

Ré-identification efficace dans les types de données répliquées sans conflit (CRDTs)

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le TODO : Définir une date

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine
(mention informatique)

par

Matthieu Nicolas

Composition du jury

| | |
|--------------------------------|--------------------------|
| <i>Président :</i> | Stephan Merz |
| <i>Rapporteurs :</i> | Le rapporteur 1 de Paris |
| | Le rapporteur 2 |
| | suite taratata |
| | Le rapporteur 3 |
| <i>Examineurs :</i> | L'examineur 1 d'ici |
| | L'examineur 2 |
| <i>Membres de la famille :</i> | Mon frère |
| | Ma sœur |

Mis en page avec la classe thesul.

Remerciements

Les remerciements.

*Je dédie cette thèse
à ma machine.
Oui, à Pandore,
qui fut la première de toutes.*

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 1 |
| 1 Contexte | 1 |
| 2 Questions de recherche | 1 |
| 3 Contributions | 1 |
| 4 Plan du manuscrit | 1 |
| Chapitre 1 | |
| État de l’art | 3 |
| 1.1 Transformées opérationnelles | 4 |
| 1.2 Séquences répliquées sans conflits | 4 |
| 1.2.1 Types de données répliquées sans conflits | 4 |
| 1.2.2 Approches pour les séquences répliquées sans conflits | 7 |
| 1.3 LogootSplit | 7 |
| 1.3.1 Identifiants | 7 |
| 1.3.2 Aggrégation dynamique d’éléments en blocs | 8 |
| 1.3.3 Modèle de données | 9 |
| 1.3.4 Modèle de livraison | 11 |
| 1.3.5 Limites | 13 |
| 1.4 Mitigation du surcoût des séquences répliquées sans conflits | 14 |
| 1.4.1 Core-Nebula | 14 |
| 1.4.2 LSEQ | 14 |
| 1.4.3 Eager stability determination | 14 |
| 1.5 Synthèse | 15 |
| Chapitre 2 | |
| Renommage dans une séquence répliquée | 17 |
| 2.1 Présentation de l’approche | 18 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1.1 | Modèle du système | 18 |
| 2.1.2 | Définition de l'opération de renommage | 18 |
| 2.2 | RenamableLogootSplit | 20 |
| 2.2.1 | Opération de renommage proposée | 20 |
| 2.2.2 | Gestion des opérations concurrentes au renommage | 21 |
| 2.2.3 | Évolution du modèle de livraison des opérations | 24 |
| 2.3 | RenamableLogootSplit v2 | 24 |
| 2.3.1 | Conflits en cas de renommages concurrents | 24 |
| 2.3.2 | Relation de priorité entre renommages | 25 |
| 2.3.3 | Algorithme d'annulation de l'opération de renommage | 27 |
| 2.3.4 | Processus d'intégration d'une opération | 29 |
| 2.3.5 | Règles de récupération de la mémoire des états précédents | 29 |
| 2.4 | Validation | 32 |
| 2.4.1 | Preuve de correction de RENAMEID | 32 |
| 2.4.2 | Complexité temporelle | 32 |
| 2.4.3 | Expérimentations | 34 |
| 2.4.4 | Résultats | 35 |
| 2.5 | Discussion | 39 |
| 2.5.1 | Stockage des états précédents sur disque | 39 |
| 2.5.2 | Utilisation de l'opération de renommage comme snapshot | 39 |
| 2.5.3 | Compression et limitation de la taille de l'opération <i>rename</i> | 40 |
| 2.5.4 | Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements | 41 |
| 2.5.5 | Implémentation alternative à base d'operation-log | 41 |
| 2.5.6 | Report de la transition vers la nouvelle epoch principale | 43 |
| 2.6 | Comparaison avec les approches existantes | 43 |
| 2.7 | Conclusion | 43 |
| 2.7.1 | Récapitulatif | 43 |
| 2.7.2 | Limites | 44 |
| 2.7.3 | Perspectives | 44 |

Chapitre 3

MUTE, un éditeur web collaboratif P2P temps réel 45

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 3.1 | Présentation | 46 |
| 3.1.1 | Objectifs | 46 |
| 3.1.2 | Architecture | 46 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2 | Couche interface | 46 |
| 3.3 | Couche réplication | 47 |
| 3.3.1 | Document texte | 47 |
| 3.3.2 | Métadonnées | 47 |
| 3.3.3 | Collaborateurs | 47 |
| 3.3.4 | Curseurs | 48 |
| 3.4 | Couche sécurité | 48 |
| 3.4.1 | Authenticité des clés publiques des participants | 48 |
| 3.4.2 | Établissement de la clé de chiffrement de groupe | 48 |
| 3.5 | Couche réseau | 48 |
| 3.5.1 | Netflux | 48 |
| 3.5.2 | Pulsar | 48 |
| 3.6 | Pistes d'amélioration et de recherche | 49 |
| 3.6.1 | Composition de CRDTs | 49 |
| 3.6.2 | CRDT pour les styles | 49 |
| 3.6.3 | Réseaux | 49 |
| 3.6.4 | Évolution de schéma | 49 |
| 3.6.5 | Droits d'accès | 49 |
| 3.6.6 | Historique du document | 50 |
| 3.6.7 | Rôles et places des bots dans systèmes collaboratifs | 50 |

Chapitre 4

Conclusions et perspectives

51

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Résumé des contributions | 51 |
| 4.2 | Perspectives | 51 |
| 4.2.1 | Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements . . | 51 |
| 4.2.2 | Redéfinition de la sémantique du renommage en déplacement d'éléments | 51 |
| 4.2.3 | Définition de types de données répliquées sans conflits plus complexes | 51 |

Annexe A

Algorithmes `RENAMEID`

Annexe B

Algorithmes `REVERTRENAMEID`

| | |
|--------------|-----------|
| Index | 57 |
|--------------|-----------|

| |
|----------------------|
| Bibliographie |
|----------------------|

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Representation of a LogootSplit sequence containing the elements "HLO" . | 9 |
| 1.2 | TODO | 10 |
| 1.3 | TODO | 11 |
| 1.4 | TODO | 12 |
| 1.5 | Insertion leading to longer identifiers | 14 |
| 2.1 | Renaming the sequence on node <i>A</i> | 20 |
| 2.2 | Concurrent update leading to inconsistency | 21 |
| 2.3 | Main functions to rename an identifier | 23 |
| 2.4 | Renaming concurrent update using <code>RENAMEID</code> before applying it to maintain intended order | 23 |
| 2.5 | Concurrent <i>rename</i> operations leading to divergent states | 24 |
| 2.6 | The <i>epoch tree</i> corresponding to the scenario of Figure 2.5 | 25 |
| 2.7 | Selecting target epoch from execution with concurrent <i>rename</i> operations . | 26 |
| 2.8 | Main functions to revert an identifier renaming | 28 |
| 2.9 | Reverting a previously applied <i>rename</i> operation | 28 |
| 2.10 | Garbage collecting epochs and corresponding <i>former states</i> | 30 |
| 2.11 | Evolution of the size of the document | 36 |
| 2.12 | Integration time of standard operations | 37 |
| A.1 | Remaining functions to rename an identifier | 53 |
| B.1 | Remaining functions to revert an identifier renaming | 56 |

Introduction

- 1 Contexte
- 2 Questions de recherche
- 3 Contributions
- 4 Plan du manuscrit

Chapitre 1

État de l’art

Sommaire

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1.1 | Transformées opérationnelles | 4 |
| 1.2 | Séquences répliquées sans conflits | 4 |
| 1.2.1 | Types de données répliquées sans conflits | 4 |
| 1.2.2 | Approches pour les séquences répliquées sans conflits | 7 |
| 1.3 | LogootSplit | 7 |
| 1.3.1 | Identifiants | 7 |
| 1.3.2 | Aggrégation dynamique d’éléments en blocs | 8 |
| 1.3.3 | Modèle de données | 9 |
| 1.3.4 | Modèle de livraison | 11 |
| 1.3.5 | Limites | 13 |
| 1.4 | Mitigation du surcoût des séquences répliquées sans conflits | 14 |
| 1.4.1 | Core-Nebula | 14 |
| 1.4.2 | LSEQ | 14 |
| 1.4.3 | Eager stability determination | 14 |
| 1.5 | Synthèse | 15 |

- Contexte des systèmes distribués à large échelle
- Réplique les données afin de pouvoir supporter les pannes
- Adopte le paradigme de la réplication optimiste [42]
- Autorise les noeuds à consulter et à modifier la donnée sans aucune coordination entre eux
- Autorise alors les noeuds à diverger temporairement
- Permet d’être toujours disponible, de toujours répondre aux requêtes même en cas de partition réseau
- Permet aussi, en temps normal, de réduire le temps de réponse (privilégie la latence) [1]
- Comme ce modèle autorise les noeuds à modifier la donnée sans se coordonner, possible d’effectuer des modifications concurrentes

- Généralement, un mécanisme de résolution de conflits est nécessaire afin d'assurer la convergence des noeuds dans une telle situation
- Plusieurs approches ont été proposées pour implémenter un tel mécanisme

1.1 Transformées opérationnelles

- Approche permettant de gérer des modifications concurrentes sur un type de données
- Consiste à transformer les opérations par rapport aux effets des opérations concurrentes pour rendre les rendre commutatives. Permet de rendre l'ordre d'intégration des opérations sans importance par rapport à l'état final obtenu
- Se décompose en 2 parties : algorithmes (génériques) et fonctions de transformations (spécifiques au type de données)
- Plusieurs algorithmes OT adoptent une architecture centralisée (trouver citations)
- Cette architecture pose des problèmes de performances (bottleneck), sécurité (SPOF), coût, d'utilisabilité (mode offline), pérennité (disparition du service), vie privée et de résistance à la censure.
- Pour ces raisons, des algorithmes reposant sur une architecture décentralisée ont été proposés
- Mais ne règlent qu'en partie ces limites
- Notamment, ne sont pas adaptés à des systèmes P2P dynamiques
- Besoin de vector clocks sur chaque opération pour détecter la concurrence. Vector clocks adaptés dans systèmes à nombre de pairs fixe, mais pas aux systèmes dynamiques (revoir causal barrier pour p-e nuancer ce propos).
- Néanmoins, cette approche a permis de démocratiser les systèmes collaboratifs via son adoption par des services tels que Google Docs, Overleaf, Framapad
- De plus, dans le cadre de ces travaux, ont été définies les propriétés CCI [45].
- Remettre en question la propriété Causalité des CCI. Généralement, confond causalité et happen-before et exprime en finalité une contrainte trop forte. Cette contrainte peut réduire la réactivité du système (exemple avec 2 insertions sans liens mais qui force d'attendre la 1ère pour intégrer la 2nde). Causalité pose aussi des problèmes de passage à l'échelle car repose sur vector clocks. IMO, doit relaxer cette propriété pour pouvoir construire systèmes à large échelle.

Matthieu: TODO : Mentionner TP1 et TP2

Matthieu: TODO : Spécification faible et forte des séquences répliquées

1.2 Séquences répliquées sans conflits

1.2.1 Types de données répliquées sans conflits

Principes

- Nouvelles spécifications des types de données existants

- Structures conçues pour être répliquées au sein d'un système
- Et être modifiées sans coordination par ses différents noeuds
- Doivent donc supporter de nouveaux scénarios uniquement possible dans des exécutions parallèles
- Et définir une sémantique pour ces scénarios inédits
 - Exemple du Registre avec LWW-Register et MV-Register ?
- Pour gérer ces scénarios, intègrent un mécanisme de résolution de conflits directement au sein de leur spécification
- Garantissent la cohérence forte à terme

Matthieu: Faire le lien avec les travaux de Burckhardt [14] et les MRDTs [24]

Familles de types de données répliquées sans conflits

- Une catégorisation des CRDTs a été proposée
- Propose de répartir les CRDTs en différentes familles en fonction de la méthode de synchronisation utilisée
- Chacune de ces méthodes de synchronisation implique des contraintes sur la couche réseau du système et entraîne des répercussions sur la structure de données elle-même
- Types de données répliquées sans conflits à base d'états [44, 43]
 - Les noeuds partagent leur état de manière périodique
 - Une fonction *merge* permet aux noeuds de fusionner leur état courant avec un autre état reçu
 - Aucune hypothèse sur la partie réseau autre que les noeuds arrivent à communiquer à terme
 - Pas un problème si états perdus, les prochains intégreront les informations de ces derniers
 - Pas un problème si états reçus dans le désordre, la fonction *merge* est commutative
 - Pas un problème si états reçus plusieurs fois, *merge* est idempotent
 - Mais nécessite de conserver au sein de la structure de données assez d'informations pour proposer une telle fonction de *merge*
 - Par exemple, besoin de conserver une trace des éléments supprimés pour empêcher leur réapparition suite à une fusion d'états
 - *Matthieu: TODO : Ajouter forces, faiblesses et cas d'utilisation de cette approche*
- Types de données répliquées sans conflits à base d'opérations [44, 43, 8, 7]
 - Les noeuds partagent uniquement des opérations représentant leurs modifications

- Une modification peut se formaliser en deux étapes
- *prepare*, qui permet de générer une opération correspondant à une modification
- *effect*, qui permet d'appliquer l'effet de la modification à un état
- Les opérations concurrentes doivent être commutatives pour assurer la convergence
- Mais pas de contraintes sur les opérations causalement liées
- Pas de contraintes non plus sur l'idempotence des opérations
- Nécessite donc généralement d'ajouter une couche *livraison* pour faire le lien entre le réseau et le CRDT
- Permet d'attacher des informations de causalité aux opérations locales avant de les envoyer
- Permet de ré-ordonner et filtrer les opérations distantes reçues avant de les fournir au CRDT
- Besoin d'un mécanisme d'anti-entropie [38] pour assurer que l'ensemble des noeuds observent l'ensemble des opérations et ainsi garantir la convergence
Matthieu: TODO : Ajouter référence mécanisme d'anti-entropie basé sur Merkle Tree
- Permet de lisser la consommation réseau
- Offre des temps d'intégration et de propagation des modifications rapides
- Mais accumule des métadonnées puisque les noeuds doivent conserver les opérations passées pour permettre à un nouveau noeud de rejoindre la collaboration et de se synchroniser
- Possible de tronquer le log des opérations en se basant sur la stabilité causale [9] afin de limiter cette accumulation de métadonnées
- Types de données répliquées sans conflits à base de différences [4, 3]

Adoption dans la littérature et l'industrie

- Conception et développement de bibliothèques mettant à disposition des développeurs d'applications des types de données composés [33, 32, 53, 25, 6]
- Conception de langages de programmation intégrant des CRDTs comme types primitifs, destinés au développement d'applications distribuées [28, 20]
- Conception et implémentation de bases de données distribuées, relationnelles ou non, privilégiant la disponibilité et la minimisation de la latence à l'aide des CRDTs [40, 17, 51, 16, 55]
- Conception d'un nouveau paradigme d'applications, Local-First Software, dont une des fondations est les CRDTs [26, 23]
- Éditeurs collaboratifs temps réel à large échelle et offrant de nouveaux scénarios de collaboration grâce aux CRDTs [29, 36]

1.2.2 Approches pour les séquences répliquées sans conflits

Approche à pierres tombales

- WOOT [37, 50, 2]
- RGA [41]
- RGASplit [13]

Approche à identifiants densément ordonnés

- Treedoc [39]
- Logoot [48, 49]

Matthieu: NOTE : Ajouter LogootSplit de manière sommaire aussi à cet endroit ?

Matthieu: TODO : Autres Sequence CRDTs à considérer : String-wise CRDT [54], Chronofold [22]

1.3 LogootSplit

LogootSplit [5] est l'état de l'art des séquences répliquées à identifiants densément ordonnés. Comme expliqué précédemment, LogootSplit utilise des identifiants provenant d'un ordre total dense pour positionner les éléments dans la séquence répliquée.

1.3.1 Identifiants

Pour ce faire, LogootSplit assigne des identifiants composés d'une liste de tuples aux éléments. Les tuples sont définis de la manière suivante :

Définition 1 (Tuple) *Un Tuple est un quadruplet $\langle position, nodeId, nodeSeq, offset \rangle$ où*

- *position incarne la position souhaitée de l'élément.*
- *nodeId est l'identifiant unique du noeud qui a généré le tuple.*
- *nodeSeq est le numéro de séquence courant du noeud à la génération du tuple.*
- *offset indique la position de l'élément au sein d'un bloc. Nous reviendrons plus en détails sur ce composant dans la sous-section 1.3.2.*

Matthieu: TODO : Ajouter une relation d'ordre sur les tuples

Dans ce manuscrit, nous représentons les tuples par le biais de la notation suivante : $position_{offset}^{nodeId\ nodeSeq}$ où *position* est une lettre minuscule, *nodeId* une lettre majuscule et *nodeSeq* et *offset* des entiers, e.g. i_0^{B0} .

À partir de là, les identifiants LogootSplit sont définis de la manière suivante :

Définition 2 (Identifiant) *Un Identifiant est une liste de Tuples.*

Matthieu: TODO : Définir la notion de base (et autres fonctions utiles sur les identifiants ? genre isPrefix, concat, getTail...)

Nous représentons les identifiants en listant les tuples qui les composent. Par exemple, l'identifiant composé des tuples $\langle \langle i, B, 0, 0 \rangle \langle f, A, 0, 0 \rangle \rangle$ est présenté de la manière suivante : $i_0^{B0} f_0^{A0}$.

Les identifiants ont pour rôle d'ordonner les éléments relativement les uns par rapport aux autres. Pour ce faire, une relation d'ordre totale aux identifiants est associée à l'ensemble des identifiants :

Définition 3 (Relation $<_{id}$) *La relation $<_{id}$ est un ordre total strict sur l'ensemble des identifiants. Elle permet aux noeuds de comparer n'importe quelle paire d'identifiants. Elle est définie en utilisant l'ordre lexicographique sur les composants des différents tuples des identifiants comparés.*

- En utilisant cette relation d'ordre, les noeuds peuvent ordonner les éléments grâce à leur identifiant.
- Par exemple, déterminent que $i_0^{A1} <_{id} i_0^{B0}$ car les positions sont identiques et que le *nodeId* (A) du premier est plus petit que le *nodeId* (B) du second
- et que $i_0^{B0} <_{id} i_0^{B0} f_0^{A0}$ car le premier est un préfixe du second

Matthieu: TODO : Montrer que cet ensemble d'identifiants est un ensemble dense

1.3.2 Aggrégation dynamique d'éléments en blocs

Au lieu de stocker les identifiants de chaque élément de la séquence, LogootSplit propose d'aggréger de façon dynamique les éléments dans des blocs. Pour cela, LogootSplit introduit la notion d'intervall d'identifiants :

Définition 4 (IdInterval) *Un IdInterval est un couple $\langle idBegin, offsetEnd \rangle$ où*

- *idBegin est l'identifiant du premier élément de l'intervall.*
- *offsetEnd est l'offset du dernier identifiant de l'intervall.*

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

LogootSplit regroupe les éléments avec des identifiants *contigus* dans un interval. Nous appelons *contigus* deux identifiants qui partagent une même base (c.-à-d. qui sont identiques à l'exception de leur dernier offset) et dont les *offsets* sont consécutifs. Nous représentons un interval d'identifiants à l'aide du formalisme suivant : $position_{begin..end}^{nodeId\ nodeSeq}$ où *begin* est l'offset du premier identifiant de l'intervall et *end* du dernier.

Les blocs permettent d'associer un interval d'identifiants aux éléments correspondant. Les blocs sont définis de la manière suivante :

Définition 5 (Bloc) *Un Bloc est un quadruplet $\langle idInterval, elts, isAppendable, isPrependable \rangle$ où*

- *idInterval* est l'intervall d'identifiants formant le bloc
- *elts* sont les éléments contenus dans le bloc
- *isAppendable* (resp. *isPrependable*) est un booléen indiquant si l'auteur du bloc peut ajouter un nouvel élément en fin (resp. début) de bloc

La Figure 1.1 présente un exemple de séquence LogootSplit : dans la 1.1a, les identifiants i_0^{B0} , i_1^{B0} , i_2^{B0} forment une chaîne d'identifiants contigus. LogootSplit est donc capable de regrouper ces éléments en un bloc représentant l'intervall d'identifiants $i_{0..2}^{B0}$ pour minimiser les métadonnées stockées, comme montré dans la 1.1b.

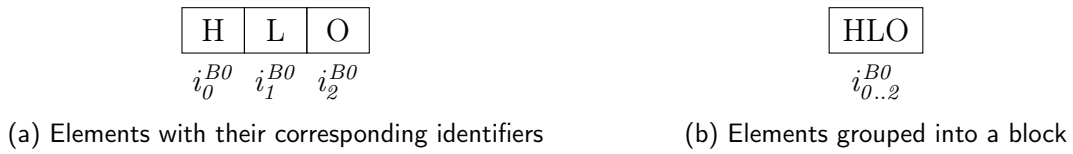


FIGURE 1.1 – Representation of a LogootSplit sequence containing the elements "HLO"

Cette fonctionnalité réduit le nombre d'identifiants stockés au sein de la structure de données, puisque les identifiants sont conservés à l'échelle des blocs plutôt qu'à l'échelle de chaque élément. Ceci permet de réduire de manière significative le surcoût en métadonnées de la structure de données. L'utilisation de blocs améliore aussi les performances de la structure de données. En effet, l'utilisation de blocs permet de parcourir plus efficacement la structure de données. Les blocs permettent aussi d'effectuer des modifications à l'échelle de la chaîne de caractères et non plus seulement caractère par caractère.

Matthieu: TODO : indiquer que le couple $\langle \text{nodeId}, \text{nodeSeq} \rangle$ permet d'identifier de manière unique la base d'un bloc ou d'un identifiant

Notons que pour une séquence donnée, nous pouvons identifier chacun de ses identifiants par le triplet $\langle \text{nodeId}, \text{nodeSeq}, \text{offset} \rangle$ issue de leur dernier Tuple. Par exemple, le triplet $\langle B, 0, 2 \rangle$ désigne de manière unique l'identifiant i_2^{B0} dans Figure 1.1.

1.3.3 Modèle de données

ANDRÉ et al. [5] définissent une séquence LogootSplit de la manière suivante :

Définition 6 (Séquence LogootSplit) Une séquence Séquence LogootSplit est un triplet $\langle \text{nodeId}, \text{nodeSeq}, \text{blocks} \rangle$ où

- *nodeId* est l'identifiant du noeud.
- *nodeSeq* est le numéro de séquence courant du noeud.
- *blocks* est une liste de Blocs correspondant à l'état actuel de la séquence répliquée.

Plusieurs fonctions sont définies sur cette structure de données et permettent de l'interroger et de la modifier :

- $\text{ins}(S, \text{index}, \text{elts})$ permet d'insérer les éléments elts à la position index dans la séquence S . Cette fonction génère et associe un interval d'identifiants valide aux éléments insérés. Elle retourne une opération *insert* permettant aux autres noeuds d'intégrer la modification à leur état.

Définition 7 (insert) Une opération *insert* est un couple $\langle id, \text{elts} \rangle$ où

- id est l'identifiant du premier élément inséré par cette opération.
- elts est la liste des éléments insérés par cette opération.
- $\text{rem}(S, \text{index}, \text{length})$ permet de supprimer length éléments à partir la position index dans la séquence S . Cette fonction répertorie les éléments supprimés sous la forme d'intervall d'identifiants. Elle retourne une opération *remove* permettant aux autres noeuds d'intégrer la modification à leur état.

Définition 8 (remove) Une opération *remove* est une liste de *IdInterval* où chaque *idInterval* désigne un ensemble d'éléments à supprimer.

Nous présentons dans la Figure 1.2 un exemple d'utilisation de cette séquence répliquée.



FIGURE 1.2 – TODO

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 $i_{0..3}^{B0}$ 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^{B0}). Cette opération est envoyée au noeud B pour qu'il intègre cette modification.

Le noeud A insère ensuite un élément "e" dans la séquence, entre le "h" et le "l". LogootSplit doit alors générer un identifiant id à associer à ce nouvel élément. Ce nouvel identifiant id doit respecter la contrainte suivante : $i_0^{B0} <_{id} id <_{id} i_2^{B0}$. Cependant, LogootSplit ne peut pas générer un identifiant composé d'un seul tuple respectant cet ordre. LogootSplit génère alors id en recopiant le premier tuple (i_0^{B0}) et en y ajoutant un nouveau

tuple (f_0^{A0}) . LogootSplit génère l'opération *insert* correspondante, indiquant l'élément à insérer et sa position grâce à son identifiant. Cette opération est ensuite diffusée sur le réseau.

En parallèle, le noeud B insère un élément "!" à la fin de la séquence. Comme le noeud B est l'auteur du bloc $i_{0..3}^{B0}$, il peut y ajouter de nouveaux éléments. LogootSplit associe donc l'identifiant i_4^{B0} à l'élément "!" et l'ajoute au bloc existant.

Les noeuds se synchronisent ensuite. Le noeud A reçoit l'opération *insert* de l'élément "!" à la position i_4^{B0} . Le noeud A détermine que cet élément doit être inséré à la fin de la séquence (puisque $i_3^{B0} <_{id} i_4^{B0}$) et qu'il peut être ajouté au bloc $i_{2..3}^{B0}$ (puisque i_3^{B0} et i_4^{B0} sont contigus).

De son côté, le noeud B reçoit tout d'abord l'opération *remove* des éléments identifiés par l'intervall $i_{1..1}^{B0}$, c.-à-d. l'élément attaché à l'identifiant i_1^{B0} . Le noeud B supprime donc l'élément "r" de son état.

Il reçoit ensuite l'opération *insert* de l'élément "e" à la position $i_0^{B0} f_0^{A0}$. Le noeud B insère cet élément entre les éléments "h" et "l" (puisque $i_0^{B0} <_{id} i_0^{B0} f_0^{A0} <_{id} i_2^{B0}$), respectant ainsi l'intention du noeud A.

Matthieu: NOTE : Pourrait définir dans cette sous-section la notion de séquence bien-formée

1.3.4 Modèle de livraison

Afin de garantir son bon fonctionnement, LogootSplit doit être associé à une couche de livraison de messages garantissant plusieurs propriétés.

Livraison des opérations en exactement un exemplaire

Tout d'abord, la couche de livraison de messages doit assurer que toutes les opérations soient délivrées aux noeuds, mais qu'une seule et unique fois. La Figure 1.3 représente un exemple illustrant la nécessité de cette contrainte.

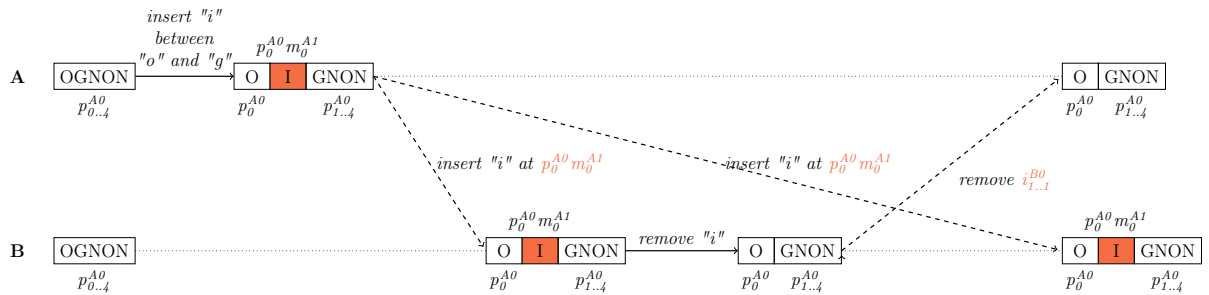


FIGURE 1.3 – TODO

Dans cet exemple, deux noeuds A et B répliquent et éditent collaborativement une séquence. La séquence répliquée contient initialement les éléments "ognon", qui sont associés à l'intervall d'identifiants $p_{0..4}^{A0}$.

Le noeud A commence par insérer un nouvel élément, "i", dans la séquence entre les éléments "o" et "g". L'opération *insert* résultante, insérant l'élément "i" à la position $p_0^{A0} m_0^{A1}$, est diffusée au noeud B.

À la réception de l'opération *insert*, le noeud B l'intègre à son état. Puis il supprime dans la foulée ce nouvel élément. L'opération *remove* générée est envoyée au noeud A.

Le noeud A intègre l'opération *remove*, ce qui a pour effet de supprimer l'élément "i" associé à l'identifiant $p_0^{A0} m_0^{A1}$. Il obtient alors un état équivalent à celui du noeud B.

Cependant, l'opération *insert* insérant l'élément "i" à la position $p_0^{A0} m_0^{A1}$ est de nouveau délivrée au noeud B. De multiples raisons peuvent être à l'origine de cette nouvelle livraison : 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 "i" 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.

Matthieu: QUESTION : Ajouter quelques lignes ici sur comment faire ça en pratique (Ajout d'un dot aux opérations, maintien d'un dot store au niveau de la couche livraison, vérification que dot pas encore présent dans dot store avant de passer opération à la structure de données) ? Ou je garde ça pour le chapitre sur MUTE ?

Livraison de l'opération *remove* après l'opération *insert*

Une autre propriété que doit assurer la couche de livraison de messages est que les opérations *remove* doivent être livrées au Conflict-free Replicated Data Type (CRDT) après les opérations *insert* correspondantes. La Figure 1.4 présente un exemple justifiant cette contrainte.



FIGURE 1.4 – TODO

Dans cet exemple, trois noeuds A, B et C répliquent et éditent collaborativement une séquence. Le noeud A commence par insérer un nouvel élément, "i", dans la séquence entre les éléments "o" et "g". L'opération *insert* résultante, insérant l'élément "i" à la position $p_0^{A0} m_0^{A1}$, est diffusée aux autres noeuds.

À la réception de l'opération *insert*, le noeud B l'intègre à son état. Cependant, le noeud B supprime dans la foulée l'élément nouvellement ajouté. Il diffuse ensuite l'opération *remove* générée.

Toutefois, suite à un aléa du réseau, l'opération *remove* supprimant l'élément "i" est livrée au noeud C avant l'opération *insert* l'ajoutant à son état. Lorsque le noeud C reçoit l'opération *remove*, il parcourt son état à la recherche de l'élément "i" pour le supprimer. Cependant, celui-ci n'est pas présent dans son état courant. L'intégration de l'opération s'achève donc sans effectuer de modification.

Le noeud C reçoit ensuite l'opération *insert*. Le noeud C intègre ce nouvel élément dans la séquence en utilisant son identifiant ($p_0^{A0} <_{id} p_0^{A0} m_0^{A1} <_{id} p_1^{A0}$).

Ainsi, l'état du noeud C diverge de celui-ci des autres noeuds à terme, et cela malgré que les noeuds A, B et C aient intégré le même ensemble d'opérations. Ce résultat transgresse la propriété de Cohérence forte à terme (SEC) 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.

Matthieu: QUESTION : Même que pour la exactly-once delivery, est-ce que j'explique ici comment assurer cette contrainte plus en détails (Ajout des dots des opérations insert en dépendances de l'opération remove, vérification que dots présents dans dot store avant de passer l'opération remove à la structure de données) ou je garde ça pour le chapitre sur MUTE ?

Définition du modèle de livraison

À partir de ces contraintes, nous définissons le modèle de livraison suivant :

Définition 9 (Exactly-once + Causal remove) *TODO*

Dans ses travaux de thèse, ELVINGER [21] propose Dotted LogootSplit, un nouveau Sequence CRDT basée sur les différences. 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.

1.3.5 Limites

Comme indiqué précédemment, la taille des identifiants provenant d'un ordre total dense est variable. Quand les noeuds insèrent de nouveaux éléments entre deux autres ayant la même valeur de *position*, LogootSplit n'a pas d'autre choix que d'augmenter la taille de l'identifiant résultant. La Figure 1.5 illustre de tels cas. Dans cet exemple, puisque le noeud A insère un nouvel élément entre deux identifiants contigus i_0^{B0} et i_1^{B0} , LogootSplit ne peut pas générer un identifiant adapté de la même taille. Pour respecter l'ordre souhaité, LogootSplit génère un identifiant en ajoutant un nouveau tuple à l'identifiant du prédecesseur : $i_0^{B0} f_0^{A0}$.

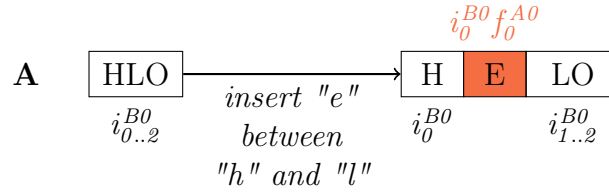


FIGURE 1.5 – Insertion leading to longer identifiers

Par conséquent, la taille des identifiants a tendance à croître alors que le système progresse. Cette croissance impacte négativement les performances de la structure de données sur plusieurs aspects. Puisque les identifiants attachés aux éléments deviennent plus long, le surcoût en métadonnées augmente. Ceci augmente aussi la consommation en bande-passante puisque les noeuds doivent diffuser les identifiants aux autres.

Matthieu: TODO : Ajouter une phrase pour expliquer que la croissance des identifiants impacte aussi le temps d'intégration des modifications

De plus, le nombre de blocs composant la séquence répliquée augmente au fil du temps. En effet, plusieurs contraintes sur la génération d'identifiants empêchent les noeuds d'ajouter des nouveaux éléments aux blocs existants. Par exemple, seul le noeud qui a généré un bloc peut ajouter un élément à ce dernier. Ces limitations provoquent la génération de nouveau blocs. La séquence se retrouve finalement fragmentée en de nombreux blocs de seulement quelques caractères chacun. Cependant, aucun mécanisme pour fusionner les blocs à posteriori n'est fourni. L'efficacité de la structure décroît donc puisque chaque bloc entraîne un surcoût.

Comme illustré plus loin, nous avons mesuré au cours de nos évaluations que le contenu représente à terme moins de 1% de taille de la structure de données. Les 99% restants correspondent aux métadonnées utilisées par la séquence répliquée. Il est donc nécessaire de proposer des mécanismes et techniques afin de mitiger les problèmes soulignés précédemment.

1.4 Mitigation du surcoût des séquences répliquées sans conflits

1.4.1 Core-Nebula

1.4.2 LSEQ

Matthieu: Serait intéressant d'avoir une implémentation combinant LogootSplit et LSEQ pour vérifier si les contraintes sur la création de blocs dans LogootSplit ne "sabotent" pas la croissance polylogarithmique des identifiants de LSEQ

1.4.3 Eager stability determination

Matthieu: Peut aussi aborder les travaux de Jim Bauwens et Elisa Gonzalez Boix [12, 10, 11] sur l'accélération de la stabilité causale : ne concerne pas seulement les séquences,

mais les operation-based CRDTs. Permet de tronquer le log des opérations mais aussi d'accélérer le mécanisme de GC de RGA (et le mien aussi)

Matthieu: Vois pas par contre où je pourrais aborder les travaux de Weidner, Miller et Meiklejohn [47, 46] qui combinent aussi CRDT et OT dans une certaine mesure. Pas vraiment de sens de comparer les approches à ce stade. Mais reste intéressant à présenter pour se différencier (eux proposent d'utiliser OT pour fusionner 2 CRDTs, moi pour ajouter une action qui est incompatible nativement avec les autres actions du CRDT)

1.5 Synthèse

Chapitre 2

Renommage dans une séquence répliquée

Sommaire

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.1 | Présentation de l'approche | 18 |
| 2.1.1 | Modèle du système | 18 |
| 2.1.2 | Définition de l'opération de renommage | 18 |
| 2.2 | RenamableLogootSplit | 20 |
| 2.2.1 | Opération de renommage proposée | 20 |
| 2.2.2 | Gestion des opérations concurrentes au renommage | 21 |
| 2.2.3 | Évolution du modèle de livraison des opérations | 24 |
| 2.3 | RenamableLogootSplit v2 | 24 |
| 2.3.1 | Conflits en cas de renommages concurrents | 24 |
| 2.3.2 | Relation de priorité entre renommages | 25 |
| 2.3.3 | Algorithme d'annulation de l'opération de renommage | 27 |
| 2.3.4 | Processus d'intégration d'une opération | 29 |
| 2.3.5 | Règles de récupération de la mémoire des états précédents | 29 |
| 2.4 | Validation | 32 |
| 2.4.1 | Preuve de correction de RENAMEID | 32 |
| 2.4.2 | Complexité temporelle | 32 |
| 2.4.3 | Expérimentations | 34 |
| 2.4.4 | Résultats | 35 |
| 2.5 | Discussion | 39 |
| 2.5.1 | Stockage des états précédents sur disque | 39 |
| 2.5.2 | Utilisation de l'opération de renommage comme snapshot | 39 |
| 2.5.3 | Compression et limitation de la taille de l'opération <i>rename</i> | 40 |
| 2.5.4 | Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements | 41 |
| 2.5.5 | Implémentation alternative à base d'operation-log | 41 |
| 2.5.6 | Report de la transition vers la nouvelle epoch principale | 43 |
| 2.6 | Comparaison avec les approches existantes | 43 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 2.7 Conclusion | 43 |
| 2.7.1 Récapitulatif | 43 |
| 2.7.2 Limites | 44 |
| 2.7.3 Perspectives | 44 |

2.1 Présentation de l'approche

Nous proposons un nouveau CRDT pour la *Sequence* appartenant à l'approche des identifiants densément ordonnés : *RenamableLogootSplit* [34, 35]. Cette structure de données permet aux pairs d'insérer et de supprimer des éléments au sein d'une séquence répliquée. Nous introduisons une opération *rename* qui 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 à l'opération *rename* de produire un nouvel état minimisant son surcoût en métadonnées.

2.1.1 Modèle du système

Le système est composé d'un ensemble dynamique de noeuds, les noeuds pouvant rejoindre puis quitter la collaboration tout au long de sa durée. Les noeuds collaborent afin de construire et maintenir une séquence à l'aide de *RenamableLogootSplit*. Chaque noeud possède une copie de la séquence et peut l'éditer sans se coordonner avec les autres. Les modifications des noeuds prennent la forme d'opérations qui sont appliquées immédiatement à leur copie locale. Les opérations sont ensuite transmises de manière asynchrone aux autres noeuds pour qu'ils puissent à leur tour appliquer les modifications à leur copie.

Les noeuds communiquent par l'intermédiaire d'un réseau Pair-à-Pair (P2P). Ce réseau est non-fiable : les messages peuvent être perdus, ré-ordonnés ou même livrés à plusieurs reprises. Le réseau peut aussi être sujet à des partitions, qui séparent alors les noeuds en des sous-groupes disjoints. Afin de compenser les limitations du réseau, les noeuds reposent sur une couche de livraison de messages.

Puisque *RenamableLogootSplit* est une extension de *LogootSplit*, il partage les mêmes contraintes sur la livraison de messages. La couche de livraison de messages sert donc à livrer les messages à l'application exactement une fois. La couche de livraison de messages a aussi pour tâche de garantir la livraison des opérations de suppression après les opérations d'insertion correspondantes. Aucune autre contrainte n'existe sur l'ordre de livraison des opérations. Finalement, la couche de livraison intègre aussi un mécanisme d'anti-entropie [38]. Ce mécanisme permet aux noeuds de se synchroniser par paires, en détectant et ré-échangeant les messages perdus.

2.1.2 Définition de l'opération de renommage

L'objectif de l'opération *rename* est de réassigner de nouveaux identifiants aux éléments de la séquence répliquée sans modifier son contenu. 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 [56].

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'est pas elle-même n'incarne pas une intention de l'utilisateur, elle ne doit pas entrer en conflit avec les actions 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 distinct.*

Propriété 3.2 (*Préservation de l'ordre*) *Les éléments de la séquence doivent être triés 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 délivrées dans des ordres différents à chaque noeud. Afin de garantir la convergence des répliquas, 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 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 intrinséquement 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 4.

Dans un souci de simplicité, la présentation de l'opération *rename* est divisée en deux parties. Dans la section 2.2, nous présentons l'opération *rename* proposée avec l'hypothèse qu'aucune opération *rename* concurrente ne peut être générée. Cette hypothèse nous

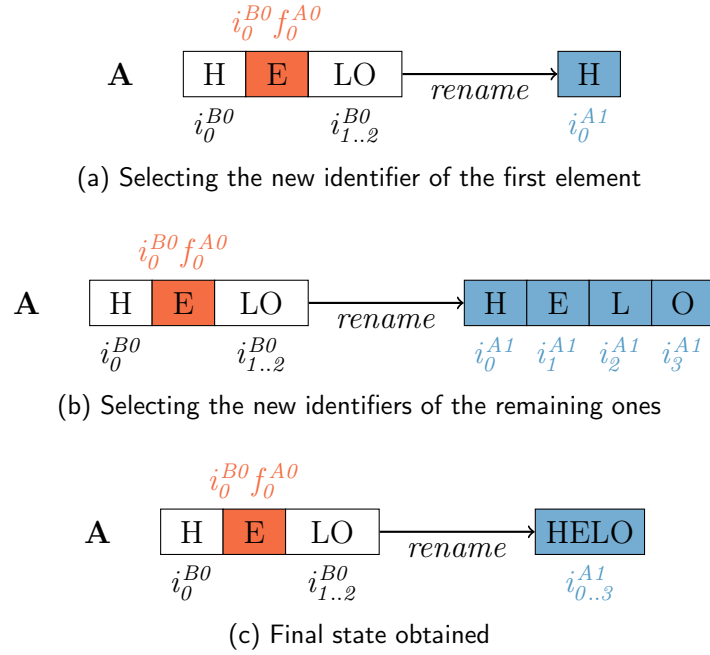


FIGURE 2.1 – Renaming the sequence on node A

permet de nous concentrer sur le fonctionnement de l'opération *rename* elle-même ainsi que sur comment gérer les opérations *insert* et *remove* concurrentes. Ensuite, dans la section 2.3, nous supprimons cette hypothèse. Nous présentons alors notre approche pour gérer les scénarios avec des opérations *rename* concurrentes.

2.2 RenamableLogootSplit

2.2.1 Opération de renommage proposée

Notre opération de renommage permet à RenamableLogootSplit de réduire le surcoût en métadonnées des séquences répliquées. Pour ce faire, elle réassigne des identifiants arbitraires aux éléments de la séquence.

Son comportement est illustré dans la Figure 2.1. 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^{B0}). 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 (1). De plus, son offset est mis à 0. Le noeud A réassigne l'identifiant résultant (i_0^{A1}) au premier élément de la séquence, comme décrit dans 2.1a. Ensuite, le noeud A dérive des identifiants contigus pour tous les éléments restants en incrémentant de manière successive l'offset (i_1^{A1} , i_2^{A1} , i_3^{A1}), comme présenté dans 2.1b. Comme nous assignons des identifiants consécutifs à tous les éléments de la séquence, nous pouvons au final agréger ces éléments en un seul bloc, comme illustré en 2.1c. 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 son *ancien état* aux autres.

Définition 10 (Ancien état) *Un ancien état est la liste des $idInterval$ qui composent l'état courant de la séquence répliquée au moment du renommage.*

De ce fait, nous définissons l'opération *rename* de la manière suivante :

Définition 11 (rename) *Une opération *rename* est un triplet $\langle nodeId, nodeSeq, formerState \rangle$ où*

- *nodeId* est l'identifiant du noeud qui a générée l'opération *rename*.
- *nodeSeq* est le numéro de séquence du noeud au moment de la génération de l'opération *rename*.
- *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 sous-section 2.2.2 comment les noeuds peuvent les renommer de manière déterministe.

2.2.2 Gestion des opérations concurrentes au renommage

Après avoir appliqué des opérations *rename* sur leur état local, les noeuds peuvent recevoir des opérations concurrentes. La Figure 2.2 illustre de tels cas.

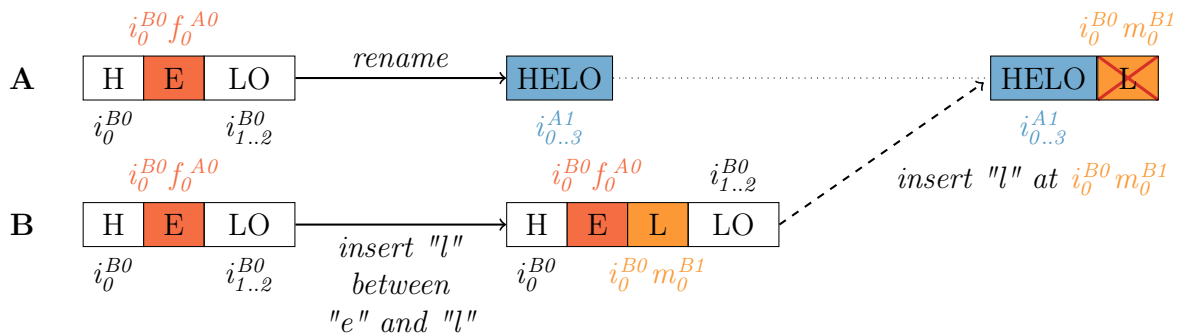


FIGURE 2.2 – Concurrent update leading to inconsistency

Dans cet exemple, le noeud B insère un nouvel élément "L", lui assigne l'identifiant $i_0^{B0} m_0^{B1}$ et diffuse cette modification, de manière concurrente à l'opération *rename* décrite dans la Figure 2.2. 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 $i_3^{A1} <_{id} i_0^{B0} m_0^{B1}$) au lieu d'à sa position prévue. Comme décrit 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 Figure 2.2 permet aux noeuds de faire progresser leur état de ε_0 à ε_{A1} . Nous définissons les époques de la manière suivante :

Définition 12 (Époque) Une époque est un triplet $\langle nodeId, nodeSeq, formerState \rangle$ où

- *nodeId* est l'identifiant du noeud qui a générée cette époque.
- *nodeSeq* est le numéro de séquence du noeud au moment de la génération de cette époque.
- *formerState* est l'ancien état du noeud 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*, une structure de données ordonnant les époques en fonction de leur relation *parent-enfant*. De plus, les noeuds marquent chaque opération avec l'identifiant de 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 Figure 2.3, 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*. L'idée principale de cet algorithme est de renommer les identifiants inconnus au moment de la génération de l'opération *rename* en utilisant leur prédécesseur. Un exemple est présenté dans la Figure 2.4. Cette figure décrit le même scénario que la Figure 2.2, à l'exception que le noeud A utilise `RENAMEID` pour renommer les identifiants générés de façon concurrente avant de les insérer dans son état.

L'algorithme procède de la manière suivante. Tout d'abord, le noeud récupère le prédécesseur de l'identifiant donné $i_0^{B0} m_0^{B1}$ dans l'ancien état : $i_0^{B0} f_0^{A0}$. Ensuite, il calcule l'équivalent de $i_0^{B0} f_0^{A0}$ dans l'état renommé : i_1^{A1} . Finalement, le noeud A concatène cet identifiant et l'identifiant donné pour générer l'identifiant correspondant l'époque *enfant* : $i_1^{A1} i_0^{B0} m_0^{B1}$. 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.

```

function RENAMEID(id, renamedIds, nId, nSeq)
  length ← renamedIds.length
  firstId ← renamedIds[0]
  lastId ← renamedIds[length - 1]
  pos ← position(firstId)

  if id < firstId then
    newFirstId ← new Id(pos, nId, nSeq, 0)
    return renIdLessThanFirstId(id, newFirstId)
  else if id ∈ renamedIds then
    index ← findIndex(id, renamedIds)
    return new Id(pos, nId, nSeq, index)
  else if lastId < id then
    newLastId ← new Id(pos, nId, nSeq, length - 1)
    return renIdGreaterThanLastId(id, newLastId)
  else
    return renIdFromPredId(id, renamedIds, pos, nId, nSeq)
  end if
end function

function RENIDFROMPREDID(id, renamedIds, pos, nId, nSeq)
  index ← findIndexOfPred(id, renamedIds)
  newPredId ← new Id(pos, nId, nSeq, index)

  return concat(newPredId, id)
end function

```

FIGURE 2.3 – Main functions to rename an identifier

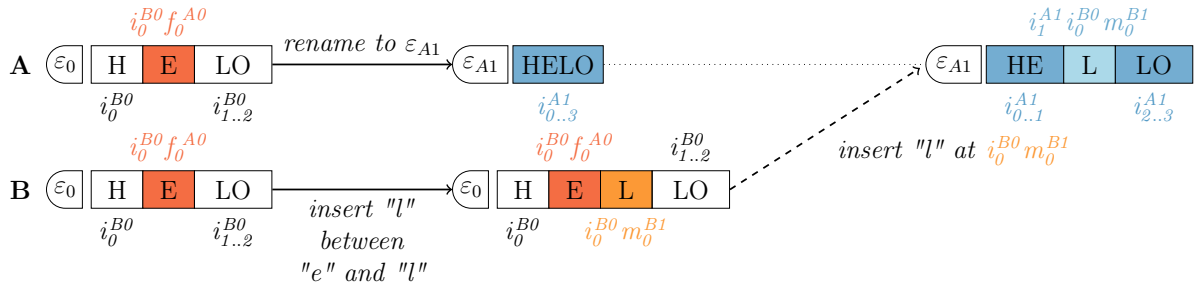


FIGURE 2.4 – Renaming concurrent update using RENAMEID before applying it to maintain intended order

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 2.4. 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.

Figure 2.3 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 ($firstId \leq id \leq lastId$). Les fonctions pour gérer les autres cas, c.-à-d. les cas où l'identifiant à

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 temporelle 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 regroupe les éléments en moins de blocs.

Finalement, considérons le cas où un noeud reçoit une opération marquée d'une époque encore inconnue. Il serait incohérent que le noeud l'intègre à leur état. En effet, comparer des identifiants d'une époque aux identifiants d'une autre époque n'a pas de sens et provoquerait des anomalies (cf. Figure 2.2). *Matthieu: TODO : Ajouter nouvel exemple où noeud reçoit déjà des opérations dépendant d'un rename avant de recevoir le rename* Les noeuds devraient plutôt attendre l'opération *rename* permettant de progresser jusqu'à cette époque pour intégrer cette opération. Il est donc nécessaire de faire évoluer le modèle de livraison des opérations pour ajouter la contrainte suivante : toute opération doit désormais être livrée après l'opération *rename* qui introduit son époque de génération. *Matthieu: QUESTION : Récapituler modèle de livraison ? (Epoch-based + causal remove)* *Matthieu: QUESTION : Indiquer que l'opération rename ne nécessite pas de livraison particulière autre que epoch-based ?*

2.3.1 Conflits en cas de renommages concurrents

A ε_0 $\begin{matrix} i_0^{B0} & f_0^{A0} \\ \text{H} & \text{E} & \text{LO} \\ i_0^{B0} & i_{1..2}^{B0} \end{matrix}$ $\xrightarrow{\text{rename to } \varepsilon_{A1}}$ ε_{A1} $\begin{matrix} i_0^{A1} \\ \text{HELO} \\ i_{0..3}^{B0} \end{matrix}$ $\xrightarrow{\text{insert "l" at } i_0^{B0} m_0^{B1}}$ ε_{A1} $\begin{matrix} i_1^{A1} & i_0^{B0} & m_0^{B1} \\ \text{HE} & \text{L} & \text{LO} \\ i_{0..1}^{A1} & i_{2..3}^{B0} \end{matrix}$

B ε_0 $\begin{matrix} i_0^{B0} & f_0^{A0} \\ \text{H} & \text{E} & \text{LO} \\ i_0^{B0} & i_{1..2}^{B0} \end{matrix}$ $\xrightarrow{\text{insert "l" between "e" and "l"}}$ ε_0 $\begin{matrix} i_0^{B0} & f_0^{A0} & i_{1..2}^{B0} \\ \text{H} & \text{E} & \text{L} & \text{LO} \\ i_0^{B0} & i_0^{B0} & m_0^{B1} \end{matrix}$ $\xrightarrow{\text{rename to } \varepsilon_{B2}}$ ε_{B2} $\begin{matrix} i_0^{B2} \\ \text{HELLO} \\ i_{0..4}^{B2} \end{matrix}$

24

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^{B0}), de l'identifiant du noeud (**B**) et de son numéro de séquence courant (2). Cette opération introduit aussi une nouvelle époque : ε_{B2} . Puisque l'opération *rename* de A n'a pas encore été délivrée au noeud B à ce moment, les deux opérations *rename* sont concurrentes.

Puisque des époques concurrentes sont générées, les époques forment désormais l'*arbre des époques*. Nous représentons dans la Figure 2.6 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.

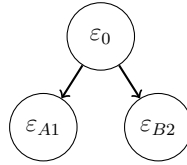


FIGURE 2.6 – The *epoch tree* corresponding to the scenario of Figure 2.5

À l'issue du scénario décrit dans la Figure 2.5, les noeuds A et B sont respectivement aux époques ε_{A1} et ε_{B2} . Pour converger, tous les noeuds devraient atteindre la même époque à terme. Cependant, la fonction *RENAMEID* décrite dans Figure 2.3 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 performances 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 sous-section 2.3.2.

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 annuler l'effet des opérations *rename* précédemment appliquées. Nous proposons un algorithme qui remplit cet objectif dans la sous-section 2.3.3.

2.3.2 Relation de priorité entre renommages

Pour que chaque noeud sélectionne la même époque cible de manière non-coordonnée, nous définissons la relation *priority*.

Définition 13 (Relation $\text{priority} <_\epsilon$) La relation $\text{priority} <_\epsilon$ est un ordre total strict 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 14 (Époque cible) 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 2.7 fournit un exemple.

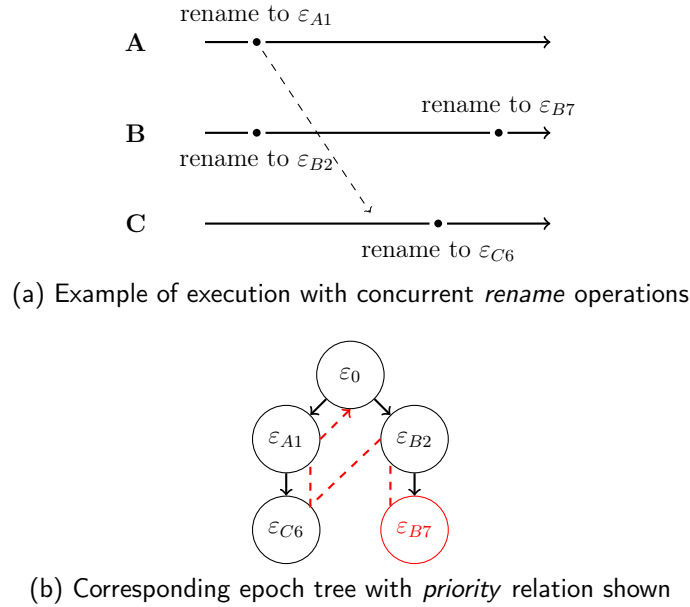


FIGURE 2.7 – Selecting target epoch from execution with concurrent *rename* operations

La 2.7a 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, seules ces opérations sont représentées dans cette figure. Initialement, le noeud A génère une opération *rename* qui introduit l'époque ϵ_{A1} . Cette opération est délivrée 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_{B2} et ϵ_{B7} .

Une fois que les noeuds se sont synchronisés, ils obtiennent l'arbre des époques représenté dans la 2.7b. Dans cette figure, la flèche pointillée 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

$\varepsilon_0 < \varepsilon_0\varepsilon_{A1} < \varepsilon_0\varepsilon_{A1}\varepsilon_{C6} < \varepsilon_0\varepsilon_{B2} < \varepsilon_0\varepsilon_{B2}\varepsilon_{B7}$. 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, *priority* pourrait reposer sur des métriques intégrées au sein des opérations *rename* pour représenter le travail accumulé sur le document. Cela permettrait de favoriser la branche de l'*arbre des époques* avec le plus de collaborateurs actifs pour minimiser la quantité globale de calculs effectués par les noeuds du système.

2.3.3 Algorithme d'annulation de l'opération de renommage

Nous présentons maintenant la fonction REVERTRENAMEID. Décrite dans Figure 2.8, cette fonction permet aux noeuds d'annuler une opération *rename* appliquée précédemment. Pour ce faire, REVERTRENAMEID associe les identifiants de l'époque *enfant* aux identifiants correspondant dans l'époque *parente*.

Les objectifs de REVERTRENAMEID sont les suivants : (i) Restaurer à leur ancienne valeur les identifiants générés causalement avant ou de manière concurrente à l'opération *rename* annulée (ii) Assigner de nouveaux identifiants respectant l'ordre souhaité aux éléments qui ont été insérés causalement après l'opération *rename* annulée. Nous illustrons son comportement à l'aide de la Figure 2.9.

Cette figure reprend le scénario de la Figure 2.2. Le noeud A reçoit l'opération *rename* du noeud B, qui est concurrente à l'opération *rename* que le noeud A a appliqué précédemment. Selon la relation *priority* proposée, le noeud A sélectionne l'époque introduite ε_{B2} comme l'époque cible ($\varepsilon_{A1} <_\varepsilon \varepsilon_{B2}$). Il procède donc à ramener son état à un état équivalent à l'époque ε_0 , le PPAC de son époque courante ε_{A1} et de l'époque cible ε_{B2} . Pour ce faire, il applique REVERTRENAMEID à chaque identifiant de son état courant.

REVERTRENAMEID détermine quelle stratégie appliquer pour restaurer un identifiant donné en utilisant des motifs. Par exemple, les identifiants de la forme $pos_{offset}^{nId\ nSeq} (i_{offset}^{A1})$ dans l'exemple courant) correspondent aux nouvelles valeurs des identifiants qui composent l'*ancien état*. Pour retrouver les identifiants d'origine, REVERTRENAMEID utilise simplement leur offset puisqu'il correspond à leur index dans l'*ancien état*. Par exemple, l'identifiant ayant pour offset 0 correspond au premier identifiant dans l'*ancien état* (i_0^{B0}), celui ayant pour offset 1 au second identifiant ($i_0^{B0}f_0^{A0}$), et ainsi de suite.

Les identifiants de la forme $pos_{offset}^{nId\ nSeq} tail$ (e.g. $i_1^{A1}i_0^{B0}m_0^{B1}$) correspondent à des identifiants qui ont été soit insérés de façon concurrente à l'opération *rename*, soit causalement après. Pour traiter ces identifiant, REVERTRENAMEID retire tout d'abord le premier tuple (i_1^{A1}) pour isoler la queue de l'identifiant ($i_0^{B0}m_0^{B1}$). En faisant cela, REVERTRENAMEID annule la transformation appliquée à l'identifiant par RENIDFROMPREDID si l'identifiant a été inséré de manière concurrente. L'algorithme compare ensuite la queue de l'identifiant aux identifiants de l'élément précédant et de l'élément suivant dans l'*ancien état*. Dans cet exemple, nous avons $i_0^{B0}f_0^{A0} <_{id} i_0^{B0}m_0^{B1} <_{id} i_1^{B0}$. L'algorithme peut alors retourner la queue comme identifiant résultant tout en préservant l'ordre souhaité, puisque sa valeur est comprise entre celles des identifiants du prédécesseur et du successeur.

Sinon, cela signifie que l'identifiant donné a été inséré de manière causale après l'opération *rename*. Puisqu'aucun identifiant correspondant n'existe encore à l'époque *parente*, REVERTRENAMEID peut retourner n'importe quel identifiant tant qu'il préserve l'ordre

```

function REVERTRENAMEID(id, renamedIds, nId, nSeq)
  length  $\leftarrow$  renamedIds.length
  firstId  $\leftarrow$  renamedIds[0]
  lastId  $\leftarrow$  renamedIds[length - 1]
  pos  $\leftarrow$  position(firstId)

  newFirstId  $\leftarrow$  new Id(pos, nId, nSeq, 0)
  newLastId  $\leftarrow$  new Id(pos, nId, nSeq, length - 1)

  if id < newFirstId then
    return revRenIdLessThanNewFirstId(id, firstId, newFirstId)
  else if isRenamedId(id, pos, nId, nSeq, length) then
    index  $\leftarrow$  getFirstOffset(id)
    return renamedIds[index]
  else if newLastId < id then
    return revRenIdGreaterThanNewLastId(id, lastId)
  else
    index  $\leftarrow$  getFirstOffset(id)
    return revRenIdfromPredId(id, renamedIds, index)
  end if
end function

function REVRENIDFROMPREDID(id, renamedIds, index)
  predId  $\leftarrow$  renamedIds[index]
  succId  $\leftarrow$  renamedIds[index + 1]
  tail  $\leftarrow$  getTail(id, 1)

  if tail < predId then
    return concat(predId, MIN_TUPLE, tail)
  else if succId < tail then
    offset  $\leftarrow$  getLastOffset(succId) - 1
    predOfSuccId  $\leftarrow$  createIdFromBase(succId, offset)
    return concat(predOfSuccId, MAX_TUPLE, tail)
  else
    return tail
  end if
end function

```

$\triangleright id$ has been inserted causally after the *rename* op

$\triangleright id$ has been inserted causally after the *rename* op

FIGURE 2.8 – Main functions to revert an identifier renaming

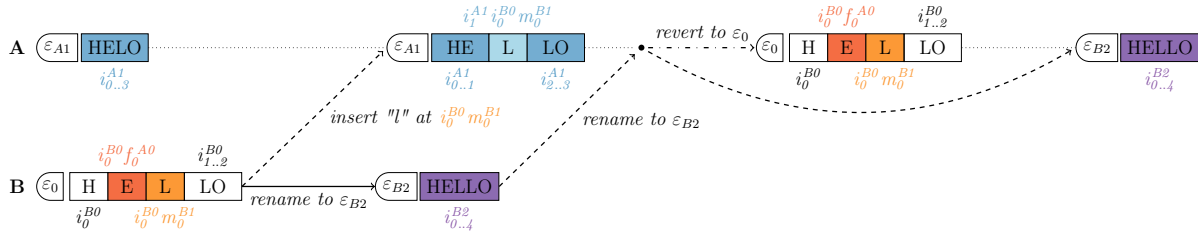


FIGURE 2.9 – Reverting a previously applied *rename* operation

souhaité. Pour ce faire, REVERTRENAMEID génère l'identifiant à partir de l'identifiant du prédécesseur ou du successeur, et en utilisant des tuples exclusifs au mécanisme de renommage : *MIN_TUPLE* et *MAX_TUPLE*.

Matthieu: TODO : Modifier exemple pour illustrer le cas de figure où on a besoin de MIN/MAX_TUPLE

Une fois que le noeud A a converti son état à un état équivalent à l'époque ε_0 en utilisant REVERTRENAMEID, il peut appliquer RENAMEID pour calculer l'état correspondant à ε_{B2} .

Comme pour Figure 2.3, Figure 2.8 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 B.

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.

2.3.4 Processus d'intégration d'une opération

2.3.5 Règles de récupération de la mémoire des états précédents

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 reposons sur la notion de *stabilité causale des opérations* [9]. Une opération est causalement stable une fois qu'elle a été délivrée à tous les noeuds. Dans le contexte de l'opération *rename*, cela implique que tous les noeuds ont progressé à l'époque introduite par cette opération ou à une époque plus grande d'après la relation *priority*. À partir de ce constat, nous définissons les *potentielles époques courantes* :

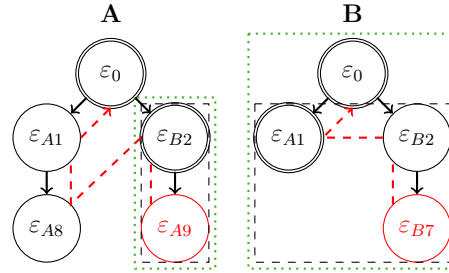
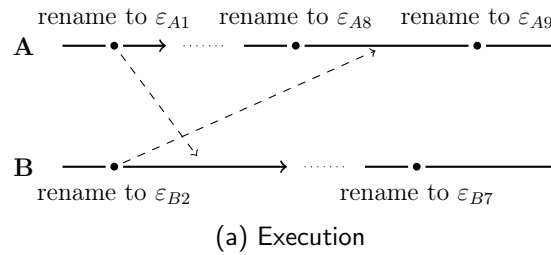
Définition 15 (Potentielles époques courantes) *L'ensemble des époques auxquelles les noeuds peuvent se trouver actuellement et à partir desquelles ils peuvent émettre des*

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 grande que cette dernière d'après la relation *priority*.

Pour traiter les 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 16 (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 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 2.10 illustre un cas d'utilisation du mécanisme de récupération de mémoire proposé.



(b) States of respective epoch trees with *potential current epochs* and *required epochs* displayed

FIGURE 2.10 – Garbage collecting epochs and corresponding *former states*

Dans la 2.10a, nous représentons une exécution au cours de laquelle deux noeuds A et B génèrent respectivement plusieurs opérations *rename*. Dans la 2.10b, nous représentons les *arbres des époques* respectifs de chaque noeud. 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 pointillé, tandis que l'ensemble des *époques requises* est représenté par un rectangle vert pointillé.

Matthieu: TODO : Trouver un autre terme que pointillé pour dotted

Le noeud A génère tout d'abord une opération *rename* vers ε_{A1} et ensuite une opération *rename* vers ε_{A8} . Il reçoit ensuite une opération *rename* du noeud B qui introduit ε_{B2} .

Puisque ε_{B2} est plus grand que son époque courante actuelle ($\varepsilon_{e0}\varepsilon_{A1}\varepsilon_{A8} < \varepsilon_{e0}\varepsilon_{B2}$), 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_{B2} . Il reçoit ensuite l'opération *rename* vers ε_{A1} du noeud A. Cependant, le noeud B conserve ε_{B2} comme époque courante (puisque $\varepsilon_{e0}\varepsilon_{A1} < \varepsilon_{e0}\varepsilon_{B2}$). Après, le noeud B génère une autre opération *rename* vers ε_{B7} .

À la livraison de l'opération *rename* introduisant l'époque ε_{B2} 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_{B2} 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_{B2} . Il génère ensuite l'ensemble des *époques requises* en ajoutant toutes les époques formant les chemins entre ε_{B2} et les *potentielles époques courantes*. Les époques ε_{B2} et ε_{A9} forment donc l'ensemble des *époques requises*. Le noeud A déduit que les époques ε_0 , ε_{A1} et ε_{A8} peuvent être supprimées de manière sûre.

À l'inverse, la livraison de l'opération *rename* vers ε_{A1} au noeud B ne lui permet pas de supprimer la moindre métadonnée. À partir de ses connaissances, le noeud B calcule que ε_{A1} , ε_{B2} 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.

Pour déterminer qu'une opération *rename* donnée est causalement stable, les noeuds doivent être conscients des autres et de leur avancement. Un protocole de gestion de groupe tel que [19, 18] est donc requis.

La stabilité causale peut prendre un certain temps à atteindre. En attendant, les noeuds peuvent en fait décharger les anciens états sur le disque dur puis qu'ils sont seulement nécessaires pour traiter les opérations concurrentes aux opérations *rename*. Nous approfondissons ce sujet dans la sous-section 2.5.1.

2.4 Validation

2.4.1 Preuve de correction de RENAMEID

2.4.2 Complexité temporelle

TABLE 2.1 – Complexité temporelle des différentes opérations

| Type d'opération | Complexité temporelle | |
|---------------------|-----------------------|---|
| | Locale | Distante |
| <i>insert</i> | $\log(b)$ | $h + k + l \cdot \log(m) + \log(b)$ |
| <i>remove</i> | $\log(b)$ | $h + k + l \cdot \log(m) + \log(b)$ |
| <i>naïve rename</i> | n | $h + n (k + l \cdot \log(m) + \log(b))$ |
| <i>rename</i> | n | $h + k \cdot n + l (n + m) + n + b$ |

b : nombre de blocs, n : nombre d'éléments, h : hauteur de l'*arbre des époques*, k : nombre de renommages à inverser, l : nombre de renommages à appliquer, m : nombre d'éléments de l'*ancien état* des renommages à appliquer

- Nous supposons que le nombre d'identifiants dans la séquence n croît au fur et à mesure
- La taille des identifiants est quant à elle réinitialisé périodiquement par l'opération *rename*
- Nous considérons que celle-ci devient négligeable par rapport au nombre d'identifiants.
- Nous ne prenons donc pas en compte la taille des identifiants dans nos complexités.
Matthieu: QUESTION : Ai-je le droit de faire ça ?
- RENAMEID a pour complexité $O(\log(m))$, où m est le nombre d'éléments de *renamedIds*, l'*ancien état*
 - Puisque que pire cas consiste à parcourir *renamedIds* à la recherche du prédécesseur de *id*
 - *renamedIds* étant une liste triée d'identifiants, une recherche binaire peut être effectuée
- REVERTRENAMEID a pour complexité $O(1)$
 - Ici, pas de recherche à effectuer
 - L'offset du 1er tuple de *id* permet de retrouver directement ses prédécesseur et successeur dans *renamedIds*
- Considérons que nous utilisons un AVL comme structure de données pour représenter la séquence
- La complexité d'une opération *insert* locale est en $O(\log(b))$ (cf. article LogootSplit), puisque cette action est inchangée par rapport à LogootSplit

-
- La complexité d'une opération *insert* distante, elle, évolue par rapport à LogootSplit
 - En effet, l'opération peut être issue d'une autre époque que l'époque courante du noeud
 - Pour l'intégrer, doit au préalable déterminer l'époque PPAC entre l'époque de l'opération et l'époque courante
 - Correspond à trouver l'intersection entre deux branches de l'arbre
 - S'agit d'un algorithme avec une complexité en $O(h)$, où h est la hauteur de l'arbre des époques
 - Ensuite, le noeud doit appliquer successivement k fois REVERTRENAMEID sur l'identifiant à insérer
 - Où k est le nombre d'époques formant la branche entre l'époque de l'opération et l'époque PPAC
 - Permet d'obtenir l'identifiant équivalent à l'époque PPAC
 - Le noeud applique ensuite l fois RENAMEID sur l'identifiant obtenu
 - Où l est le nombre d'époques formant la branche entre l'époque PPAC et l'époque courante
 - Permet d'obtenir l'identifiant équivalent à l'époque courante
 - Il ne reste plus qu'au noeud à insérer l'élément dans la séquence
 - Nous obtenons donc une complexité de $O(h + k + l \cdot \log(m) + \log(b))$ pour l'opération *insert* distante
 - De la même manière, nous obtenons des complexités similaires pour l'opération *remove*, en local et distant
 - Concernant l'opération *rename*
 - L'opération *rename* locale consiste à parcourir et à linéariser la structure actuelle pour ne garder que les idIntervals courant
 - Et à créer une nouvelle séquence équivalente à l'ancienne, composée seulement du nouveau bloc
 - Sa complexité est donc de $O(n)$
 - Pour l'opération *rename* distante, une implémentation naïve consiste à générer le nouvel état en renommant et insérant chaque identifiant de l'état courant d'une manière similaire à l'opération *insert* distante
 - On obtient dans ce cas une complexité de $O(h + n (k + l \cdot \log(m) + \log(b)))$
 - Mais peut améliorer
 - Plutôt que d'effectuer une recherche binaire sur *renamedIds* pour trouver le prédécesseur de *id*
 - Peut tirer parti du fait qu'on va parcourir séquentiellement l'état, qui est une liste triée d'identifiants
 - Et parcourir en parallèle, au fur et à mesure, *renamedIds* pour trouver le prédécesseur du *id* courant

- Permet de ramener la complexité du renommage des n identifiants de l'époque PPAC à l'époque courante à $O(l(n + m))$
- Plutôt que de générer une nouvelle séquence et d'y insérer un par un les n éléments
- Peut parcourir les n éléments pour reformer b blocs
- Peut ensuite construire l'AVL de manière récursive en parcourant les b blocs obtenus
- Peut donc obtenir une complexité de $O(h + k \cdot n + l(n + m) + n + b)$ pour l'intégration de l'opération *rename* distante

2.4.3 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*.

Par le biais de simulations, nous avons généré le jeu de données utilisé par nos benchmarks. Ces simulations reproduisent le scénario suivant.

Scénario d'expérimentation

Plusieurs auteurs rédigent de manière collaborative un article en temps réel. Dans un premier temps, les auteurs spécifie 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 arbitrairement définie comme critique, les collaborateurs passent à la seconde phase de la collaboration. Au cours de cette phase, les auteurs arrêtent d'ajouter du nouveau contenu mais se concentre à la place sur le remaniement du contenu existant. Ceci est simulé en équilibrant le ratio entre les opérations *insert* et *remove*. Chaque auteur doit émettre un nombre donné d'opérations *insert* et *remove*. La simulation prend fin une fois que tous les collaborateurs ont reçu toutes les opérations. Au cours de la simulation, nous prenons des instantanés de l'état des pairs à des points donnés pour suivre leur évolution.

Implémentation des simulations

Nous avons effectué nos simulations avec les paramètres expérimentaux suivants : nous avons déployé 10 bots 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 auteur. Les bots partagent et éditent de façon collaborative le document en utilisant soit LogootSplit soit RenamableLogootSplit en fonction de la session. Dans chaque cas, chaque bot génère localement une opération *insert* ou *remove* toutes les 200 ± 50 ms et la diffuse immédiatement aux autres noeuds via un réseau P2P maillé. Au cours de la première phase, la probabilité d'émettre une opération *insert* (resp. *remove*) est de 80% (resp. 20%). Une fois que le document atteint 60k caractères (environ 15 pages), les bots passent à la seconde phase et mettent chaque probabilité à 50%. Après chaque opération locale, le bot peut déplacer son curseur à une autre position aléatoire dans le document avec une probabilité

de 5%. Chaque bot génère 15k opérations *insert* ou *remove* et s'arrête une fois qu'il a observé 150k opérations. Des instantanés de l'état du bot sont pris de façon périodique, toutes les 10k opérations observées.

De plus, dans le cas de `RenamableLogootSplit`, 1 à 4 bots sont désignés de façon arbitraire comme des *renaming bots* en fonction de la session. Les *renaming bots* génèrent des opérations *rename* toutes les 30k opérations qu'ils observent. Ces opérations *rename* sont générées de façon 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-bot-random/>.

2.4.4 Résultats

En utilisant les instantanés générés, nous avons effectué plusieurs benchmarks. Ces benchmarks évaluent les performances de `RenamableLogootSplit` et les compare à celles de `LogootSplit`. 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 convergaient sans aucune autre forme de communication que les opérations, satisfaisant donc le modèle de la SEC.

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 2.11.

Pour chaque graphique dans la Figure 2.11, nous représentons 4 données différentes. La ligne pointillée 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 en pointillés représente la taille du document `RenamableLogootSplit` dans son meilleur cas. Dans ce scénario, les noeuds considèrent que les opérations *rename* sont supprimables 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 et qu'elles ne peuvent donc jamais être supprimées.

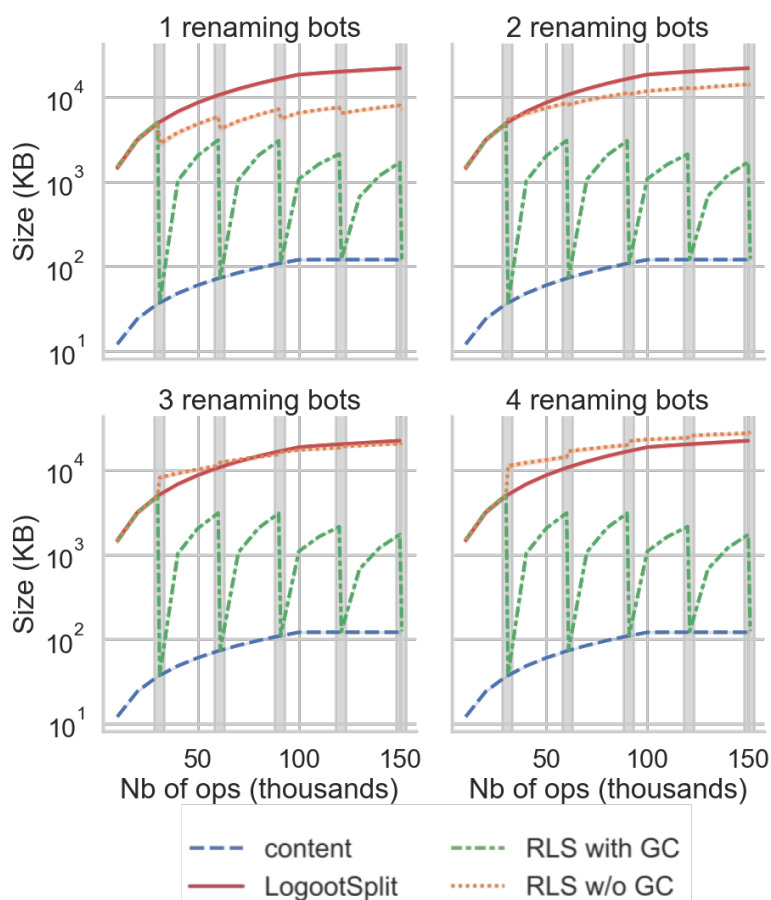


FIGURE 2.11 – Evolution of the size of the document

Les noeuds doivent alors conserver de façon permanente les métadonnées introduites par le mécanisme de renommage. Les performances de *RenamableLogootSplit* diminuent donc à mesure que le nombre de *renaming bots* et d'opérations *rename* générées augmente. Néanmoins, nous observons que *RenamableLogootSplit* peut surpasser les performances de *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.

Pour récapituler les résultats présentés, le mécanisme de renommage introduit un surcoût temporaire en métadonnées qui augmente avec chaque opération *rename*. Mais le surcoût se résorbe à terme une fois que le système devient quiescent et que les opérations *rename* deviennent causalement stables. Dans la section sous-section 2.5.1, nous détaillerons l'idée que les *anciens états* peuvent être déchargés sur le disque en attendant que la stabilité causale soit atteinte pour atténuer le surcoût temporaire en métadonnées.

Temps d'intégration des opérations standards

Nous avons ensuite comparé l'évolution du temps d'intégration des opérations standards, c.-à-d. les opérations *insert* et *remove*, sur des documents *LogootSplit* et *Renama-*

bleLogootSplit. Puisque les deux types d'opérations partagent la même complexité temporelle, nous avons seulement utilisé des opérations *insert* dans nos benchmarks. Nous faisons par contre la différence entre les mises à jours *locales* et *distantes*. Conceptuellement, les modifications locales peuvent être décomposées comme présenté dans [7] en les deux étapes suivantes : (i) la génération de l'opération correspondante (ii) l'application de l'opération correspondante sur l'état local. Cependant, pour des raisons de performances, nous avons fusionné ces deux étapes dans notre implémentation. Nous distinguons donc les résultats des modifications *locales* et des modifications *distantes* dans nos benchmarks. La Figure 2.12 présente les résultats obtenus.

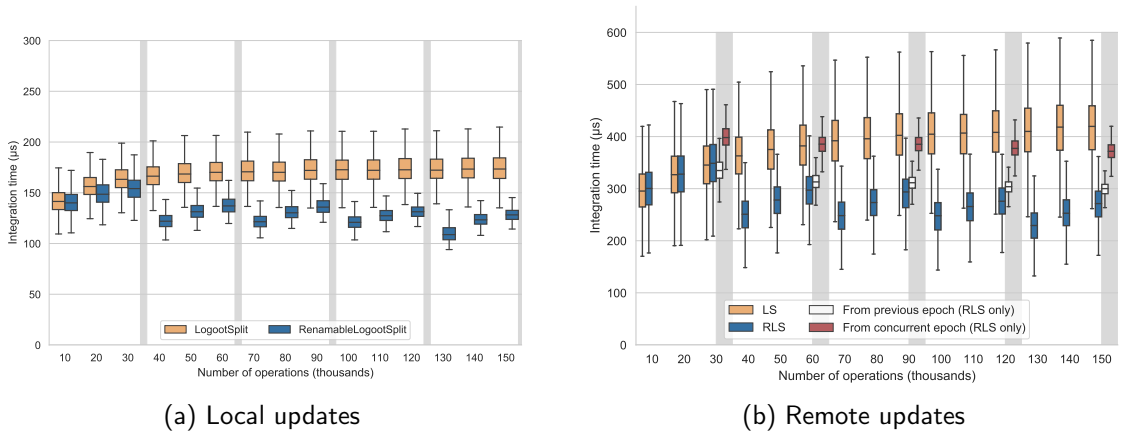


FIGURE 2.12 – Integration time of standard operations

Dans ces figures, les boxplots orange correspondent aux temps d'intégration sur des documents LogootSplit, les boxplots bleu sur des documents RenamableLogootSplit. Bien que les deux mesures soient initialement équivalentes, 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.

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 blanche et rouge dans la 2.12b.

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 un surcoût additionnel 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 obtient de meilleures performances que LogootSplit tant que la distance entre l'époque de génération de l'opération et l'époque courante du noeud reste limité. Au fur et à mesure que la distance entre les deux époques augmente, les performances de RenamableLogootSplit diminuent, jusqu'à atteindre des performances moins bonnes que celles de LogootSplit, puisque le surcoût est multiplié. Néanmoins, le mécanisme de renommage réduit le temps d'intégration de la majorité des opérations, c.-à-d. les opérations générées entre deux séries d'opérations *rename*.

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 depuis l'opération *rename* précédente. Comme précédemment, nous distinguons les performances des modifications *locales* et *distantes*. Le cas des opérations *rename distantes* se sous-divise en trois catégories. Les opérations *distantes directes* désignent les opérations *rename distantes* qui introduisent une nouvelle époque *enfant* de l'époque courante du noeud. Les opérations *concurrentes introduisant une plus grande* (resp. *petite*) *époque* désigne les opérations *rename* qui introduisent une époque *soeur* de l'époque courante du noeud. D'après la relation *priority*, l'époque introduite est plus grande (resp. petite) que l'époque courante du noeud. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2.2.

TABLE 2.2 – Integration time of rename operations

| Parameters | | Integration Time (ms) | | | |
|------------------------|------------|-----------------------|---------|-------------------------|-------|
| Type | Nb Ops (k) | Mean | Median | 99 th Quant. | Std |
| Local | 30 | 41.75 | 38.74 | 71.68 | 6.84 |
| | 60 | 78.32 | 78.16 | 81.42 | 1.24 |
| | 90 | 119.19 | 118.87 | 124.22 | 2.49 |
| | 120 | 143.75 | 143.57 | 148.59 | 2.16 |
| | 150 | 158.04 | 157.95 | 164.38 | 2.49 |
| Direct remote | 30 | 481.32 | 477.13 | 537.30 | 17.11 |
| | 60 | 981.62 | 978.24 | 1072.83 | 31.54 |
| | 90 | 1491.28 | 1481.83 | 1657.58 | 51.10 |
| | 120 | 1670.00 | 1663.85 | 1814.38 | 50.29 |
| | 150 | 1694.17 | 1675.95 | 1852.55 | 59.94 |
| Cc. int. greater epoch | 30 | 643.53 | 643.57 | 682.80 | 13.42 |
| | 60 | 1317.66 | 1316.39 | 1399.55 | 28.67 |
| | 90 | 1998.23 | 1994.08 | 2111.98 | 45.37 |
| | 120 | 2239.71 | 2233.22 | 2368.45 | 50.06 |
| | 150 | 2241.92 | 2233.61 | 2351.02 | 52.20 |
| Cc. int. lesser epoch | 30 | 1.36 | 1.30 | 3.53 | 0.37 |
| | 60 | 2.82 | 2.69 | 4.85 | 0.45 |
| | 90 | 4.45 | 4.23 | 5.81 | 0.71 |
| | 120 | 5.33 | 5.10 | 8.78 | 0.90 |
| | 150 | 5.53 | 5.26 | 8.70 | 0.79 |

Le principal résultat de ces mesures est que les opérations *rename* sont généralement coûteuses quand comparées aux autres types d'opérations, puisque les noeuds doivent parcourir et renommer leur état courant complet. Les opérations *rename* locales s'intègrent en plusieurs centaines de millisecondes tandis que les opérations *distantes directes* et *concurrentes introduisant une plus grande époque* peuvent prendre des secondes si retardées trop longtemps. Il est donc nécessaire de prendre en compte ce résultat pour concevoir des stratégies de génération des opérations *rename* pour éviter d'impacter négativement l'expérience utilisateur.

Un autre résultat intéressant de ces benchmarks est que les opérations *concurrentes introduisant une plus petite époque* sont rapides à intégrer. Puisque ces opérations introduisent une époque qui n'est pas sélectionné comme nouvelle époque cible, les noeuds ne procède pas au renommage de leur état. L'intégration des opérations *concurrentes introduisant une plus petite époque* 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.

2.5 Discussion

2.5.1 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*...

2.5.2 Utilisation de l'opération de renommage comme snapshot

- L'opération de renommage embarque la somme de toutes les opérations passées sous la forme du *former state*
- On peut à tout moment re-calculer l'état courant du document à partir de l'opération de renommage primaire, des opérations concurrentes à cette dernière et des

opérations générées depuis

- Peut utiliser ce principe pour le mécanisme de synchronisation
- Lorsqu'un nouveau pair rejoint la collaboration, le noeud avec lequel il se synchronise peut lui fournir uniquement ce sous-ensemble des opérations
- De la même manière, on pourrait généraliser l'utilisation de cette méthode de synchronisation
- À la réception d'une demande de synchronisation d'un pair présentant un important retard, le noeud peut choisir d'employer cette méthode
 - Plutôt que de lui envoyer et de lui faire rejouer l'ensemble des opérations
- La question étant de comment procéder pour quantifier ce retard et pour définir le seuil à partir duquel ce retard est considéré comme important
- Cette méthode de synchronisation pose néanmoins le problème suivant
- Le pair synchronisé de cette manière ne possède qu'une partie du log des opérations
- S'il reçoit ensuite une demande de synchronisation d'un autre pair, il est possible qu'il ne puisse y répondre
 - Cas où il manque à l'autre pair juste une opération d'avant le renommage (possible si les dépendances causales ne sont pas requises pour intégrer l'opération de renommage)
- Dans ce cas, ne peut pas fournir la seule opération manquante au pair qui la demande
 - *Matthieu: NOTE : Mais dans ce cas, le pair peut tout à fait générer un état courant à jour à partir des infos qu'il possède puisque l'opération qui lui manque est intégrée dans l'opé de renommage*
- *Matthieu: TODO : Étudier si y a un intérêt à privilégier la synchronisation basée sur l'intégration successive de toutes les opérations quand on a cette méthode de synchronisation par snapshot/checkpoint de possible*

2.5.3 Compression et limitation de la taille de l'opération *rename*

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 blocs. En effet, un identifiant peut être caractérisé de manière unique par le triplet composé de l'*identifiant de noeud*, du *numéro séquentiel* et de l'*offset* de son dernier tuple. Par conséquent, un bloc peut être identifié de manière unique à partir du triplet signature de son identifiant de début et de sa longueur. Cette méthode nous permet de réduire les données à diffuser dans le cadre de l'opération *rename* à un montant fixe par bloc.

Pour décompresser l'opération reçue, les noeuds parcourent leur état courant ainsi que leur log des opérations *remove* concurrentes. De cette manière, ils peuvent retrouver les identifiants complets et reconstruire l'opération *rename* originale. *Matthieu: TODO : Développer ce paragraphe : noeuds doivent retrouver les blocs renommés à partir des données reçues. Pour cela, parcourent leur état. Suffit de retrouver un identifiant avec le*

même couple $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$ pour reformer un bloc. Certains couples $\langle nodeId, nodeSeq \rangle$ peuvent avoir été supprimés en concurrence et ne plus être présent dans la séquence. Donc besoin d’aussi parcourir le log des opérations *remove concurrentes*.

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 de blocs, bornant ainsi la taille du message à diffuser.

2.5.4 Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements

Bien que la relation *priority* proposée dans la sous-section 2.3.2 est simple et garantit que tous les noeuds désignent la même époque comme époque cible, elle introduit un surcoût computationnel significatif dans certains cas. Notamment, cette relation *priority* autorise le cas où un simple noeud, déconnecté de la collaboration depuis longtemps, force l’ensemble des autres noeuds à annuler les opérations *rename* qu’ils ont effectué pendant ce temps car sa propre opération *rename* introduit la nouvelle époque cible. *Matthieu: TODO : ajouter figure d’un epoch tree où une longue branche se fait remplacer par une époque isolée*

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 log des opérations.

2.5.5 Implémentation alternative à base d’operation-log

- Implémentation du mécanisme de renommage décrite et évaluée dans ce manuscrit consiste à appliquer les fonctions de transformations `RENAMEID` et `REVERTRENAMEID` à l’ensemble des identifiants composant l’état lors de l’intégration d’une opération *rename*
- Une implémentation alternative se basant sur log des opérations peut être proposée
- Consiste à partir de l’état produit par l’opération *rename*
- Puis à transformer et à intégrer l’ensemble des opérations concurrentes connues par le noeud sur cet état

- Approche présente plusieurs avantages par rapport à l'implémentation actuelle
 - Réduit le nombre de transformations calculées : ne transforme plus chaque élément (ou blocs si dispose de `RENAMEBLOCK`) mais seulement chaque d'opération concurrente. En fonction de la fréquence de déclenchement de l'opération *rename*, ce nombre peut être plus petit de plusieurs ordres de grandeur. Plus la distance entre l'époque courante et l'époque cible est grande, plus cette réduction est significative.
 - Récupère et réutilise les identifiants originaux depuis les opérations. Permet d'éviter la situation où un noeud applique `REVERTRENAMEID` puis `RENAMEID` à un identifiant donné. Retire donc la contrainte de proposer un couple de fonctions réciproques `RENAMEID` et `REVERTRENAMEID` ou d'avoir une relation *priority* qui prémunit des aller-retours dans l'*arbre des époques* pour garantir la correction du système. Offre donc une plus grande flexibilité pour améliorer ces autres points du mécanisme de renommage.
- Mais dispose aussi de quelques limites
 - Besoin de maintenir le log des opérations. Ce défaut est néanmoins à relativiser. Les noeuds ont déjà besoin de maintenir le log des opérations de façon à se synchroniser avec les autres noeuds, que ça soit pour pallier à une perte d'un message ou pour permettre à un noeud qui rejoint la collaboration de se mettre à jour.
 - Besoin de parcourir le log des opérations à la recherche d'opérations concurrentes. Là aussi, ce défaut est à relativiser. Afin de supprimer les métadonnées du mécanisme de renommage, les noeuds traquent déjà les informations de progression des autres noeuds. Ces informations permettent de déterminer la stabilité causale des opérations et peuvent être utilisées pour tronquer au fur et à mesure le log et ainsi limiter sa taille. Le parcours du log peut aussi être facilement parallélisé. *Matthieu: Est-ce que log peut être plus petit qu'état courant ? Oui, si noeuds tous connectés et que système se stabilise. Est-ce probable ? Pas convaincu.*
 - Besoin d'ajouter les informations de causalité pour permettre de détecter les opérations concurrentes. Pour cela, il suffit d'inclure un vecteur de version dans l'opération *rename*. Ainsi, puisque le log ne peut contenir que des opérations précédant l'opération *rename* ou concurrente à cette dernière (d'après la livraison basée sur les époques), il s'ensuit que toute opération présente dans le log et n'étant pas couverte par le vecteur de version est une opération concurrente à l'opération *rename*. Cependant, la taille des vecteurs de version croît de façon monotone avec le nombre de noeuds qui participent à la collaboration. Diffuser cette structure de données à l'ensemble des noeuds peut donc avoir un coût significatif dans les collaborations à large échelle. Néanmoins, il faut rappeler que les noeuds échangent déjà régulièrement des vecteurs de version dans le cadre du fonctionnement du mécanisme d'anti-entropie. Les opérations *rename* étant rares en comparaison, ce surcoût nous paraît acceptable.

2.5.6 Report de la transition vers la nouvelle epoch principale

Comme illustré par Tableau 2.2, 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.

Matthieu: TODO : Ajouter figure où noeud reçoit successivement plusieurs opérations rename concurrentes et procède au renommage de son état à chaque fois

En cas d'un grand nombre d'opérations *rename* concurrentes, nous proposons que les noeuds délaient 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 n'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 2.12b) comparé au coût de renommer, de manière inutile, complètement l'état (plusieurs centaines de millisecondes à des secondes complètes d'après Tableau 2.2).

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.

2.6 Comparaison avec les approches existantes

2.7 Conclusion

2.7.1 Récapitulatif

- Propose un mécanisme de renommage optimiste adapté à LogootSplit
- Réduit ponctuellement taille des métadonnées grâce à une nouvelle opération, l'opération *rename*
- Réduit métadonnées à un montant fixe à terme (1 seul bloc)

- Ajoute un surcoût computationnel pour les opérations concurrentes aux opérations *rename*
- Mais surcoût compensé par l’optimisation de la structure de données utilisée en interne pour représenter la séquence (réduit taille de l’arbre)
- Et permet de réduire le temps d’intégration des opérations dans le cas général

2.7.2 Limites

- Une limite est la nécessité de stabilité causale pour pouvoir supprimer de manière définitive les métadonnées liées au mécanisme de renommage
- Mais s’agit d’une limite commune avec les autres mécanismes de réduction des méta-données, à l’exception de LSEQ (GC des tombstones dans RGA, catchup protocole de core et nebula (à re-vérifier, mais je vois pas comment ils feraient autrement))
- Cette limite pose problème dans les systèmes dynamiques puisque nous possédons aucune garantie qu’un noeud va se reconnecter un jour
- S’agit d’un problème encore non-résolu
- Peut mettre en place un mécanisme pour évincer les noeuds inactifs depuis trop longtemps
- Mais mène dans ce cas à des forks
- Une second limite est le surcoût produit par les opérations *rename* concurrentes, aussi bien en termes de métadonnées que de calculs
- Peut être adressée en mettant en place une architecture à la core et nebula dans les systèmes qui le permettent
- Sinon peut mettre en place des stratégies pour limiter le risque de d’opérations *rename* concurrentes (coordination simple au sein de sous-groupe), mais n’offrent aucune garantie forte sur le nombre d’opérations concurrentes possibles

2.7.3 Perspectives

- Définir stratégie pour déclenchement de l’opération *rename*
- Proposer nouvelles relations $priority <_{\epsilon}$
- Utiliser combinaison de CRDT et OT pour concevoir structures de données répliquées complexes (move dans Sequence, DFS...)

Chapitre 3

MUTE, un éditeur web collaboratif P2P temps réel

Sommaire

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.1 | Présentation | 46 |
| 3.1.1 | Objectifs | 46 |
| 3.1.2 | Architecture | 46 |
| 3.2 | Couche interface | 46 |
| 3.3 | Couche réplication | 47 |
| 3.3.1 | Document texte | 47 |
| 3.3.2 | Métadonnées | 47 |
| 3.3.3 | Collaborateurs | 47 |
| 3.3.4 | Curseurs | 48 |
| 3.4 | Couche sécurité | 48 |
| 3.4.1 | Authenticité des clés publiques des participants | 48 |
| 3.4.2 | Établissement de la clé de chiffrement de groupe | 48 |
| 3.5 | Couche réseau | 48 |
| 3.5.1 | Netflux | 48 |
| 3.5.2 | Pulsar | 48 |
| 3.6 | Pistes d'amélioration et de recherche | 49 |
| 3.6.1 | Composition de CRDTs | 49 |
| 3.6.2 | CRDT pour les styles | 49 |
| 3.6.3 | Réseaux | 49 |
| 3.6.4 | Évolution de schéma | 49 |
| 3.6.5 | Droits d'accès | 49 |
| 3.6.6 | Historique du document | 50 |
| 3.6.7 | Rôles et places des bots dans systèmes collaboratifs | 50 |

3.1 Présentation

- Plateforme d'expérimentation et de démonstration de l'équipe

3.1.1 Objectifs

- Éditeur collaboratif
- Permettre collaboration synchrone (temps réel) et asynchrone (mode offline)
- À grande échelle
- Respecter privacy, limiter au maximum la confiance qu'on demande aux utilisateurs d'avoir dans l'outil
- Facile d'accès
- Facilement déployable par des tiers
- S'inscrit dans la mouvance Local-First Software [26, 23]

3.1.2 Architecture

- Pour répondre à ces besoins, a effectué les choix suivants
- Application web
- Utilise CRDT pour représenter le document partagé
- Nous permet de supporter les différents modes de collaboration
- Nous permet aussi d'adopter une architecture P2P garantissant la privacy et le passage à l'échelle
- Mais présence de plusieurs serveurs, aux responsabilités limitées, pour simplifier la collaboration (signaling server, pulsar, bots(?))
- *Matthieu: TODO : Insérer schéma de l'architecture d'une collaboration (noeuds, types de noeuds et lien)*
- L'architecture d'un pair se décompose en plusieurs couches
- *Matthieu: TODO : Insérer schéma de l'architecture logicielle d'un pair*

3.2 Couche interface

- Éditeur Markdown
- Permet d'incorporer le style des éléments directement dans la séquence représentant le document texte
- Mécanisme de conscience de groupe
 - Liste des collaborateurs
 - Curseurs et sélections des autres collaborateurs
 - Indicateur de connexion
- Stocke au sein du navigateur les données du document (état du document, log des opérations...)
- Glue le reste des couches ensemble

3.3 Couche réplication

3.3.1 Document texte

- Implémentation de RenamableLogootSplit que nous avons réutilisé dans le cadre de nos simulations et évaluations
- Associée au composant gérant la livraison des opérations
- *Matthieu: TODO : Expliquer comment assure la livraison Causal Remove*
- *Matthieu: TODO : Expliquer comment assure la livraison Epoch-based*
- Mécanisme d'anti-entropie [38]

3.3.2 Métadonnées

- Titre (Simple LWW-Register)
- Mode de chiffrement (fixe)

3.3.3 Collaborateurs

- Implémente Swim [19]
- Découple protocole de détection des failures du protocole de diffusion de l'évolution du groupe
- Protocole de détection des failures
 - Basé sur un système de rounds, basés sur un interval de temps
 - À chaque round, chaque pair probe de manière aléatoire un autre pair
 - Si pas de réponse, demande à un autre pair de le contacter
 - Si pas de réponse par leur intermédiaire, pair devient suspect
 - Si toujours pas de nouvelles du pair après un certain temps, le considère déconnecté
- Protocole de diffusion de l'évolution du groupe
 - Plutôt que de diffuser chaque évolution du groupe, adopte un modèle de diffusion épidémique
 - Piggyback les évolutions aux messages du protocole de détection des failures
- Modifie le fonctionnement du protocole pour en faire un CRDT
- Afin de permettre un nouveau pair de récupérer instantanément état courant du groupe
- Autorise aussi un pair à se déconnecter puis reconnecter en modifiant l'ordre de priorité entre les différents messages
 - Dans protocole original, un pair déconnecté doit revenir sous une nouvelle identité
 - Afin de maintenir l'identifiant du pair, notamment pour ses opérations sur le document

3.3.4 Curseurs

- Repose sur des identifiants pour indiquer la position des curseurs
- Vecteur de LWW-Registers, chaque LWW-Register étant associé à un pair actuellement connecté *Matthieu: NOTE : C'est vrai ça ? J'ai un doute sur le fait qu'on avait mis en place un CRDT pour cette structure. À vérifier.*

3.4 Couche sécurité

3.4.1 Authenticité des clés publiques des participants

- Trusternity [30, 31]

3.4.2 Établissement de la clé de chiffrement de groupe

- n-party Diffie-Hellman [15]

3.5 Couche réseau

3.5.1 Netflux

- Réseau P2P
- Interface uniforme permettant d'interagir à la fois avec des navigateurs et des bots
- Connectent les noeuds en utilisant la technologie WebRTC
- Connectent les bots en utilisant la technologie WebSocket
- Repose sur l'utilisation d'un signaling server pour permettre aux pairs de rejoindre la collaboration
- Topologie maillée

3.5.2 Pulsar

- Log-based message broker
- Propose plusieurs modes de fonctionnement
- En mode log-based message broker, maintient l'ensemble des messages reçus dans un log
- Permet, lorsque utilisé pour diffuser les opérations, de conserver le log complet des opérations
- Permet alors à un nouveau noeud de récupérer l'ensemble des opérations connues et de reconstruire l'état courant du document, même si actuellement aucun autre pair n'est connecté
- En mode message broker, diffuse seulement les messages aux noeuds actuellement connectés au topic

- Permet de communiquer les messages transients (protocole d'établissement de la clé de groupe, heartbeat de Swim, mécanisme d'anti-entropie du document) sans polluer le log
- Pose néanmoins des questions de sécurité et d'utilisabilité
- Besoin de chiffrer E2E les opérations
- Dans ce cas
 - comment un nouveau pair peut obtenir la clé de chiffrement si les autres pairs ne sont pas connectés ? (à moins de revenir à un chiffrement à base de passphrase, avec les problèmes qui en découlent)
 - comment un nouveau pair peut relire les opérations chiffrées avec l'ancienne clé ?

3.6 Pistes d'amélioration et de recherche

3.6.1 Composition de CRDTs

—

3.6.2 CRDT pour les styles

- Permettrait de se découpler de Markdown pour gérer le style du document
- Permettrait de supporter un plus grand nombre d'options que Markdown ne le permet actuellement (couleurs, mise en page...)

3.6.3 Réseaux

- Bibliothèques alternatives (libP2P, hypercore)
- Topologies alternatives (SPRAY)

3.6.4 Évolution de schéma

- Cambria [27]

3.6.5 Droits d'accès

- Access Control Conflict Resolution in Distributed File Systems [52]
- Travaux de PA

3.6.6 Historique du document

3.6.7 Rôles et places des bots dans systèmes collaboratifs

- Stockage du document pour améliorer sa disponibilité
- Overleaf en P2P ?
- Comment réinsérer des bots dans la collaboration sans en faire des éléments centraux, sans créer des failles de confidentialité, et tout en rendant ces fonctionnalités accessibles ?

Chapitre 4

Conclusions et perspectives

Sommaire

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1 | Résumé des contributions | 51 |
| 4.2 | Perspectives | 51 |
| 4.2.1 | Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements | 51 |
| 4.2.2 | Redéfinition de la sémantique du renommage en déplacement d'éléments | 51 |
| 4.2.3 | Définition de types de données répliquées sans conflits plus complexes | 51 |

4.1 Résumé des contributions

4.2 Perspectives

4.2.1 Définition de relations de priorité pour minimiser les traitements

4.2.2 Redéfinition de la sémantique du renommage en déplacement d'éléments

4.2.3 Définition de types de données répliquées sans conflits plus complexes

Annexe A

Algorithmes RENAMEID

```
function RENIDLESTHANFIRSTID(id, newFirstId)
  if id < newFirstId then
    return id
  else
    pos ← position(newFirstId)
    nId ← nodeId(newFirstId)
    nSeq ← nodeSeq(newFirstId)
    predNewFirstId ← new Id(pos, nId, nSeq, -1)

    return concat(predNewFirstId, id)
  end if
end function

function RENIDGREATERTHANLASTID(id, newLastId)
  if id < newLastId then
    return concat(newLastId, id)
  else
    return id
  end if
end function
```

FIGURE A.1 – Remaining functions to rename an identifier

Annexe B

Algorithmes REVERTRENAMEID

```

function REVRENIDLESTHANNEWFIRSTID(id, firstId, newFirstId)
  predNewFirstId ← createIdFromBase(newFirstId, -1)
  if isPrefix(predNewFirstId, id) then
    tail ← getTail(id, 1)
    if tail < firstId then
      return tail
    else
      ▷ id has been inserted causally after the rename op
      offset ← getLastOffset(firstId)
      predFirstId ← createIdFromBase(firstId, offset)
      return concat(predFirstId, MAX_TUPLE, tail)
    end if
  else
    return id
  end if
end function

function REVRENIDGREATERTHANNEWLASTID(id, lastId)
  if id < lastId then
    ▷ id has been inserted causally after the rename op
    return concat(lastId, MIN_TUPLE, id)
  else if isPrefix(newLastId, id) then
    tail ← getTail(id, 1)
    if tail < lastId then
      ▷ id has been inserted causally after the rename op
      return concat(lastId, MIN_TUPLE, tail)
    else if tail < newLastId then
      return tail
    else
      ▷ id has been inserted causally after the rename op
      return id
    end if
  else
    return id
  end if
end function

```

FIGURE B.1 – Remaining functions to revert an identifier renaming

Index

Voici un index

FiXme :

Notes :

- 10 : Matthieu : TODO : Montrer que cet ensemble d'identifiants est un ensemble dense, 8
- 11 : Matthieu : TODO : indiquer que le couple `hAnodeId`, `nodeSeqB` permet d'identifier de manière unique la base d'un bloc ou d'un identifiant, 9
- 12 : Matthieu : NOTE : Pourrait définir dans cette sous-section la notion de séquence bien-formée, 11
- 13 : Matthieu : QUESTION : Ajouter quelques lignes ici sur comment faire ça en pratique (Ajout d'un dot aux opérations, maintien d'un dot store au niveau de la couche livraison, vérification que dot pas encore présent dans dot store avant de passer opération à la structure de données) ? Ou je garde ça pour le chapitre sur MUTE ?, 12
- 14 : Matthieu : QUESTION : Même que pour la exactly-once delivery, est-ce que j'explique ici comment assurer cette contrainte plus en détails (Ajout des dots des opérations *insert* en dépendances de l'opération *remove*, vérification que dots présents dans dot store avant de passer l'opération *remove* à la structure de données) ou je garde ça pour le chapitre sur MUTE ?, 13
- 15 : Matthieu : TODO : Ajouter une phrase pour expliquer que la croissance des identifiants impacte aussi le temps d'intégration des modifications, 14
- 16 : Matthieu : Serait intéressant d'avoir une implémentation combinant LogootSplit et LSEQ pour vérifier si les contraintes sur la création de blocs dans LogootSplit ne sabotent pas la croissance polylogarithmique des identifiants de LSEQ, 14
- 17 : Matthieu : Peut aussi aborder les travaux de Jim Bauwens et Elisa Gonzalez Boix [12, 10, 11] sur l'accélération de la stabilité causale : ne concerne pas seulement les séquences, mais les operation-based CRDTs. Permet de tronquer le log des opérations mais aussi d'accélérer le mécanisme de GC de RGA (et le mien aussi), 15
- 18 : Matthieu : Vois pas par contre où je pourrais aborder les travaux de Weidner, Miller et Meiklejohn [47, 46] qui combinent aussi CRDT et OT dans une certaine mesure. Pas vraiment de sens de comparer les approches à ce stade. Mais reste intéressant à présenter pour se différencier (eux proposent d'utiliser OT pour fusionner 2 CRDTs, moi pour ajouter une action qui est incompatible nativement avec les autres actions du CRDT), 15
- 19 : Matthieu : TODO : Ajouter nou-

- vel exemple où noeud reçoit déjà des opérations dépendant d'un *rename* avant de recevoir le *rename*, 24
- 1 : Matthieu : TODO : Mentionner TP1 et TP2, 4
- 20 : Matthieu : QUESTION : Récapituler modèle de livraison ? (Epoch-based + causal remove), 24
- 21 : Matthieu : QUESTION : Indiquer que l'opération *rename* ne nécessite pas de livraison particulière autre que epoch-based ?, 24
- 22 : Matthieu : TODO : Modifier exemple pour illustrer le cas de figure où on a besoin de MIN/MAX_TUPLE, 29
- 23 : Matthieu : TODO : Trouver un autre terme que pointillé pour dotted, 30
- 24 : Matthieu : QUESTION : Ai-je le droit de faire ça ?, 32
- 25 : Matthieu : NOTE : Mais dans ce cas, le pair peut tout à fait générer un état courant à jour à partir des infos qu'il possède puisque l'opération qui lui manque est intégrée dans l'opé de renommage, 40
- 26 : Matthieu : TODO : Étudier si y a un intérêt à privilégier la synchronisation basée sur l'intégration successive de toutes les opérations quand on a cette méthode de synchronisation par snapshot/checkpoint de possible, 40
- 27 : Matthieu : TODO : Développer ce paragraphe : noeuds doivent retrouver les blocs renommés à partir des données reçues. Pour cela, parcourent leur état. Suffit de retrouver un identifiant avec le même couple *hAnodeId*, *nodeSeqB* pour reformer un bloc. Certains couples *hAnodeId*, *nodeSeqB* peuvent avoir été supprimés en concurrence et ne plus être présent dans la séquence. Donc besoin d'aussi parcourir le log des opérations *remove* concurrentes., 41
- 28 : Matthieu : TODO : ajouter figure d'un epoch tree où une longue branche se fait remplacer par une époque isolée, 41
- 29 : Matthieu : Est-ce que log peut être plus petit qu'état courant ? Oui, si noeuds tous connectés et que système se stabilise. Est-ce probable ? Pas convaincu. , 42
- 2 : Matthieu : TODO : Spécification faible et forte des séquences répliquées, 4
- 30 : Matthieu : TODO : Ajouter figure où noeud reçoit successivement plusieurs opérations *rename* concurrentes et procède au renommage de son état à chaque fois, 43
- 31 : Matthieu : TODO : Insérer schéma de l'architecture d'une collaboration (noeuds, types de noeuds et lien), 46
- 32 : Matthieu : TODO : Insérer schéma de l'architecture logicielle d'un pair, 46
- 33 : Matthieu : TODO : Expliquer comment assure la livraison Causal Remove, 47
- 34 : Matthieu : TODO : Expliquer comment assure la livraison Epoch-based, 47
- 35 : Matthieu : NOTE : C'est vrai ça ? J'ai un doute sur le fait qu'on avait mis en place un CRDT pour cette structure. À vérifier., 48
- 3 : Matthieu : Faire le lien avec les travaux de Burckhardt [14] et les MRDTs [24], 5
- 4 : Matthieu : TODO : Ajouter forces, faiblesses et cas d'utilisation de cette approche, 5
- 5 : Matthieu : TODO : Ajouter référence mécanisme d'anti-entropie basé sur Merkle Tree, 6
- 6 : Matthieu : NOTE : Ajouter LogootSplit de manière sommaire aussi

- à cet endroit ?, 7
- 7 : Matthieu : TODO : Autres Sequence CRDTs à considérer : Stringwise CRDT [54], Chronofold [22], 7
- 8 : Matthieu : TODO : Ajouter une relation d'ordre sur les tuples, 7
- 9 : Matthieu : TODO : Définir la notion de base (et autres fonctions utiles sur les identifiants ? genre isPrefix, concat, getTail...), 8
- FiXme (Matthieu) :
- Notes :
- 10 : TODO : Montrer que cet ensemble d'identifiants est un ensemble dense, 8
- 11 : TODO : indiquer que le couple $hAnodeId, nodeSeqB$ permet d'identifier de manière unique la base d'un bloc ou d'un identifiant, 9
- 12 : NOTE : Pourrait définir dans cette sous-section la notion de séquence bien-formée, 11
- 13 : QUESTION : Ajouter quelques lignes ici sur comment faire ça en pratique (Ajout d'un dot aux opérations, maintien d'un dot store au niveau de la couche livraison, vérification que dot pas encore présent dans dot store avant de passer opération à la structure de données) ? Ou je garde ça pour le chapitre sur MUTE ?, 12
- 14 : QUESTION : Même que pour la exactly-once delivery, est-ce que j'explique ici comment assurer cette contrainte plus en détails (Ajout des dots des opérations *insert* en dépendances de l'opération *remove*, vérification que dots présents dans dot store avant de passer l'opération *remove* à la structure de données) ou je garde ça pour le chapitre sur MUTE ?, 13
- 15 : TODO : Ajouter une phrase pour expliquer que la croissance des identifiants impacte aussi le temps d'intégration des modifications, 14
- 16 : Serait intéressant d'avoir une implémentation combinant LogootSplit et LSEQ pour vérifier si les contraintes sur la création de blocs dans LogootSplit ne sabotent pas la croissance polylogarithmique des identifiants de LSEQ, 14
- 17 : Peut aussi aborder les travaux de Jim Bauwens et Elisa Gonzalez Boix [12, 10, 11] sur l'accélération de la stabilité causale : ne concerne pas seulement les séquences, mais les operation-based CRDTs. Permet de tronquer le log des opérations mais aussi d'accélérer le mécanisme de GC de RGA (et le mien aussi), 15
- 18 : Vois pas par contre où je pourrais aborder les travaux de Weidner, Miller et Meiklejohn [47, 46] qui combinent aussi CRDT et OT dans une certaine mesure. Pas vraiment de sens de comparer les approches à ce stade. Mais reste intéressant à présenter pour se différencier (eux proposent d'utiliser OT pour fusionner 2 CRDTs, moi pour ajouter une action qui est incompatible nativement avec les autres actions du CRDT), 15
- 19 : TODO : Ajouter nouvel exemple où noeud reçoit déjà des opérations dépendant d'un *rename* avant de recevoir le *rename*, 24
- 1 : TODO : Mentionner TP1 et TP2, 4
- 20 : QUESTION : Récapituler modèle de livraison ? (Epoch-based + causal remove), 24
- 21 : QUESTION : Indiquer que l'opération *rename* ne nécessite pas de livraison particulière autre que epoch-based ?, 24
- 22 : TODO : Modifier exemple pour illustrer le cas de figure où on a be-

- soin de MIN/MAX_TUPLE, 29
- 23 : TODO : Trouver un autre terme que pointillé pour dotted, 30
- 24 : QUESTION : Ai-je le droit de faire ça ?, 32
- 25 : NOTE : Mais dans ce cas, le pair peut tout à fait générer un état courant à jour à partir des infos qu'il possède puisque l'opération qui lui manque est intégrée dans l'opé de renommage, 40
- 26 : TODO : Étudier si y a un intérêt à privilégier la synchronisation basée sur l'intégration successive de toutes les opérations quand on a cette méthode de synchronisation par snapshot/checkpoint de possible, 40
- 27 : TODO : Développer ce paragraphe : noeuds doivent retrouver les blocs renommés à partir des données reçues. Pour cela, parcourent leur état. Suffit de retrouver un identifiant avec le même couple $hAnodeId$, $nodeSeqB$ pour reformer un bloc. Certains couples $hAnodeId$, $nodeSeqB$ peuvent avoir été supprimés en concurrence et ne plus être présent dans la séquence. Donc besoin d'aussi parcourir le log des opérations *remove* concurrentes., 41
- 28 : TODO : ajouter figure d'un epoch tree où une longue branche se fait remplacer par une époque isolée, 41
- 29 : Est-ce que log peut être plus petit qu'état courant ? Oui, si noeuds tous connectés et que système se stabilise. Est-ce probable ? Pas convaincu., 42
- 2 : TODO : Spécification faible et forte des séquences répliquées, 4
- 30 : TODO : Ajouter figure où noeud reçoit successivement plusieurs opérations *rename* concurrentes et procède au renommage de son état à chaque fois, 43
- 31 : TODO : Insérer schéma de l'architecture d'une collaboration (noeuds, types de noeuds et lien), 46
- 32 : TODO : Insérer schéma de l'architecture logicielle d'un pair, 46
- 33 : TODO : Expliquer comment assure la livraison Causal Remove, 47
- 34 : TODO : Expliquer comment assure la livraison Epoch-based, 47
- 35 : NOTE : C'est vrai ça ? J'ai un doute sur le fait qu'on avait mis en place un CRDT pour cette structure. À vérifier., 48
- 3 : Faire le lien avec les travaux de Burckhardt [14] et les MRDTs [24], 5
- 4 : TODO : Ajouter forces, faiblesses et cas d'utilisation de cette approche, 5
- 5 : TODO : Ajouter référence mécanisme d'anti-entropie basé sur Merkle Tree, 6
- 6 : NOTE : Ajouter LogootSplit de manière sommaire aussi à cet endroit ?, 7
- 7 : TODO : Autres Sequence CRDTs à considérer : String-wise CRDT [54], Chronofold [22], 7
- 8 : TODO : Ajouter une relation d'ordre sur les tuples, 7
- 9 : TODO : Définir la notion de base (et autres fonctions utiles sur les identifiants ? genre isPrefix, concat, getTail...), 8

Bibliographie

- [1] D. 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.
- [2] Mehdi AHMED-NACER et al. « 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>.
- [3] 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>.
- [4] 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.
- [5] Luc ANDRÉ et al. « 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.
- [6] AUTOMERGE. *Automerge : data structures for building collaborative applications in Javascript*. URL : <https://github.com/automerge/automerge>.
- [7] Carlos BAQUERO, Paulo Sergio ALMEIDA et Ali SHOKER. *Pure Operation-Based Replicated Data Types*. 2017. arXiv : 1710.04469 [cs.DC].
- [8] 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>.
- [9] 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.

- [10] 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>.
- [11] Jim BAUWENS et Elisa GONZALEZ BOIX. « From Causality to Stability : Understanding and Reducing Meta-Data in CRDTs ». In : *Proceedings of the 17th International Conference on Managed Programming Languages and Runtimes*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2020, p. 3–14. ISBN : 9781450388535. URL : <https://doi.org/10.1145/3426182.3426183>.
- [12] Jim BAUWENS et Elisa GONZALEZ BOIX. « Memory Efficient CRDTs in Dynamic Environments ». In : *Proceedings of the 11th ACM SIGPLAN International Workshop on Virtual Machines and Intermediate Languages*. VMIL 2019. Athens, Greece : Association for Computing Machinery, 2019, p. 48–57. ISBN : 9781450369879. DOI : 10.1145/3358504.3361231. URL : <https://doi.org/10.1145/3358504.3361231>.
- [13] 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>.
- [14] Sebastian BURCKHARDT et al. « Replicated Data Types : Specification, Verification, Optimality ». In : *Proceedings of the 41st ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages*. POPL '14. San Diego, California, USA : Association for Computing Machinery, 2014, p. 271–284. ISBN : 9781450325448. DOI : 10.1145/2535838.2535848. URL : <https://doi.org/10.1145/2535838.2535848>.
- [15] 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.
- [16] CONCORDANT. *Concordant*. URL : <http://www.concordant.io/>.
- [17] The SyncFree CONSORTIUM. *AntidoteDB : A planet scale, highly available, transactional database*. URL : <http://antidoteDB.eu/>.
- [18] 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.
- [19] A. DAS, I. GUPTA et A. 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.

-
- [20] Kevin DE PORRE et al. « CScript : A distributed programming language for building mixed-consistency applications ». In : *Journal of Parallel and Distributed Computing volume 144* (oct. 2020), p. 109–123. ISSN : 0743-7315. DOI : 10.1016/j.jpdc.2020.05.010.
 - [21] 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>.
 - [22] Victor GRISHCHENKO et Mikhail PATRAKEEV. « Chronofold : A Data Structure for Versioned Text ». 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 : 10.1145/3380787.3393680. URL : <https://doi.org/10.1145/3380787.3393680>.
 - [23] 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.
 - [24] Gowtham KAKI et al. « Mergeable Replicated Data Types ». In : *Proc. ACM Program. Lang.* 3.OOPSLA (oct. 2019). DOI : 10.1145/3360580. URL : <https://doi.org/10.1145/3360580>.
 - [25] Martin KLEPPMANN et Alastair R. BERESFORD. « A Conflict-Free Replicated JSON Datatype ». In : *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 28.10 (oct. 2017), p. 2733–2746. ISSN : 1045-9219. DOI : 10.1109/tpds.2017.2697382. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/TPDS.2017.2697382>.
 - [26] Martin KLEPPMANN et al. « 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>.
 - [27] Geoffrey LITT, Peter van HARDENBERG et Orion HENRY. « Cambria : Schema Evolution in Distributed Systems with Edit Lenses ». 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 : 10.1145/3447865.3457963. URL : <https://doi.org/10.1145/3447865.3457963>.
 - [28] Christopher MEIKLEJOHN et Peter VAN ROY. « Lasp : A Language for Distributed, Coordination-free Programming ». In : *17th International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming*. PPDP 2015. ACM, juil. 2015, p. 184–195. DOI : 10.1145/2790449.2790525.
 - [29] 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.

- [30] 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>.
- [31] Hoang-Long NGUYEN et al. « Blockchain-Based Auditing of Transparent Log Servers ». In : *32th IFIP Annual Conference on Data and Applications Security and Privacy (DBSec)*. 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, juil. 2018, p. 21–37. DOI : 10.1007/978-3-319-95729-6_2. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01917636>.
- [32] Petru NICOLAESCU et al. « Near Real-Time Peer-to-Peer Shared Editing on Extensible Data Types ». In : *19th International Conference on Supporting Group Work*. GROUP 2016. ACM, nov. 2016, p. 39–49. DOI : 10.1145/2957276.2957310.
- [33] Petru NICOLAESCU et al. « Yjs : A Framework for Near Real-Time P2P Shared Editing on Arbitrary Data Types ». In : *15th International Conference on Web Engineering*. ICWE 2015. Springer LNCS volume 9114, juin 2015, p. 675–678. DOI : 10.1007/978-3-319-19890-3_55. URL : <http://dbis.rwth-aachen.de/~derntl/papers/preprints/icwe2015-preprint.pdf>.
- [34] 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>.
- [35] 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>.
- [36] Matthieu NICOLAS et al. « 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>.
- [37] Gérald OSTER et al. « 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>.
- [38] D. S. PARKER et al. « 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>.

-
- [39] Nuno PREGUICA et al. « 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.
 - [40] RIAK. *Riak KV*. URL : <http://riak.com/>.
 - [41] Hyun-Gul ROH et al. « 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>.
 - [42] Yasushi SAITO et Marc SHAPIRO. « Optimistic Replication ». In : *ACM Comput. Surv.* 37.1 (mar. 2005), p. 42–81. ISSN : 0360-0300. DOI : 10.1145/1057977.1057980. URL : <https://doi.org/10.1145/1057977.1057980>.
 - [43] Marc SHAPIRO et al. *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>.
 - [44] Marc SHAPIRO et al. « 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.
 - [45] Chengzheng SUN et al. « Achieving Convergence, Causality Preservation, and Intention Preservation in Real-Time Cooperative Editing Systems ». In : *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 5.1 (mar. 1998), p. 63–108. ISSN : 1073-0516. DOI : 10.1145/274444.274447. URL : <https://doi.org/10.1145/274444.274447>.
 - [46] Matthew WEIDNER, Heather MILLER et Christopher MEIKLEJOHN. « Composing and Decomposing Op-Based CRDTs with Semidirect Products ». In : *Proc. ACM Program. Lang.* 4.ICFP (août 2020). DOI : 10.1145/3408976. URL : <https://doi.org/10.1145/3408976>.
 - [47] Matthew WEIDNER, Heather MILLER et Christopher MEIKLEJOHN. « Composing and Decomposing Op-Based CRDTs with Semidirect Products : (Summary) ». 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 : 10.1145/3380787.3393687. URL : <https://doi.org/10.1145/3380787.3393687>.
 - [48] 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>.
 - [49] 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>.

- [50] 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.
- [51] C. WU et al. « Anna : A KVS for Any Scale ». In : *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 33.2 (2021), p. 344–358. DOI : 10.1109/TKDE.2019.2898401.
- [52] Elena YANAKIEVA et al. « 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>.
- [53] YJS. *Yjs : A CRDT framework with a powerful abstraction of shared data*. URL : <https://github.com/yjs/yjs>.
- [54] 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>.
- [55] Weihai YU et Claudia-Lavinia IGNAT. « Conflict-Free Replicated Relations for Multi-Synchronous Database Management at Edge ». In : *IEEE International Conference on Smart Data Services, 2020 IEEE World Congress on Services*. Beijing, China, oct. 2020. URL : <https://hal.inria.fr/hal-02983557>.
- [56] 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>.

Résumé

Afin d'assurer leur haute disponibilité, les systèmes distribués à large échelle se doivent de répliquer leurs données tout en minimisant les coordinations nécessaires entre noeuds. Pour concevoir de tels systèmes, la littérature et l'industrie adoptent de plus en plus l'utilisation de types de données répliquées sans conflits (CRDTs). Les CRDTs sont des types de données qui offrent des comportements similaires aux types existants, tel l'Ensemble ou la Séquence. Ils se distinguent cependant des types traditionnels par leur spécification, qui supporte nativement les modifications concurrentes. À cette fin, les CRDTs incorporent un mécanisme de résolution de conflits au sein de leur spécification.

Afin de résoudre les conflits de manière déterministe, les CRDTs associent généralement des identifiants aux éléments stockés au sein de la structure de données. Les identifiants doivent respecter un ensemble de contraintes en fonction du CRDT, telles que l'unicité ou l'appartenance à un ordre dense. Ces contraintes empêchent de borner la taille des identifiants. La taille des identifiants utilisés croît alors continuellement avec le nombre de modifications effectuées, aggravant le surcoût lié à l'utilisation des CRDTs par rapport aux structures de données traditionnelles. Le but de cette thèse est de proposer des solutions pour pallier ce problème.

Nous présentons dans cette thèse deux contributions visant à répondre à ce problème : (i) Un nouveau CRDT pour Séquence, *RenamableLogootSplit*, qui intègre un mécanisme de renommage à sa spécification. Ce mécanisme de renommage permet aux noeuds du système de réattribuer des identifiants de taille minimale aux éléments de la séquence. Cependant, cette première version requiert une coordination entre les noeuds pour effectuer un renommage. L'évaluation expérimentale montre que le mécanisme de renommage permet de réinitialiser à chaque renommage le surcoût lié à l'utilisation du CRDT. (ii) Une seconde version de *RenamableLogootSplit* conçue pour une utilisation dans un système distribué. Cette nouvelle version permet aux noeuds de déclencher un renommage sans coordination préalable. L'évaluation expérimentale montre que cette nouvelle version présente un surcoût temporaire en cas de renommages concurrents, mais que ce surcoût est à terme.

Mots-clés: CRDTs, édition collaborative en temps réel, cohérence à terme, optimisation mémoire, performance

Abstract

Keywords: CRDTs, real-time collaborative editing, eventual consistency, memory-wise optimisation, performance

