant induire des avantages et inconvénients pour chacun de ces modèles de synchronisation. À l'issue de cette thèse, nous identifions les pistes suivantes :

- (i) La composition de CRDTs, c.-à-d. la capacité de combiner et de mettre en relation plusieurs CRDTs au sein d'un même système, afin d'offrir des fonctionnalités plus complexes. Par exemple, une composition de CRDTs peut se traduire par l'ajout de dépendances entre les modifications des différents CRDTs composés. Le modèle de synchronisation par opérations nous apparaît plus adapté pour cette utilisation, de par le découplage qu'il induit entre les CRDTs et la couche de livraison de messages.
- (ii) L'utilisation de CRDTs au sein de systèmes non-sûrs, c.-à-d. pouvant compter un ou plusieurs adversaires byzantins [112]. Dans de tels systèmes, les adversaires byzantins peuvent par exemple générer des modifications différentes mais qui sont perçues comme identiques par les mécanismes de résolution de conflits. Cette attaque, nommée *équivoque*, peut provoquer la divergence définitive des copies. [109] propose une solution adaptée aux systèmes P2P à large échelle. Celle-ci se base notamment sur l'utilisation de journaux infalsifiables. Il convient alors d'étudier si l'utilisation de ces journaux infalsifiables ne limite pas le potentiel du modèle de synchronisation par différences d'états, e.g. en interdisant la diffusion des modifications par états complets.

Un premier objectif de notre travail serait de proposer des directives sur le modèle de synchronisation à privilégier en fonction du contexte d'utilisation du CRDT.

Ce travail permettrait aussi d'étudier la combinaison des modèles de synchronisation par opérations et par différences d'états au sein d'un même CRDT. Le but serait notamment d'identifier les paramètres conduisant à privilégier un modèle de synchronisation par rapport à l'autre, de façon à permettre aux noeuds de basculer dynamiquement entre les deux.

5.2.3 Proposition d'un framework pour la conception de CRDTs synchronisés par opérations

Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour guider la conception de CRDTs :

- (i) L'utilisation de la théorie des treillis pour la conception de CRDTs synchronisés par états et par différences d'états [19, 52].
- (ii) L'utilisation d'un framework [44] pour la conception de CRDTs purs synchronisés par opérations.

Malgré ses améliorations [113, 57], le framework présenté dans [44] souffre de plusieurs limitations, ce qui entrave la conception de nouveaux CRDTs synchronisés par opérations.

Tout d'abord, il ne permet que la conception de CRDTs purs synchronisés par opérations, c.-à-d. des CRDTs dont les modifications enrichies de leurs arguments et d'une estampille fournie par la couche de livraison des messages sont commutatives. Cette contrainte limite à des types de données simples, e.g. le Compteur ou l'Ensemble, les

CRDTs pouvant être spécifiés et exclut des types de données plus complexes, e.g. la Séquence ou le Graphe.

Une seconde limite de ce framework est qu’il repose sur le modèle de livraison causal des opérations. Ce modèle induit l’ajout de données de causalité précises à chaque opération, sous la forme d’un vecteur de versions [49, 50] ou d’une barrière causale [51]. Nous jugeons ce modèle trop coûteux pour les applications LFS à large échelle.

Nous souhaitons donc proposer un nouveau framework pour la conception de CRDTs synchronisés par opérations répondant à ces limites. Nos objectifs sont multiples.

Notre framework devrait permettre la conception de CRDTs non-purs. Ce framework devrait aussi mettre en lumière la présence et le rôle de deux modèles de livraison dans les CRDTs synchronisés par opérations, ainsi que leur relation :

- (i) Le modèle de livraison minimal requis par le CRDT pour assurer la cohérence forte à terme [19].
- (ii) Le modèle de livraison employé par le système qui utilise le CRDT, qui est une stratégie offrant un compromis entre modèle de cohérence et performances. Ce second modèle de livraison doit être égal ou plus contraint que le modèle de livraison minimal du CRDT.

Notamment, nous souhaitons expliciter que pour un CRDT synchronisé par opérations, le premier modèle de livraison est immuable tandis que le second peut être amené à évoluer en fonction de l’état du système et de ses besoins.

Par exemple, un système peut initialement garantir le modèle de cohérence causale⁴³ à ses utilisateur-rices, et pour cela utiliser le modèle de livraison causal. Cependant, ce modèle de livraison implique un surcoût qui dépend du nombre de noeuds du système. Ce modèle de livraison peut donc devenir trop coûteux si le nombre de noeuds devient important. Ainsi, le système peut décider de temporairement relaxer le modèle de cohérence garanti, e.g. garantir seulement le modèle de cohérence PRAM⁴⁴ [114], dans le but d’utiliser un modèle de livraison moins coûteux, e.g. le modèle de livraison FIFO⁴⁵.

43. Le modèle de cohérence causale est le modèle de cohérence auquel les utilisateur-rices sont généralement habitués : il garantit que l’ensemble des modifications seront intégrées dans leur ordre de génération (cf. Définition 18, page 23).

44. Le modèle de cohérence PRAM garantit seulement que les modifications d’un noeud seront intégrés par les autres noeuds dans leur ordre de génération.

45. Le modèle de livraison FIFO garantit que les messages d’un noeud seront livrés aux autres noeuds dans le même ordre qu’ils ont été envoyés.

Annexe A

Liste des publications

Notre travail sur RenamableLogootSplit (cf. chapitre 3, page 70), c.-à-d. la proposition d'un mécanisme ne nécessitant aucune coordination synchrone pour réduire le surcoût des CRDTs pour le type Séquence, a donné lieu à des publications à différents stades de son avancement :

- (i) Dans [22], nous motivons le problème identifié et présentons l'idée de RenamableLogootSplit, un CRDT pour le type Séquence incorporant un mécanisme de renommage.
- (ii) Dans [23], nous détaillons une première version de RenamableLogootSplit et son mécanisme de renommage. Nous présentons dans cette version le mécanisme de résolution de conflits automatique conçu pour intégrer les opérations *insert* et *remove* concurrentes aux opérations *ren*, et inversement. Nous présentons aussi dans ce travail notre protocole d'évaluation expérimentale ainsi que ses premiers résultats concernant l'impact du mécanisme de renommage sur le surcoût en métadonnées et en calculs du CRDT.
- (iii) Dans [24], nous détaillons RenamableLogootSplit dans son entièreté. Ainsi, nous présentons les mécanismes additionnels pour :
 - (i) Intégrer les opérations *ren* concurrentes.
 - (ii) Supprimer à terme les métadonnées introduites par le mécanisme de renommage.

Nous accompagnons cette proposition d'une évaluation expérimentale plus poussée, prenant en compte des scénarios avec des opérations *ren* concurrentes et mesurant de nouvelles métriques telles que le temps nécessaire pour rejouer le journal des opérations d'une collaboration. Finalement, nous complétons notre travail d'une discussion identifiant plusieurs des limites de RenamableLogootSplit et présentant des pistes possibles pour y répondre.

Nous précisons ci-dessous les informations relatives à chacun de ces articles.

Efficient renaming in CRDTs [22]

Auteur Matthieu Nicolas

Article de position à Middleware 2018 - 19th ACM/IFIP International Middleware Conference (Doctoral Symposium), Dec 2018, Rennes, France.

Résumé *Sequence Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs)* allow to replicate and edit, without any kind of coordination, sequences in distributed systems. To ensure convergence, existing works from the literature add metadata to each element but they do not bound its footprint, which impedes their adoption. Several approaches were proposed to address this issue but they do not fit a fully distributed setting. In this paper, we present our ongoing work on the design and validation of a fully distributed renaming mechanism, setting a bound to the metadata's footprint. Addressing this issue opens new perspectives of adoption of these CRDTs in distributed applications.

Efficient Renaming in Sequence CRDTs [23]

Auteurs Matthieu Nicolas, Gérald Oster, Olivier Perrin

Article d'atelier à PaPoC 2020 - 7th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data, Apr 2020, Heraklion / Virtual, Greece.

Résumé To achieve high availability, large-scale distributed systems have to replicate data and to minimise coordination between nodes. Literature and industry increasingly adopt Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs) to design such systems. CRDTs are data types which behave as traditional ones, e.g. the Set or the Sequence. However, unlike traditional data types, they are designed to natively support concurrent modifications. To this end, they embed in their specification a conflict-resolution mechanism.

To resolve conflicts in a deterministic manner, CRDTs usually attach identifiers to elements stored in the data structure. Identifiers have to comply with several constraints, such as uniqueness or belonging to a dense order. These constraints may hinder the identifiers' size from being bounded. As the system progresses, identifiers tend to grow. This inflation deepens the overhead of the CRDT over time, leading to performance issues.

To address this issue, we propose a new CRDT for Sequence which embeds a renaming mechanism. It enables nodes to reassign shorter identifiers to elements in an uncoordinated manner. Experimental results demonstrate that this mechanism decreases the overhead of the replicated data structure and eventually limits it.

Efficient Renaming in Sequence CRDTs [24]

Auteurs Matthieu Nicolas, Gérald Oster, Olivier Perrin

Article de revue dans IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022, 33 (12), pp.3870-3885.

Résumé To achieve high availability, large-scale distributed systems have to replicate data and to minimise coordination between nodes. For these purposes, literature and industry increasingly adopt Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs) to design such systems. CRDTs are new specifications of existing data types, e.g. Set or Sequence. While CRDTs have the same behaviour as previous specifications in sequential executions, they actually shine in distributed settings as they natively support concurrent updates. To this end, CRDTs embed in their specification conflict resolution mechanisms. These mechanisms usually rely on identifiers attached to elements of the data structure to resolve conflicts in a deterministic and coordination-free manner. Identifiers have to comply with several constraints, such as being unique or belonging to a dense total order. These constraints may hinder the identifier size from being bounded. Identifiers hence tend to grow as the system progresses, which increases the overhead of CRDTs over time and leads to performance issues. To address this issue, we propose a novel Sequence CRDT which embeds a renaming mechanism. It enables nodes to reassign shorter identifiers to elements in an uncoordinated manner. Experimental results demonstrate that this mechanism decreases the overhead of the replicated data structure and eventually minimises it.

Annexe B

Entrelacement d'insertions concurrentes dans Treedoc

Dans cette annexe, nous présentons un contre-exemple à la conjecture présentée dans [82]. Cette conjecture suppose que Treedoc ne souffre pas d'anomalies d'entrelacement, c.-à-d. que des éléments insérés en concurrence ne se retrouvent pas entrelacés après l'intégration de l'ensemble des modifications. La figure B.1 illustre notre contre-exemple.

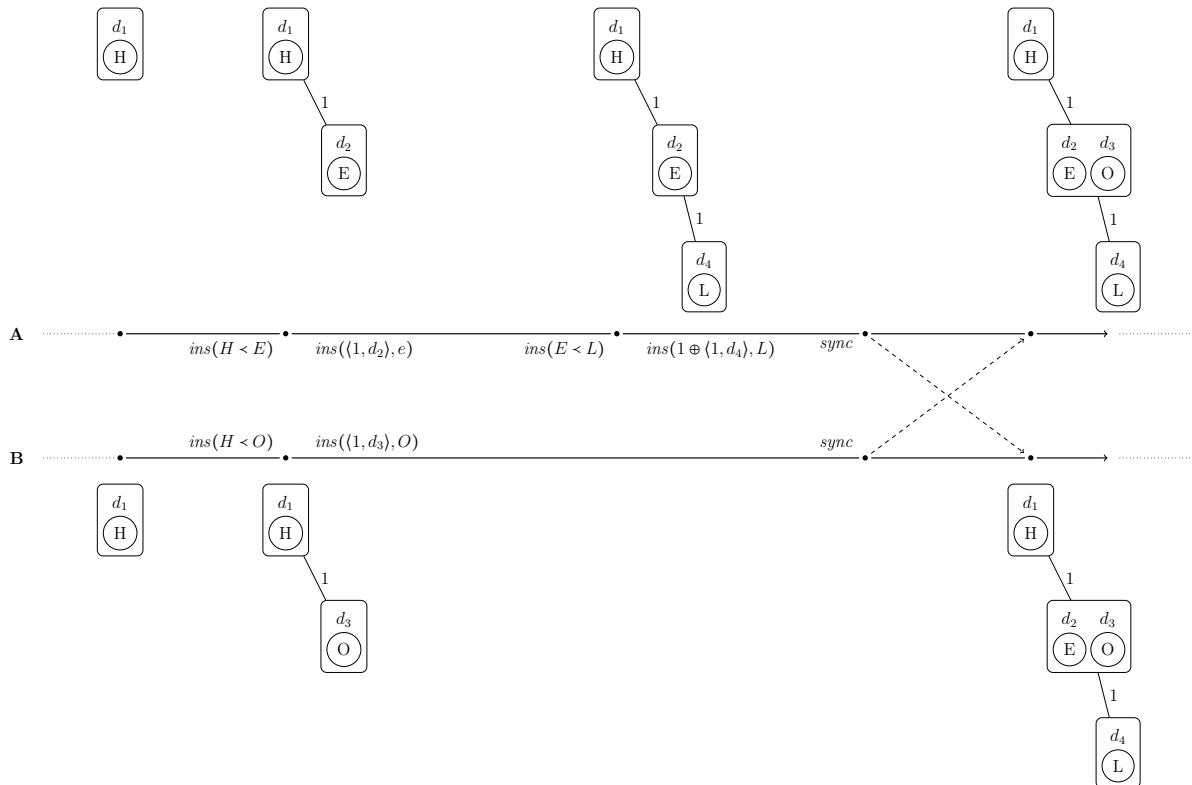


FIGURE B.1 – Entrelacement d'insertions concurrentes dans une séquence Treedoc

Dans cet exemple, deux noeuds A et B partagent et éditent collaborativement une séquence répliquée Treedoc. Initialement, ils possèdent le même état : la séquence contient

l'élément "H".

Le noeud A insère l'élément "E" en fin de séquence, c.-à-d. $insert(H < E)$. Treedoc génère l'opération correspondante, $insert(\langle 1, d_2 \rangle, E)$, et l'intègre à sa copie locale. Puis A insère l'élément "L", toujours en fin de séquence. La modification $insert(E < L)$ est convertie en opération $insert(1 \oplus \langle 1, d_4 \rangle, L)$ et intégrée.

En concurrence, le noeud B insère l'élément "O" en fin de séquence. Cette modification résulte en l'opération $insert(\langle 1, d_3 \rangle, O)$, qui est intégrée.

Les deux noeuds procèdent ensuite à une synchronisation, échangeant leurs opérations respectives. Lorsque A (resp. B) intègre $insert(\langle 1, d_3 \rangle, O)$ (resp. $insert(\langle 1, d_2 \rangle, E)$), il ajoute cet élément avec son désambiguateur dans son noeud de chemin 1, après (resp. avant) l'élément existant (on considère que $d_2 < d_3$).

Ainsi, l'état obtenu après l'intégration de l'ensemble des modifications par les noeuds A et B est "HEOL". L'élément "O", inséré par le noeud B en concurrence de l'insertion des éléments "E" et "L" par le noeud A, se retrouve inséré entre ces derniers.

Nous présentons donc dans cet exemple un entrelacement des insertions concurrentes, contredisant la conjecture de [82].

Annexe C

Algorithmes RENAMEID

Nous présentons dans cette annexe le reste des fonctions utilisées par la fonction `renameId` pour renommer un identifiant d'une époque parente à son époque enfant (cf. Algorithme 2, page 75).

Pour rappel, `renameId` prend comme paramètres initiaux :

- (i) *id*, l'identifiant à renommer.
- (ii) *renamedIds*, une collection ordonnée des identifiants composant l'*ancien état*, c.-à-d. l'état du noeud auteur de l'opération de renommage à sa génération (cf. Définition 49, page 72).
- (iii) *nodeId*, l'identifiant du noeud auteur de l'opération de renommage.
- (iv) *nodeSeq*, le numéro de séquence du noeud auteur de l'opération de renommage à sa génération.

et repose sur des valeurs particulières :

- (i) *firstId*, le premier identifiant de *renamedIds*.
- (ii) *newFirstId*, l'identifiant correspondant à *firstId* dans l'époque enfant.
- (iii) *lastId*, le dernier identifiant de *renamedIds*.
- (iv) *newLastId*, l'identifiant correspondant à *lastId* dans l'époque enfant.

La fonction `renIdLessThanFirstId` (resp. `renIdGreaterThanLastId`) permet de renommer un identifiant *id* tel que $id <_{id} firstId$ (resp. $lastId <_{id} id$).

L'idée principale derrière ces fonctions est la suivante : *il n'est pas nécessaire de modifier les identifiants qui ne sont pas compris dans l'intervalle affecté par le renommage*. L'intervalle affecté par le renommage est le suivant :

$$]min(firstId, predNewFirstId^{46}), max(lastId, succNewLastId^{47})[$$

Dans le cas où l'identifiant à renommer appartient à cet intervalle, ces fonctions utilisent le même procédé que `renIdFromPredId` pour le renommer : elles ajoutent à ce dernier un préfixe adapté pour préserver l'ordre souhaité :

- (i) `renIdLessThanFirstId` utilise *predNewFirstId*, le prédécesseur de *newFirstId*.
- (ii) `renIdGreaterThanLastId` utilise *newLastId*.

46. La borne inférieure des identifiants générés par `renameId` (cf. Algorithme 4, ligne 5).

47. La borne supérieure des identifiants générés par `renameId` (cf. Algorithme 4, ligne 11).

Algorithme 4 Remaining functions to rename an identifier

```
1: function RENIDLESSTHANFIRSTID( $id \in \mathbb{I}$ ,  $newFirstId \in \mathbb{I}$ ) :  $\mathbb{I}$ 
     $\triangleright newFirstId = \langle pos, nodeId, nodeSeq, 0 \rangle$ 
     $\triangleright predNewFirstId = \langle pos, nodeId, nodeSeq, -1 \rangle$ 
2:   if  $id <_{id} newFirstId$  then
3:     return  $id$ 
4:   else
5:     return  $predNewFirstId \oplus id$ 
6:   end if
7: end function
8:
9: function RENIDGREATERTHANLASTID( $id \in \mathbb{I}$ ,  $newLastId \in \mathbb{I}$ ) :  $\mathbb{I}$ 
10:  if  $id <_{id} newLastId$  then
11:    return  $newLastId \oplus id$ 
12:  else
13:    return  $id$ 
14:  end if
15: end function
```

Annexe D

Algorithmes REVERTRENAMEID

Nous présentons dans cette annexe le reste des fonctions utilisées par la fonction `revertRenameId` pour annuler l'effet sur un identifiant d'une opération de renommage appliquée précédemment (cf. Algorithme 3, page 83).

Pour rappel, `revertRenameId` prend comme paramètres initiaux :

- (i) *id*, l'identifiant à renommer.
- (ii) *renamedIds*, une collection ordonnée des identifiants composant l'*ancien état*, c.-à-d. l'état du noeud auteur de l'opération de renommage à sa génération (cf. Définition 49, page 72).
- (iii) *nodeId*, l'identifiant du noeud auteur de l'opération de renommage.
- (iv) *nodeSeq*, le numéro de séquence du noeud auteur de l'opération de renommage à sa génération.

et repose sur des valeurs particulières :

- (i) *firstId*, le premier identifiant de *renamedIds*.
- (ii) *newFirstId*, l'identifiant correspondant à *firstId* dans l'époque enfant.
- (iii) *lastId*, le dernier identifiant de *renamedIds*.
- (iv) *newLastId*, l'identifiant correspondant à *lastId* dans l'époque enfant.
- (v) \perp_t (resp. \top_t), le tuple LogootSplit minimal (resp. maximal). Son utilisation est réservé au mécanisme de renommage.

La fonction `revRenIdLessThanNewFirstId` (resp. `revRenIdGreaterThanNewLastId`) permet de renommer un identifiant *id* tel que $id <_{id} newFirstId$ (resp. $newLastId < id$).

Comme les fonctions présentées dans l'Annexe C, ces fonctions ne modifient pas les identifiants n'étant pas compris dans l'intervalle affecté par le renommage (lignes 10, 23 et 26).

Pour traiter les cas restants, ces fonctions utilisent des stratégies différentes en fonction du motif formant *id*. Si `revRenIdLessThanNewFirstId` (resp. `revRenIdGreaterThanNewLastId`) infère de la valeur de l'identifiant que ce dernier a potentiellement été obtenu en renommant un identifiant généré en concurrence de l'opération de renommage à l'aide de `renIdLessThanFirstId` (resp. `renGreaterThanLastId`), elle retire simplement le préfixe ajouté (ligne 4 (resp. ligne 21)).

Algorithme 5 Remaining functions to revert an identifier renaming

```

1: function REVRENIDLESSTHANNEWFIRSTID( $id \in \mathbb{I}$ ,  $firstId \in \mathbb{I}$ ,  $newFirstId \in \mathbb{I}$ ) :  $\mathbb{I}$ 
     $\triangleright$   $newFirstId = \langle pos, nodeId, nodeSeq, 0 \rangle$ 
     $\triangleright$   $predNewFirstId = \langle pos, nodeId, nodeSeq, -1 \rangle$ 
2:   if  $id = predNewId \oplus tail$  then
3:     if  $tail <_{id} firstId$  then
4:       return  $tail$ 
5:     else
     $\triangleright$   $id$  has been inserted causally after the rename op
     $\triangleright$   $firstId = prefix \oplus \langle pos_n, nodeId_n, nodeSeq_n, offset_n \rangle$ 
6:        $predFirstId \leftarrow prefix \oplus \langle pos_n, nodeId_n, nodeSeq_n, offset_n - 1 \rangle$ 
7:       return  $predFirstId \oplus \tau_t \oplus tail$   $\triangleright$  with  $\tau_t$  the maximal tuple
8:     end if
9:   else
10:    return  $id$ 
11:  end if
12: end function
13:
14: function REVRENIDGREATERTHANNEWLASTID( $id \in \mathbb{I}$ ,  $lastId \in \mathbb{I}$ ) :  $\mathbb{I}$ 
15:   if  $id <_{id} lastId$  then
     $\triangleright$   $id$  has been inserted causally after the rename op
     $\triangleright$  with  $\perp_t$  the minimal tuple
16:     return  $lastId \oplus \perp_t \oplus id$ 
17:   else if  $id = newLastId \oplus tail$  then
18:     if  $tail <_{id} lastId$  then
     $\triangleright$   $id$  has been inserted causally after the rename op
     $\triangleright$  with  $\perp_t$  the minimal tuple
19:       return  $lastId \oplus \perp_t \oplus tail$ 
20:     else if  $tail <_{id} newLastId$  then
21:       return  $tail$ 
22:     else
     $\triangleright$   $id$  has been inserted causally after the rename op
23:       return  $id$ 
24:     end if
25:   else
26:     return  $id$ 
27:   end if
28: end function

```

Si à la place la valeur de l'identifiant indique qu'il a été inséré après l'opération de renommage⁴⁸, `revRenIdLessThanNewFirstId` (resp. `revRenIdGreaterThanNewLastId`) génère l'identifiant correspondant à l'époque parent qui préserve l'ordre souhaité en utilisant `predFirstId` et le tuple exclusif au mécanisme de renommage τ_t (resp. `lastId` et le tuple exclusif au mécanisme de renommage \perp_t) (ligne 7 (resp. ligne 16 et 19)).

48. D'après la relation *happens-before*.

Bibliographie

- [1] Ina FRIED. *Scoop : Google's G Suite cracks 2 billion users*. Last Accessed : 2022-10-19. URL : <https://www.axios.com/2020/03/12/google-g-suite-total-users>.
- [2] WIKIMEDIA. *Wikimedia Statistics - English Wikipedia*. Last Accessed : 2022-10-06. URL : <https://stats.wikimedia.org/#/en.wikipedia.org>.
- [3] STATISTA. *Biggest social media platforms 2022*. Last Accessed : 2022-10-06. URL : <https://www.statista.com/statistics/272014/global-social-networks-ranked-by-number-of-users/>.
- [4] GITHUB. *Search · type :user*. Last Accessed : 2022-10-19. URL : <https://github.com/search?q=type:user&type=Users>.
- [5] Taylor LORENZ. *Internet communities are battling over pixels*. Last Accessed : 2022-10-18. URL : <https://www.washingtonpost.com/technology/2022/04/04/reddit-place-internet-communities/>.
- [6] Matthew O'MARA. *Twitch Plays Pokémon a wild experiment in crowd sourced gameplay*. Last Accessed : 2022-10-18. URL : <https://financialpost.com/technology/gaming/twitch-plays-pokemon-a-wild-experiment-in-crowd-sourced-gameplay>.
- [7] Paul BARAN. « On distributed communications networks ». In : *IEEE transactions on Communications Systems* 12.1 (1964), p. 1-9.
- [8] WIKIPEDIA. *Censorship of Wikipedia*. Last Accessed : 2022-10-18. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Censorship_of_Wikipedia.
- [9] Cody ODGEN. *Google Graveyard*. Last Accessed : 2022-10-11. URL : <https://killedbygoogle.com/>.
- [10] Glen GREENWALD et Ewen MACASKILL. *NSA Prism program taps in to user data of Apple, Google and others*. Last Accessed : 2022-10-07. URL : <https://www.theguardian.com/world/2013/jun/06/us-tech-giants-nsa-data>.
- [11] Barton GELLMAN et Laura POITRAS. *U.S., British intelligence mining data from nine U.S. Internet companies in broad secret program*. Last Accessed : 2022-10-07. URL : https://www.washingtonpost.com/investigations/us-intelligence-mining-data-from-nine-us-internet-companies-in-broad-secret-program/2013/06/06/3a0c0da8-cebf-11e2-8845-d970ccb04497_story.html.

- [12] Martin KLEPPMANN, Adam WIGGINS, Peter van HARDENBERG et Mark MCGRANAGHAN. « Local-First Software : You Own Your Data, in Spite of the Cloud ». In : *Proceedings of the 2019 ACM SIGPLAN International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming and Software*. Onward! 2019. Athens, Greece : Association for Computing Machinery, 2019, p. 154-178. ISBN : 9781450369954. DOI : 10.1145/3359591.3359737. URL : <https://doi.org/10.1145/3359591.3359737>.
- [13] Yasushi SAITO et Marc SHAPIRO. « Optimistic Replication ». In : *ACM Comput. Surv.* 37.1 (mars 2005), p. 42-81. ISSN : 0360-0300. DOI : 10.1145/1057977.1057980. URL : <https://doi.org/10.1145/1057977.1057980>.
- [14] Douglas B TERRY, Marvin M THEIMER, Karin PETERSEN, Alan J DEMERS, Mike J SPREITZER et Carl H HAUSER. « Managing Update Conflicts in Bayou, a Weakly Connected Replicated Storage System ». In : *SIGOPS Oper. Syst. Rev.* 29.5 (déc. 1995), p. 172-182. ISSN : 0163-5980. DOI : 10.1145/224057.224070. URL : <https://doi.org/10.1145/224057.224070>.
- [15] Daniel STUTZBACH et Reza REJAIE. « Understanding Churn in Peer-to-Peer Networks ». In : *Proceedings of the 6th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*. IMC '06. Rio de Janeiro, Brazil : Association for Computing Machinery, 2006, p. 189-202. ISBN : 1595935614. DOI : 10.1145/1177080.1177105. URL : <https://doi.org/10.1145/1177080.1177105>.
- [16] Leslie LAMPORT. « The part-time parliament ». In : *Concurrency : the Works of Leslie Lamport*. 2019, p. 277-317.
- [17] 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.
- [18] Marc SHAPIRO et Nuno PREGUIÇA. *Designing a commutative replicated data type*. Research Report RR-6320. INRIA, 2007. URL : <https://hal.inria.fr/inria-00177693>.
- [19] Marc SHAPIRO, Nuno M. PREGUIÇA, Carlos BAQUERO et Marek ZAWIRSKI. « Conflict-Free Replicated Data Types ». In : *Proceedings of the 13th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems*. SSS 2011. 2011, p. 386-400. DOI : 10.1007/978-3-642-24550-3_29.
- [20] Mihai LETIA, Nuno PREGUIÇA et Marc SHAPIRO. « Consistency without concurrency control in large, dynamic systems ». In : *LADIS 2009 - 3rd ACM SIGOPS International Workshop on Large Scale Distributed Systems and Middleware*. T. 44. Operating Systems Review 2. Big Sky, MT, United States : Assoc. for Computing Machinery, oct. 2009, p. 29-34. DOI : 10.1145/1773912.1773921. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01248270>.
- [21] Marek ZAWIRSKI, Marc SHAPIRO et Nuno PREGUIÇA. « Asynchronous rebalancing of a replicated tree ». In : *Conférence Française en Systèmes d'Exploitation (CFSE)*. Saint-Malo, France, mai 2011, p. 12. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01248197>.

-
- [22] Matthieu NICOLAS. « Efficient renaming in CRDTs ». In : *Middleware 2018 - 19th ACM/IFIP International Middleware Conference (Doctoral Symposium)*. Rennes, France, déc. 2018. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01932552>.
- [23] Matthieu NICOLAS, Gérald OSTER et Olivier PERRIN. « Efficient Renaming in Sequence CRDTs ». In : *7th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data (PaPoC'20)*. Heraklion, Greece, avr. 2020. URL : <https://hal.inria.fr/hal-02526724>.
- [24] Matthieu NICOLAS, Gerald OSTER et Olivier PERRIN. « Efficient Renaming in Sequence CRDTs ». In : *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 33.12 (déc. 2022), p. 3870-3885. DOI : 10.1109/TPDS.2022.3172570. URL : <https://hal.inria.fr/hal-03772633>.
- [25] Matthieu NICOLAS, Victorien ELVINGER, Gérald OSTER, Claudia-Lavinia IGNAT et François CHAROY. « MUTE : A Peer-to-Peer Web-based Real-time Collaborative Editor ». In : *ECSCW 2017 - 15th European Conference on Computer-Supported Cooperative Work*. T. 1. Proceedings of 15th European Conference on Computer-Supported Cooperative Work - Panels, Posters and Demos 3. Sheffield, United Kingdom : EUSSET, août 2017, p. 1-4. DOI : 10.18420/ecscw2017_p5. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01655438>.
- [26] Luc ANDRÉ, Stéphane MARTIN, Gérald OSTER et Claudia-Lavinia IGNAT. « Supporting Adaptable Granularity of Changes for Massive-Scale Collaborative Editing ». In : *International Conference on Collaborative Computing : Networking, Applications and Worksharing - CollaborateCom 2013*. Austin, TX, USA : IEEE Computer Society, oct. 2013, p. 50-59. DOI : 10.4108/icst.collaboratecom.2013.254123.
- [27] Victorien ELVINGER. « Réplication sécurisée dans les infrastructures pair-à-pair de collaboration ». Theses. Université de Lorraine, juin 2021. URL : <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03284806>.
- [28] Hoang-Long NGUYEN, Claudia-Lavinia IGNAT et Olivier PERRIN. « Trusternity : Auditing Transparent Log Server with Blockchain ». In : *Companion of the The Web Conference 2018*. Lyon, France, avr. 2018. DOI : 10.1145/3184558.3186938. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01883589>.
- [29] Hoang-Long NGUYEN, Jean-Philippe EISENBARTH, Claudia-Lavinia IGNAT et Olivier PERRIN. « Blockchain-Based Auditing of Transparent Log Servers ». In : *32th IFIP Annual Conference on Data and Applications Security and Privacy (DB-Sec)*. Sous la dir. de Florian KERSCHBAUM et Stefano PARABOSCHI. T. LNCS-10980. Data and Applications Security and Privacy XXXII. Part 1 : Administration. Bergamo, Italy : Springer International Publishing, juill. 2018, p. 21-37. DOI : 10.1007/978-3-319-95729-6_2. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01917636>.

- [30] Abhinandan DAS, Indranil GUPTA et Ashish MOTIVALA. « SWIM : scalable weakly-consistent infection-style process group membership protocol ». In : *Proceedings International Conference on Dependable Systems and Networks*. 2002, p. 303-312. DOI : 10.1109/DSN.2002.1028914.
- [31] Armon DADGAR, James PHILLIPS et Jon CURREY. « Lifeguard : Local health awareness for more accurate failure detection ». In : *2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W)*. IEEE. 2018, p. 22-25.
- [32] Brice NÉDELEC, Julian TANKE, Davide FREY, Pascal MOLLI et Achour MOSTÉFAOUI. « An adaptive peer-sampling protocol for building networks of browsers ». In : *World Wide Web* 21.3 (2018), p. 629-661.
- [33] Mike BURMESTER et Yvo DESMEDT. « A secure and efficient conference key distribution system ». In : *Advances in Cryptology — EUROCRYPT'94*. Sous la dir. d'Alfredo DE SANTIS. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1995, p. 275-286. ISBN : 978-3-540-44717-7.
- [34] Rachid GUERRAOUI, Matej PAVLOVIC et Dragos-Adrian SEREDINSCHI. « Trade-offs in replicated systems ». In : *IEEE Data Engineering Bulletin* 39.ARTICLE (2016), p. 14-26.
- [35] Leslie LAMPORT. « Time, Clocks, and the Ordering of Events in a Distributed System ». In : *Commun. ACM* 21.7 (juill. 1978), p. 558-565. ISSN : 0001-0782. DOI : 10.1145/359545.359563. URL : <https://doi.org/10.1145/359545.359563>.
- [36] Sebastian BURCKHARDT, Alexey GOTSMAN, Hongseok YANG et Marek ZAWIRSKI. « Replicated Data Types : Specification, Verification, Optimality ». In : *SIGPLAN Not.* 49.1 (jan. 2014), p. 271-284. ISSN : 0362-1340. DOI : 10.1145/2578855.2535848. URL : <https://doi.org/10.1145/2578855.2535848>.
- [37] Nuno M. PREGUIÇA, Carlos BAQUERO et Marc SHAPIRO. « Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs) ». In : *CoRR* abs/1805.06358 (2018). arXiv : 1805.06358. URL : <http://arxiv.org/abs/1805.06358>.
- [38] Nuno M. PREGUIÇA. « Conflict-free Replicated Data Types : An Overview ». In : *CoRR* abs/1806.10254 (2018). arXiv : 1806.10254. URL : <http://arxiv.org/abs/1806.10254>.
- [39] B. A. DAVEY et H. A. PRIESTLEY. *Introduction to Lattices and Order*. 2^e éd. Cambridge University Press, 2002. DOI : 10.1017/CB09780511809088.
- [40] Paul R JOHNSON et Robert THOMAS. *RFC0677 : Maintenance of duplicate databases*. RFC Editor, 1975.
- [41] Weihai YU et Sigbjørn ROSTAD. « A Low-Cost Set CRDT Based on Causal Lengths ». In : *Proceedings of the 7th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2020. ISBN : 9781450375245. URL : <https://doi.org/10.1145/3380787.3393678>.

-
- [42] Marc SHAPIRO, Nuno PREGUIÇA, Carlos BAQUERO et Marek ZAWIRSKI. *A comprehensive study of Convergent and Commutative Replicated Data Types*. Research Report RR-7506. Inria – Centre Paris-Rocquencourt; INRIA, jan. 2011, p. 50. URL : <https://hal.inria.fr/inria-00555588>.
- [43] Carlos BAQUERO, Paulo Sérgio ALMEIDA et Ali SHOKER. « Making Operation-Based CRDTs Operation-Based ». In : *Proceedings of the First Workshop on Principles and Practice of Eventual Consistency*. PaPEC '14. Amsterdam, The Netherlands : Association for Computing Machinery, 2014. ISBN : 9781450327169. DOI : 10.1145/2596631.2596632. URL : <https://doi.org/10.1145/2596631.2596632>.
- [44] Carlos BAQUERO, Paulo Sergio ALMEIDA et Ali SHOKER. *Pure Operation-Based Replicated Data Types*. 2017. arXiv : 1710.04469 [cs.DC].
- [45] Paulo Sérgio ALMEIDA, Ali SHOKER et Carlos BAQUERO. « Efficient State-Based CRDTs by Delta-Mutation ». In : *Networked Systems*. Sous la dir. d'Ahmed BOUAJJANI et Hugues FAUCONNIER. Cham : Springer International Publishing, 2015, p. 62-76. ISBN : 978-3-319-26850-7.
- [46] Paulo Sérgio ALMEIDA, Ali SHOKER et Carlos BAQUERO. « Delta state replicated data types ». In : *Journal of Parallel and Distributed Computing* 111 (jan. 2018), p. 162-173. ISSN : 0743-7315. DOI : 10.1016/j.jpdc.2017.08.003. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpdc.2017.08.003>.
- [47] Mustaque AHAMAD, Gil NEIGER, James E. BURNS, Prince KOHLI et Phillip W. HUTTO. « Causal memory : definitions, implementation, and programming ». In : *Distributed Computing* 9 (1995), p. 37-49. URL : <https://doi.org/10.1007/BF01784241>.
- [48] Prince MAHAJAN, Lorenzo ALVISI, Mike DAHLIN et al. « Consistency, availability, and convergence ». In : *University of Texas at Austin Tech Report* 11 (2011), p. 158.
- [49] Friedemann MATTERN et al. *Virtual time and global states of distributed systems*. Univ., Department of Computer Science, 1988.
- [50] Colin FIDGE. « Logical Time in Distributed Computing Systems ». In : *Computer* 24.8 (août 1991), p. 28-33. ISSN : 0018-9162. DOI : 10.1109/2.84874. URL : <https://doi.org/10.1109/2.84874>.
- [51] Ravi PRAKASH, Michel RAYNAL et Mukesh SINGHAL. « An Adaptive Causal Ordering Algorithm Suited to Mobile Computing Environments ». In : *Journal of Parallel and Distributed Computing* 41.2 (1997), p. 190-204. ISSN : 0743-7315. DOI : <https://doi.org/10.1006/jpdc.1996.1300>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743731596913003>.
- [52] Vitor ENES, Paulo Sérgio ALMEIDA, Carlos BAQUERO et João LEITÃO. « Efficient Synchronization of State-Based CRDTs ». In : *2019 IEEE 35th International Conference on Data Engineering (ICDE)*. 2019, p. 148-159. DOI : 10.1109/ICDE.2019.00022.

- [53] D. S. PARKER, G. J. POPEK, G. RUDISIN, A. STOUGHTON, B. J. WALKER, E. WALTON, J. M. CHOW, D. EDWARDS, S. KISER et C. KLINE. « Detection of Mutual Inconsistency in Distributed Systems ». In : *IEEE Trans. Softw. Eng.* 9.3 (mai 1983), p. 240-247. ISSN : 0098-5589. DOI : 10.1109/TSE.1983.236733. URL : <https://doi.org/10.1109/TSE.1983.236733>.
- [54] Giuseppe DECANDIA, Deniz HASTORUN, Madan JAMPANI, Gunavardhan KAKULAPATI, Avinash LAKSHMAN, Alex PILCHIN, Swaminathan SIVASUBRAMANIAN, Peter VOSSHALL et Werner VOGELS. « Dynamo : Amazon’s highly available key-value store ». In : *ACM SIGOPS operating systems review* 41.6 (2007), p. 205-220.
- [55] Nico KRUBER, Maik LANGE et Florian SCHINTKE. « Approximate Hash-Based Set Reconciliation for Distributed Replica Repair ». In : *2015 IEEE 34th Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS)*. 2015, p. 166-175. DOI : 10.1109/SRDS.2015.30.
- [56] Ricardo Jorge Tomé GONÇALVES, Paulo Sérgio ALMEIDA, Carlos BAQUERO et Vitor FONTE. « DottedDB : Anti-Entropy without Merkle Trees, Deletes without Tombstones ». In : *2017 IEEE 36th Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS)*. 2017, p. 194-203. DOI : 10.1109/SRDS.2017.28.
- [57] Jim BAUWENS et Elisa Gonzalez BOIX. « Improving the Reactivity of Pure Operation-Based CRDTs ». In : *Proceedings of the 8th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*. PaPoC ’21. Online, United Kingdom : Association for Computing Machinery, 2021. ISBN : 9781450383387. DOI : 10.1145/3447865.3457968. URL : <https://doi.org/10.1145/3447865.3457968>.
- [58] Carlos BAQUERO, Paulo Sérgio ALMEIDA et Ali SHOKER. « Making Operation-Based CRDTs Operation-Based ». In : *Distributed Applications and Interoperable Systems*. Sous la dir. de Kostas MAGOUTIS et Peter PIETZUCH. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 126-140.
- [59] Michel E. ADIBA et Bruce G. LINDSAY. « Database Snapshots ». In : *Proceedings of the Sixth International Conference on Very Large Data Bases - Volume 6*. VLDB ’80. Montreal, Quebec, Canada : VLDB Endowment, 1980, p. 86-91.
- [60] Clarence A. ELLIS et Simon J. GIBBS. « Concurrency Control in Groupware Systems ». In : *Proceedings of the 1989 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. SIGMOD ’89. Portland, Oregon, USA : Association for Computing Machinery, 1989, p. 399-407. ISBN : 0897913175. DOI : 10.1145/67544.66963. URL : <https://doi.org/10.1145/67544.66963>.
- [61] Chengzheng SUN et Clarence ELLIS. « Operational transformation in real-time group editors : issues, algorithms, and achievements ». In : *Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work*. 1998, p. 59-68.
- [62] Matthias RESSEL, Doris NITSCHERUHLAND et Rul GUNZENHÄUSER. « An integrating, transformation-oriented approach to concurrency control and undo in group editors ». In : *Proceedings of the 1996 ACM conference on Computer supported cooperative work*. 1996, p. 288-297.

-
- [63] Chengzheng SUN, Yun YANG, Yanchun ZHANG et David CHEN. « A consistency model and supporting schemes for real-time cooperative editing systems ». In : *Australian Computer Science Communications* 18 (1996), p. 582-591.
- [64] David SUN et Chengzheng SUN. « Context-Based Operational Transformation in Distributed Collaborative Editing Systems ». In : *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on* 20 (nov. 2009), p. 1454-1470. DOI : 10.1109/TPDS.2008.240.
- [65] Chengzheng SUN, Xiaohua JIA, Yanchun ZHANG, Yun YANG et David CHEN. « Achieving convergence, causality preservation, and intention preservation in real-time cooperative editing systems ». In : *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)* 5.1 (1998), p. 63-108.
- [66] Gérald OSTER, Pascal MOLLI, Pascal URSO et Abdessamad IMINE. « Tombstone Transformation Functions for Ensuring Consistency in Collaborative Editing Systems ». In : *2006 International Conference on Collaborative Computing : Networking, Applications and Worksharing*. 2006, p. 1-10. DOI : 10.1109/COLCOM.2006.361867.
- [67] Chengzheng SUN, Xiaohua JIA, Yanchun ZHANG, Yun YANG et David CHEN. « Achieving Convergence, Causality Preservation, and Intention Preservation in Real-Time Cooperative Editing Systems ». In : *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 5.1 (mars 1998), p. 63-108. ISSN : 1073-0516. DOI : 10.1145/274444.274447. URL : <https://doi.org/10.1145/274444.274447>.
- [68] Stéphane WEISS, Pascal URSO et Pascal MOLLI. « Logoot : A Scalable Optimistic Replication Algorithm for Collaborative Editing on P2P Networks ». In : *Proceedings of the 29th International Conference on Distributed Computing Systems - ICDCS 2009*. Montreal, QC, Canada : IEEE Computer Society, juin 2009, p. 404-412. DOI : 10.1109/ICDCS.2009.75. URL : <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICDCS.2009.75>.
- [69] Bernadette CHARRON-BOST. « Concerning the size of logical clocks in distributed systems ». In : *Information Processing Letters* 39.1 (1991), p. 11-16.
- [70] Gérald OSTER, Pascal URSO, Pascal MOLLI et Abdessamad IMINE. « Data Consistency for P2P Collaborative Editing ». In : *ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work - CSCW 2006*. Proceedings of the 2006 20th anniversary conference on Computer supported cooperative work. Banff, Alberta, Canada : ACM Press, nov. 2006, p. 259-268. URL : <https://hal.inria.fr/inria-00108523>.
- [71] Hyun-Gul ROH, Myeongjae JEON, Jin-Soo KIM et Joonwon LEE. « Replicated abstract data types : Building blocks for collaborative applications ». In : *Journal of Parallel and Distributed Computing* 71.3 (2011), p. 354-368. ISSN : 0743-7315. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2010.12.006>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743731510002716>.

- [72] Nuno PREGUICA, Joan Manuel MARQUES, Marc SHAPIRO et Mihai LETIA. « A Commutative Replicated Data Type for Cooperative Editing ». In : *2009 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*. Juin 2009, p. 395-403. DOI : 10.1109/ICDCS.2009.20.
- [73] Charbel RAHHAL, Stéphane WEISS, Hala SKAF-MOLLI, Pascal URSO et Pascal MOLLI. *Undo in Peer-to-peer Semantic Wikis*. Research Report RR-6870. INRIA, 2009, p. 18. URL : <https://hal.inria.fr/inria-00366317>.
- [74] Mehdi AHMED-NACER, Claudia-Lavinia IGNAT, Gérald OSTER, Hyun-Gul ROH et Pascal URSO. « Evaluating CRDTs for Real-time Document Editing ». In : *11th ACM Symposium on Document Engineering*. Sous la dir. d'ACM. Mountain View, California, United States, sept. 2011, p. 103-112. DOI : 10.1145/2034691.2034717. URL : <https://hal.inria.fr/inria-00629503>.
- [75] Stéphane WEISS, Pascal URSO et Pascal MOLLI. « Wooki : a P2P Wiki-based Collaborative Writing Tool ». In : t. 4831. Déc. 2007. ISBN : 978-3-540-76992-7. DOI : 10.1007/978-3-540-76993-4_42.
- [76] Ben SHNEIDERMAN. « Response Time and Display Rate in Human Performance with Computers ». In : *ACM Comput. Surv.* 16.3 (sept. 1984), p. 265-285. ISSN : 0360-0300. DOI : 10.1145/2514.2517. URL : <https://doi.org/10.1145/2514.2517>.
- [77] Caroline JAY, Mashhuda GLENCROSS et Roger HUBBOLD. « Modeling the Effects of Delayed Haptic and Visual Feedback in a Collaborative Virtual Environment ». In : *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 14.2 (août 2007), 8-es. ISSN : 1073-0516. DOI : 10.1145/1275511.1275514. URL : <https://doi.org/10.1145/1275511.1275514>.
- [78] Hagit ATTIYA, Sebastian BURCKHARDT, Alexey GOTSMAN, Adam MORRISON, Hongseok YANG et Marek ZAWIRSKI. « Specification and Complexity of Collaborative Text Editing ». In : *Proceedings of the 2016 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*. PODC '16. Chicago, Illinois, USA : Association for Computing Machinery, 2016, p. 259-268. ISBN : 9781450339643. DOI : 10.1145/2933057.2933090. URL : <https://doi.org/10.1145/2933057.2933090>.
- [79] Hagit ATTIYA, Sebastian BURCKHARDT, Alexey GOTSMAN, Adam MORRISON, Hongseok YANG et Marek ZAWIRSKI. « Specification and space complexity of collaborative text editing ». In : *Theoretical Computer Science* 855 (2021), p. 141-160. ISSN : 0304-3975. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2020.11.046>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304397520306952>.
- [80] Loïck BRIOT, Pascal URSO et Marc SHAPIRO. « High Responsiveness for Group Editing CRDTs ». In : *ACM International Conference on Supporting Group Work*. Sanibel Island, FL, United States, nov. 2016. DOI : 10.1145/2957276.2957300. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01343941>.

- [81] Weihai YU. « A String-Wise CRDT for Group Editing ». In : *Proceedings of the 17th ACM International Conference on Supporting Group Work*. GROUP '12. Sanibel Island, Florida, USA : Association for Computing Machinery, 2012, p. 141-144. ISBN : 9781450314862. DOI : 10.1145/2389176.2389198. URL : <https://doi.org/10.1145/2389176.2389198>.
- [82] Martin KLEPPMANN, Victor B. F. GOMES, Dominic P. MULLIGAN et Alastair R. BERESFORD. « Interleaving Anomalies in Collaborative Text Editors ». In : *Proceedings of the 6th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*. PaPoC '19. Dresden, Germany : Association for Computing Machinery, 2019. ISBN : 9781450362764. DOI : 10.1145/3301419.3323972. URL : <https://doi.org/10.1145/3301419.3323972>.
- [83] Matthew WEIDNER. *There Are No Doubly Non-Interleaving List CRDTs*. Last Accessed : 2022-10-07. URL : https://mattweidner.com/assets/pdf/List_CRDT_Non_Interleaving.pdf.
- [84] Stéphane WEISS, Pascal URSO et Pascal MOLLI. « Logoot-Undo : Distributed Collaborative Editing System on P2P Networks ». In : *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 21.8 (août 2010), p. 1162-1174. DOI : 10.1109/TPDS.2009.173. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00450416>.
- [85] Claudia-Lavinia IGNAT, Gérald OSTER, Meagan NEWMAN, Valerie SHALIN et François CHAROY. « Studying the Effect of Delay on Group Performance in Collaborative Editing ». In : *Proceedings of 11th International Conference on Cooperative Design, Visualization, and Engineering, CDVE 2014, Springer 2014 Lecture Notes in Computer Science*. Proceedings of 11th International Conference on Cooperative Design, Visualization, and Engineering, CDVE 2014. Seattle, WA, United States, sept. 2014, p. 191-198. DOI : 10.1007/978-3-319-10831-5_29. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01088815>.
- [86] Claudia-Lavinia IGNAT, Gérald OSTER, Olivia FOX, François CHAROY et Valerie SHALIN. « How Do User Groups Cope with Delay in Real-Time Collaborative Note Taking ». In : *European Conference on Computer Supported Cooperative Work 2015*. Sous la dir. de Nina BOULUS-RODJE, Gunnar ELLINGSEN, Tone BRATTETEIG, Margunn AANESTAD et Pernille BJORN. Proceedings of the 14th European Conference on Computer Supported Cooperative Work. Oslo, Norway : Springer International Publishing, sept. 2015, p. 223-242. DOI : 10.1007/978-3-319-20499-4_12. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01238831>.
- [87] Brice NÉDELEC, Pascal MOLLI, Achour MOSTÉFAOUI et Emmanuel DESMONTILS. « LSEQ : an adaptive structure for sequences in distributed collaborative editing ». In : *Proceedings of the 2013 ACM Symposium on Document Engineering*. DocEng 2013. Sept. 2013, p. 37-46. DOI : 10.1145/2494266.2494278.
- [88] Brice NÉDELEC, Pascal MOLLI et Achour MOSTÉFAOUI. « A scalable sequence encoding for collaborative editing ». In : *Concurrency and Computation : Practice and Experience* (), e4108. DOI : 10.1002/cpe.4108. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cpe.4108>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cpe.4108>.

- [89] Daniel ABADI. « Consistency Tradeoffs in Modern Distributed Database System Design : CAP is Only Part of the Story ». In : *Computer* 45.2 (2012), p. 37-42. DOI : 10.1109/MC.2012.33.
- [90] Haifeng SHEN et Chengzheng SUN. « A log compression algorithm for operation-based version control systems ». In : *Proceedings 26th Annual International Computer Software and Applications*. 2002, p. 867-872. DOI : 10.1109/CMPSAC.2002.1045115.
- [91] Claudia-Lavinia IGNAT. « Maintaining consistency in collaboration over hierarchical documents ». Thèse de doct. ETH Zurich, 2006.
- [92] Sylvie NOËL et Jean-Marc ROBERT. « Empirical study on collaborative writing : What do co-authors do, use, and like? ». In : *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)* 13.1 (2004), p. 63-89.
- [93] Jim GILES. « Special Report Internet encyclopaedias go head to head ». In : *nature* 438.15 (2005), p. 900-901.
- [94] GOOGLE. *Google Docs*. Last Accessed : 2022-10-07. URL : <https://docs.google.com/>.
- [95] ETHERPAD. *Etherpad*. Last Accessed : 2022-10-07. URL : <https://etherpad.org/>.
- [96] Quang-Vinh DANG et Claudia-Lavinia IGNAT. « Performance of real-time collaborative editors at large scale : User perspective ». In : *Internet of People Workshop, 2016 IFIP Networking Conference*. Proceedings of 2016 IFIP Networking Conference, Networking 2016 and Workshops. Vienna, Austria, mai 2016, p. 548-553. DOI : 10.1109/IFIPNetworking.2016.7497258. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01351229>.
- [97] Brice NÉDELEC, Pascal MOLLI et Achour MOSTEFAOUI. « CRATE : Writing Stories Together with our Browsers ». In : *25th International World Wide Web Conference*. WWW 2016. ACM, avr. 2016, p. 231-234. DOI : 10.1145/2872518.2890539.
- [98] Jim PICK. *PeerPad*. Last Accessed : 2022-10-07. URL : <https://peerpad.net/>.
- [99] Jim PICK. *Graf, Nikolaus*. Last Accessed : 2022-10-07. URL : <https://www.serenity.re/en/notes>.
- [100] Peter van HARDENBERG et Martin KLEPPMANN. « PushPin : Towards Production-Quality Peer-to-Peer Collaboration ». In : *7th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*. PaPoC 2020. ACM, avr. 2020. DOI : 10.1145/3380787.3393683.
- [101] John GRUBER. *Daring Fireball : Markdown*. Last Accessed : 2022-10-17. URL : <https://daringfireball.net/projects/markdown/>.
- [102] Geoffrey LITT, Sarah LIM, Martin KLEPPMANN et Peter van HARDENBERG. « Peritext : A CRDT for Collaborative Rich Text Editing ». In : *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction (PACMHCI)* 6.MHCI (nov. 2022). DOI : 10.1145/3555644. URL : <https://doi.org/10.1145/3555644>.

-
- [103] DROPBOX. *Paper - Dropbox*. Last Accessed : 2023-09-15. URL : <https://www.dropbox.com/fr/paper>.
- [104] Paulo Sérgio ALMEIDA, Carlos BAQUERO, Ricardo GONÇALVES, Nuno PREGUIÇA et Victor FONTE. « Scalable and Accurate Causality Tracking for Eventually Consistent Stores ». In : *Distributed Applications and Interoperable Systems*. Sous la dir. de Kostas MAGOUTIS et Peter PIETZUCH. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 67-81. ISBN : 978-3-662-43352-2.
- [105] Madhavan MUKUND, Gautham SHENOY et SP SURESH. « Optimized or-sets without ordering constraints ». In : *International Conference on Distributed Computing and Networking*. Springer. 2014, p. 227-241.
- [106] Elena YANAKIEVA, Michael YOUSSEF, Ahmad Hussein REZAE et Annette BIENIUSA. « Access Control Conflict Resolution in Distributed File Systems Using CRDTs ». In : *Proceedings of the 8th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*. PaPoC '21. Online, United Kingdom : Association for Computing Machinery, 2021. ISBN : 9781450383387. DOI : 10.1145/3447865.3457970. URL : <https://doi.org/10.1145/3447865.3457970>.
- [107] Pierre-Antoine RAULT, Claudia-Lavinia IGNAT et Olivier PERRIN. « Distributed Access Control for Collaborative Applications Using CRDTs ». In : *Proceedings of the 9th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*. PaPoC '22. Rennes, France : Association for Computing Machinery, 2022, p. 33-38. ISBN : 9781450392563. DOI : 10.1145/3517209.3524826. URL : <https://doi.org/10.1145/3517209.3524826>.
- [108] Kenneth P BIRMAN, Mark HAYDEN, Ozgur OZKASAP, Zhen XIAO, Mihai BUDIU et Yaron MINSKY. « Bimodal multicast ». In : *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)* 17.2 (1999), p. 41-88.
- [109] Victorien ELVINGER, Gérald OSTER et Francois CHAROY. « Prunable Authenticated Log and Authenticable Snapshot in Distributed Collaborative Systems ». In : *2018 IEEE 4th International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC)*. 2018, p. 156-165. DOI : 10.1109/CIC.2018.00031.
- [110] OPENRELAY. *OpenRelay*. Last Accessed : 2022-10-07. URL : <https://openrelay.xyz/>.
- [111] Protocol LABS. *IPFS*. Last Accessed : 2022-10-07. URL : <https://ipfs.io/>.
- [112] Leslie LAMPORT, Robert SHOSTAK et Marshall PEASE. « The Byzantine Generals Problem ». In : *Concurrency : The Works of Leslie Lamport*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2019, p. 203-226. ISBN : 9781450372701. URL : <https://doi.org/10.1145/3335772.3335936>.
- [113] Jim BAUWENS et Elisa Gonzalez BOIX. « Flec : A Versatile Programming Framework for Eventually Consistent Systems ». In : *Proceedings of the 7th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*. PaPoC '20. Heraklion, Greece : Association for Computing Machinery, 2020. ISBN : 9781450375245. DOI : 10.1145/3380787.3393685. URL : <https://doi.org/10.1145/3380787.3393685>.

BIBLIOGRAPHIE

- [114] Richard J LIPTON et Jonathan S SANDBERG. *PRAM : A scalable shared memory*. Princeton University, Department of Computer Science, 1988.

Résumé

Un système collaboratif permet à plusieurs utilisateur-rices de créer ensemble un contenu. Afin de supporter des collaborations impliquant des millions d'utilisateurs, ces systèmes adoptent une architecture décentralisée pour garantir leur haute disponibilité, tolérance aux pannes et capacité de passage à l'échelle. Cependant, ces systèmes échouent à garantir la confidentialité des données, souveraineté des données, pérennité et résistance à la censure. Pour répondre à ce problème, la littérature propose la conception d'applications Local-First Software (LFS) : des applications collaboratives pair-à-pair (P2P).

Une pierre angulaire des applications LFS sont les Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs). Il s'agit de nouvelles spécifications des types de données, tels que l'Ensemble ou la Séquence, permettant à un ensemble de noeuds de répliquer une donnée. Les CRDTs permettent aux noeuds de consulter et de modifier la donnée sans coordination préalable, et incorporent un mécanisme de résolution de conflits pour intégrer les modifications concurrentes. Cependant, les CRDTs pour le type Séquence souffrent d'une croissance monotone du surcoût de leur mécanisme de résolution de conflits. Dans cette thèse, nous avons identifié le besoin de mécanismes qui (i) permettent de réduire le surcoût des CRDTs pour le type Séquence, (ii) sont compatibles avec les applications LFS. Par conséquent, nous proposons un nouveau CRDT pour le type Séquence : RenamableLogootSplit. Ce CRDT intègre un mécanisme de renommage qui minimise périodiquement le surcoût de son mécanisme de résolution de conflits ainsi qu'un mécanisme de résolution de conflits pour intégrer les modifications concurrentes à un renommage. Finalement, nous proposons un mécanisme de Garbage Collection (GC) qui supprime à terme le propre surcoût du mécanisme de renommage.

Abstract

A collaborative system enables multiple users to work together to create content. To support collaborations involving millions of users, these systems adopt a decentralised architecture to ensure high availability, fault tolerance and scalability. However, these systems fail to guarantee the data confidentiality, data sovereignty, longevity and resistance to censorship. To address this problem, the literature proposes the design of Local-First Software (LFS) applications : collaborative peer-to-peer applications.

A cornerstone of LFS applications are Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs). CRDTs are new specifications of data types, e.g. Set or Sequence, enabling a set of nodes to replicate a data. CRDTs enable nodes to access and modify the data without prior coordination, and incorporate a conflict resolution mechanism to integrate concurrent modifications. However, Sequence CRDTs suffer from a monotonous growth in the overhead of their conflict resolution mechanism. In this thesis, we have identified the need for mechanisms that (i) reduce the overhead of Sequence CRDTs (ii) are compatible with LFS applications. Thus, we propose a novel Sequence CRDT : RenamableLogootSplit. This CRDT embeds a renaming mechanism that periodically minimizes the overhead of its conflict resolution mechanism as well as a conflict resolution mechanism to integrate concurrent modifications to a rename. Finally, we propose a mechanism of Garbage Collection (GC) that eventually removes the own overhead of the renaming mechanism.

