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

Matthieu Nicolas (matthieu.nicolas@loria.fr)

20 décembre 2022

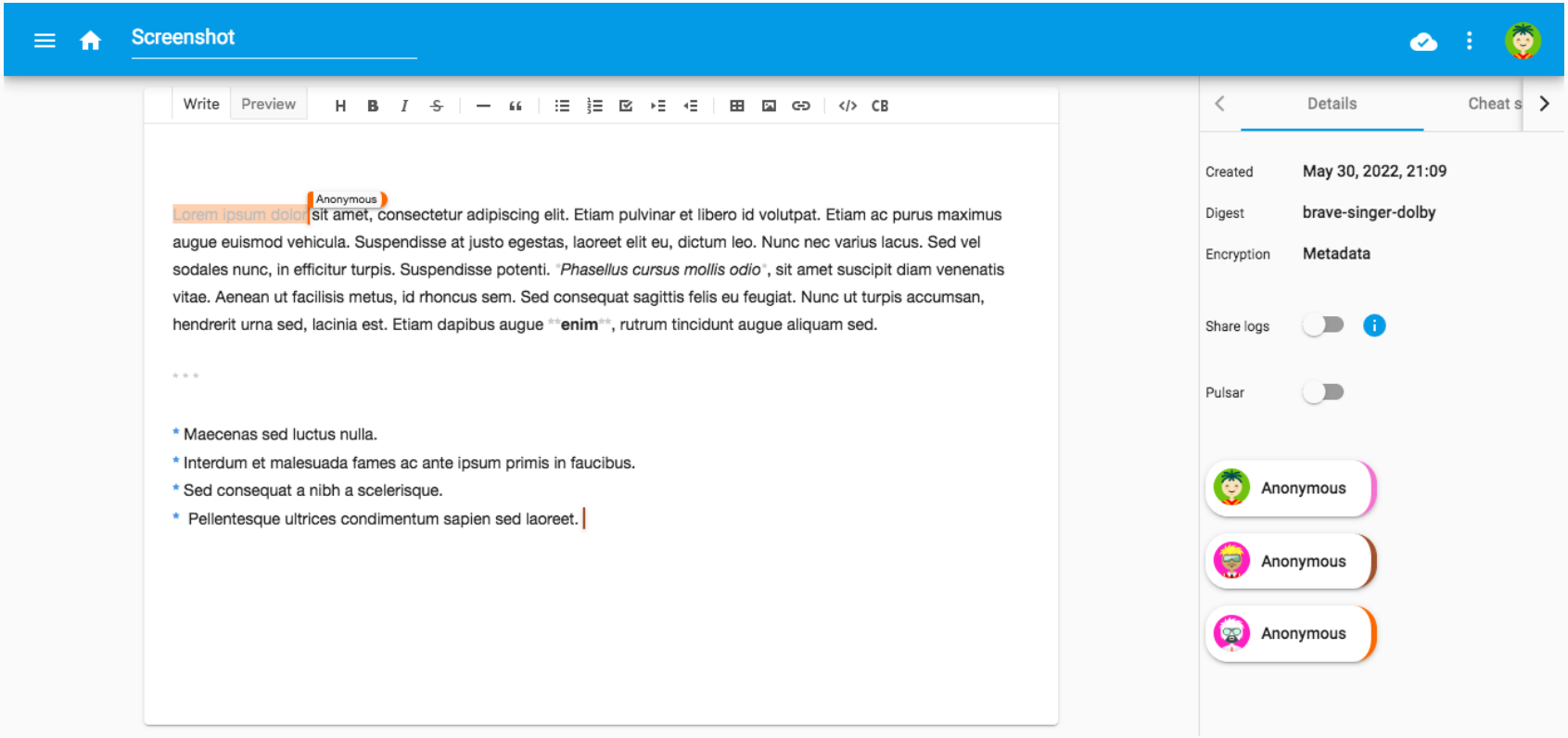
Rapporteurs :	Hanifa Boucheneb	Professeure, Polytechnique Montréal
	Davide Frey	Chargé de recherche, HdR, Inria Rennes Bretagne-Atlantique
Examinateurs :	Hala Skaf-Molli	Maîtresse de conférences, HdR, Nantes Université, LS2N
	Stephan Merz	Directeur de Recherche, Inria Nancy - Grand Est
Encadrants :	Olivier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

Loria
Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications

Inria

cnrs
dépasser les frontières

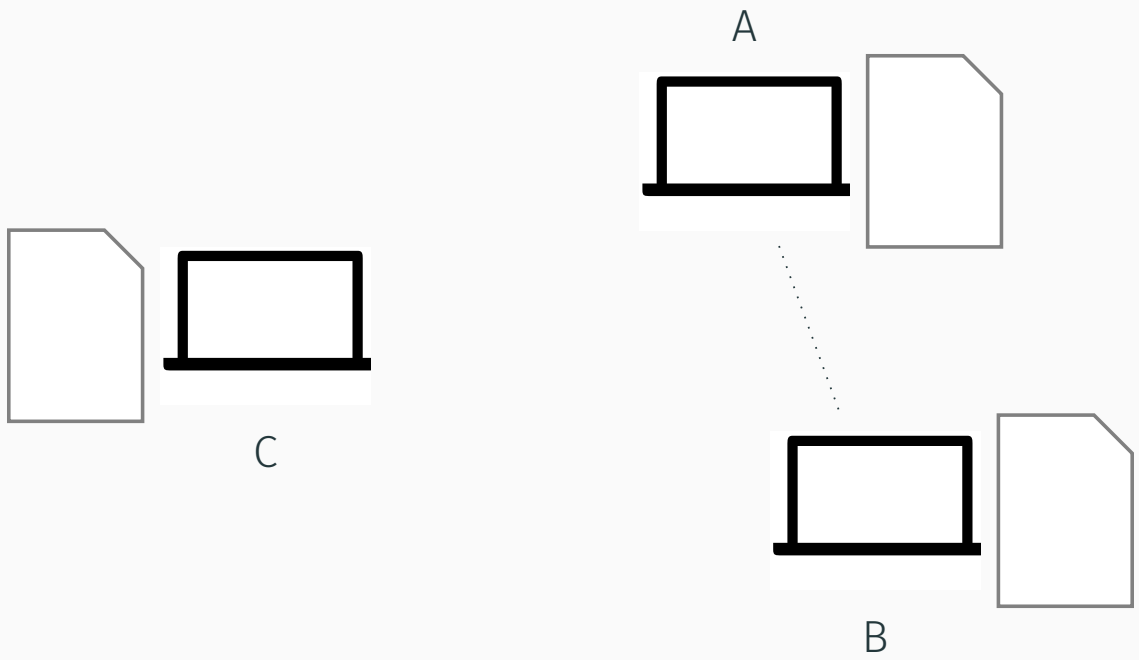
MUTE *



- Application pair-à-pair
- Permet à groupes de rédiger collaborativement documents texte
- Garantit confidentialité & souveraineté de ses données

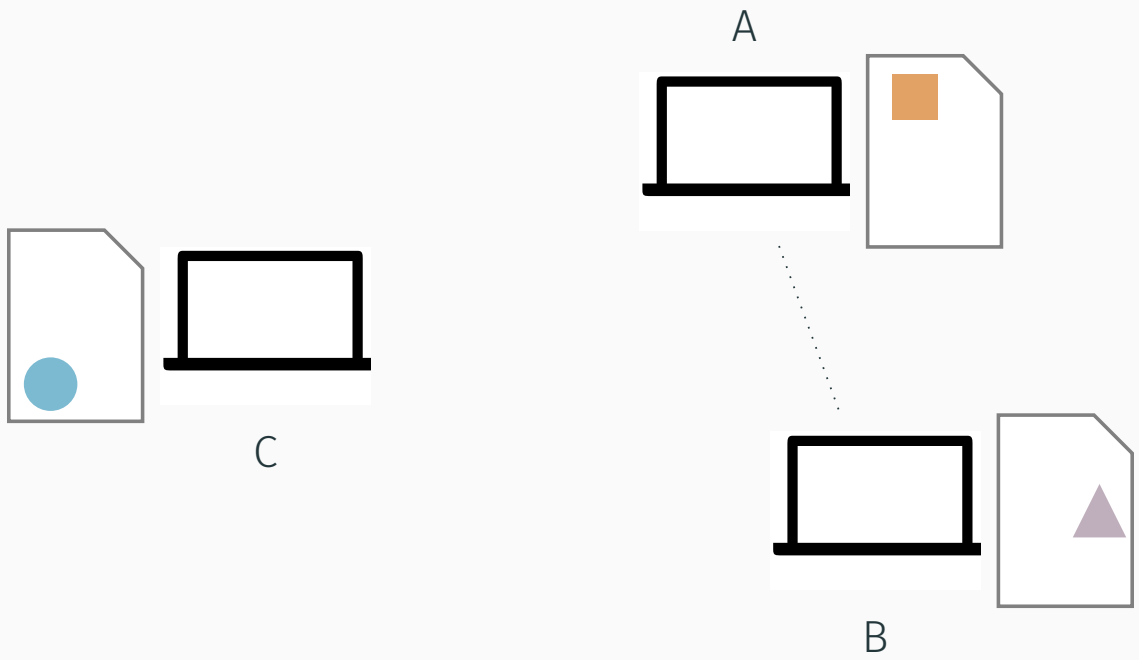
*. Disponible à : `https://mutehost.loria.fr`

Réplication dans applications collaboratives pair-à-pair



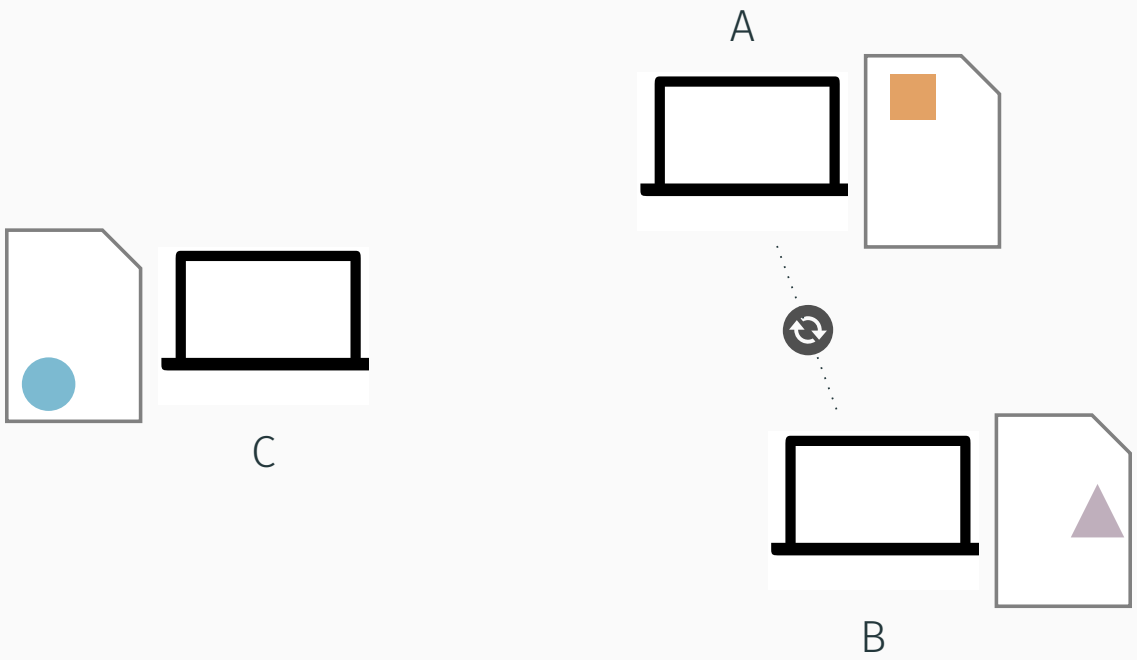
[1]. Terry et al., « Managing Update Conflicts in Bayou, a Weakly Connected Replicated Storage System ».

Réplication dans applications collaboratives pair-à-pair



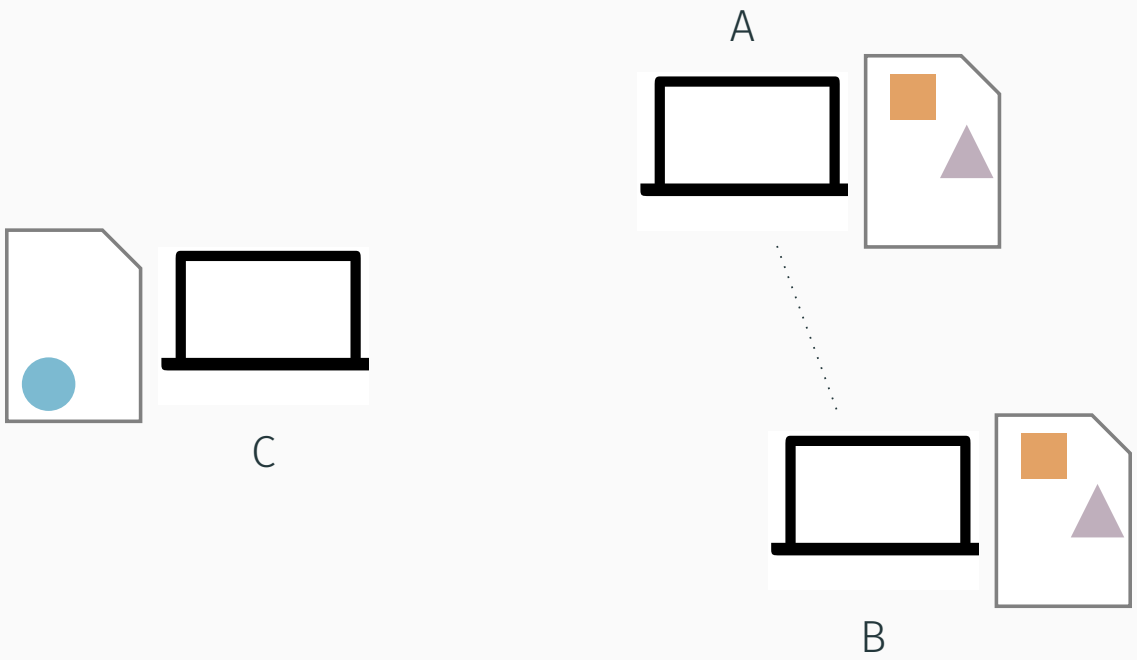
[1]. Terry et al., « Managing Update Conflicts in Bayou, a Weakly Connected Replicated Storage System ».

Réplication dans applications collaboratives pair-à-pair



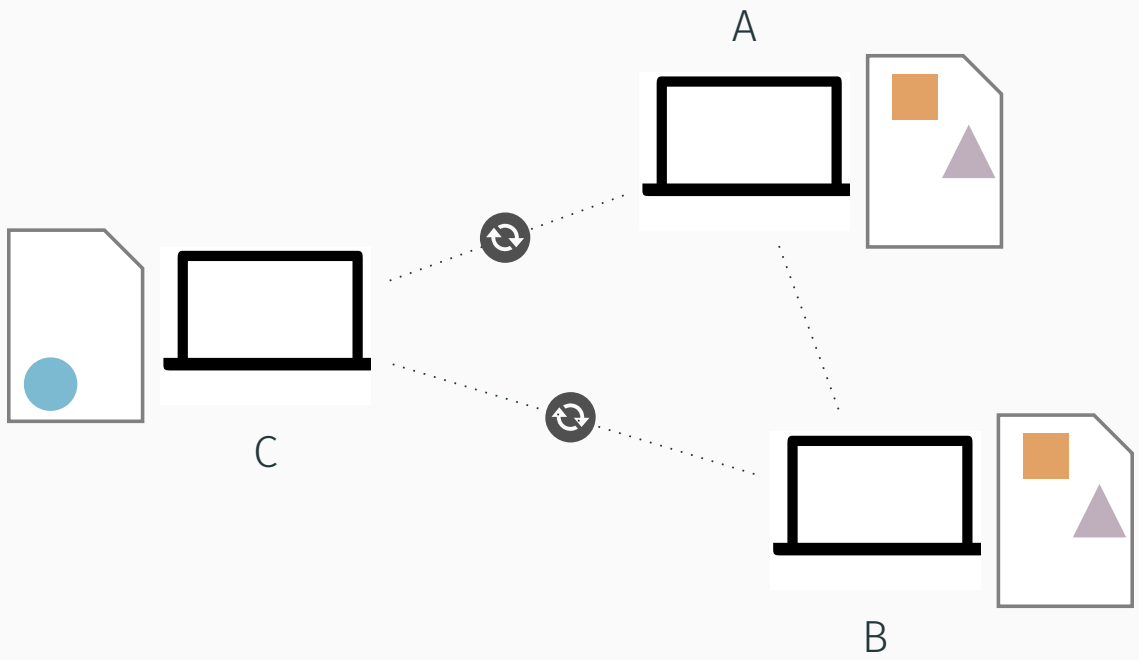
[1]. Terry et al., « Managing Update Conflicts in Bayou, a Weakly Connected Replicated Storage System ».

Réplication dans applications collaboratives pair-à-pair



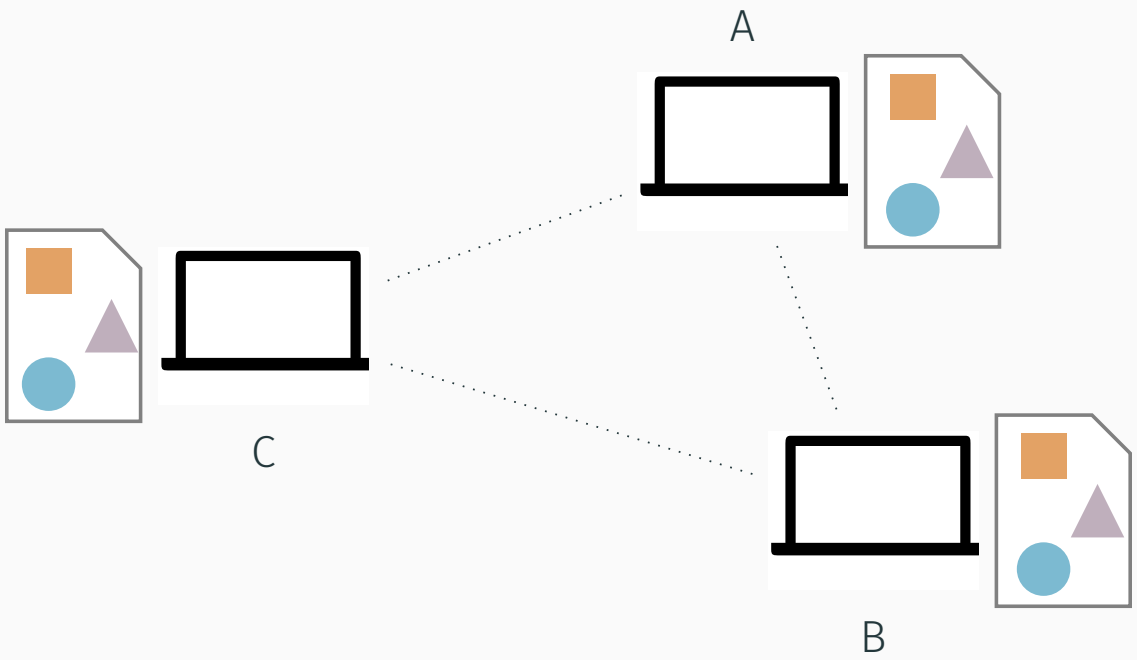
[1]. TERRY et al., « Managing Update Conflicts in Bayou, a Weakly Connected Replicated Storage System ».

Réplication dans applications collaboratives pair-à-pair



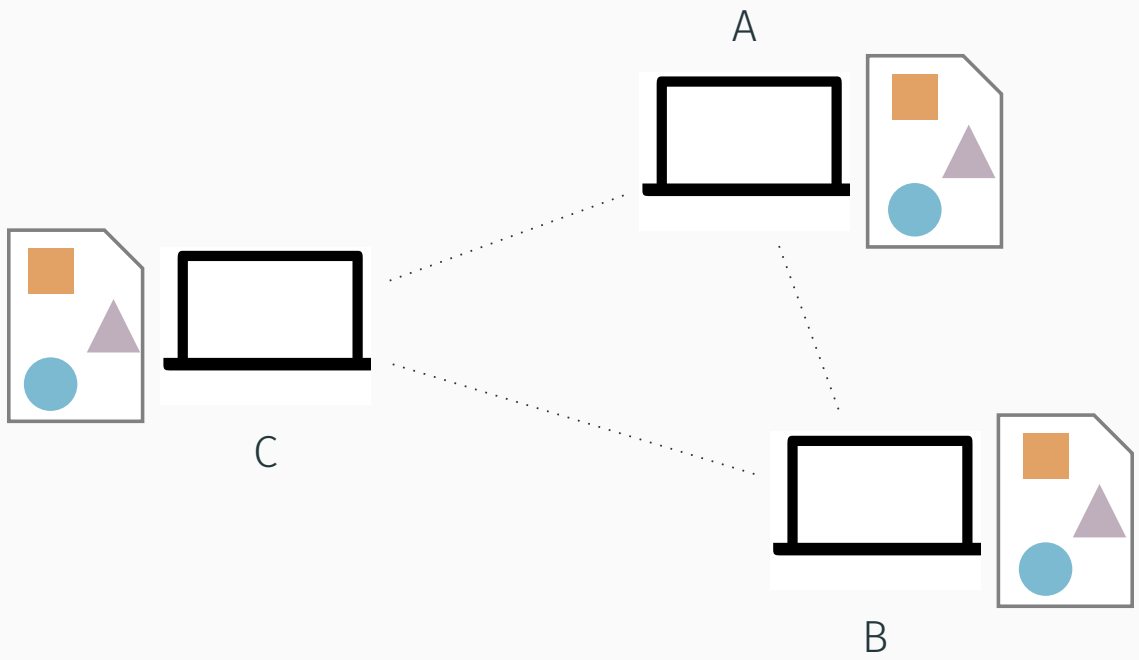
[1]. Terry et al., « Managing Update Conflicts in Bayou, a Weakly Connected Replicated Storage System ».

Réplication dans applications collaboratives pair-à-pair



[1]. Terry et al., « Managing Update Conflicts in Bayou, a Weakly Connected Replicated Storage System ».

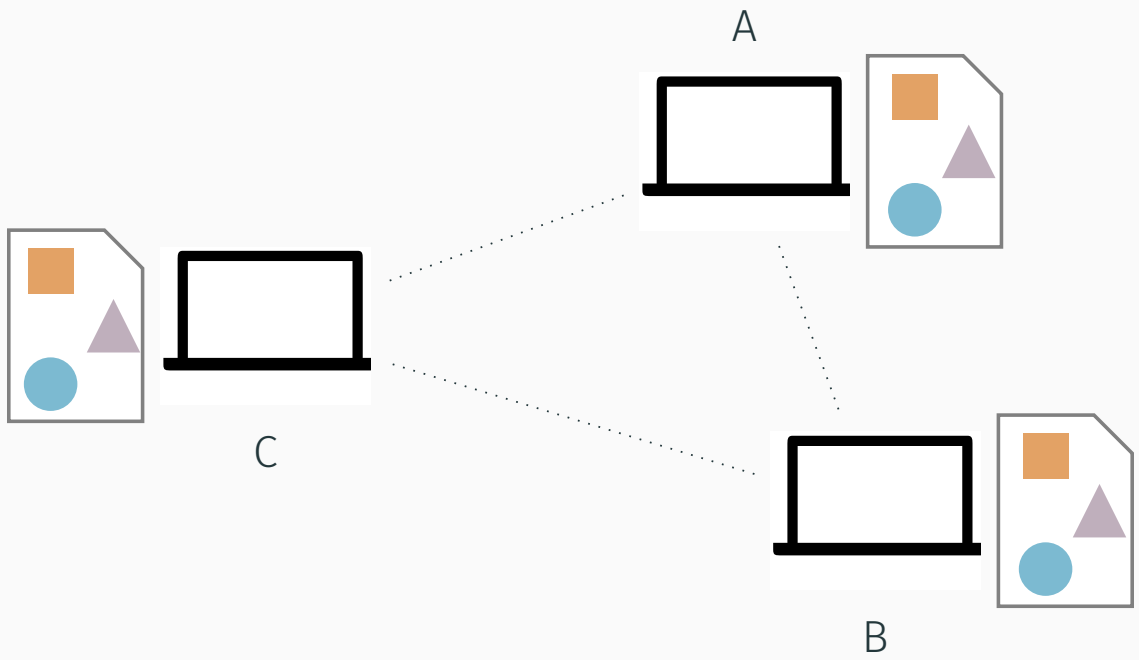
Réplication dans applications collaboratives pair-à-pair



- Doit garantir convergence à terme [1]…
- …malgré ordres différents d'intégration des modifications

[1]. Terry et al., « Managing Update Conflicts in Bayou, a Weakly Connected Replicated Storage System ».

Réplication dans applications collaboratives pair-à-pair



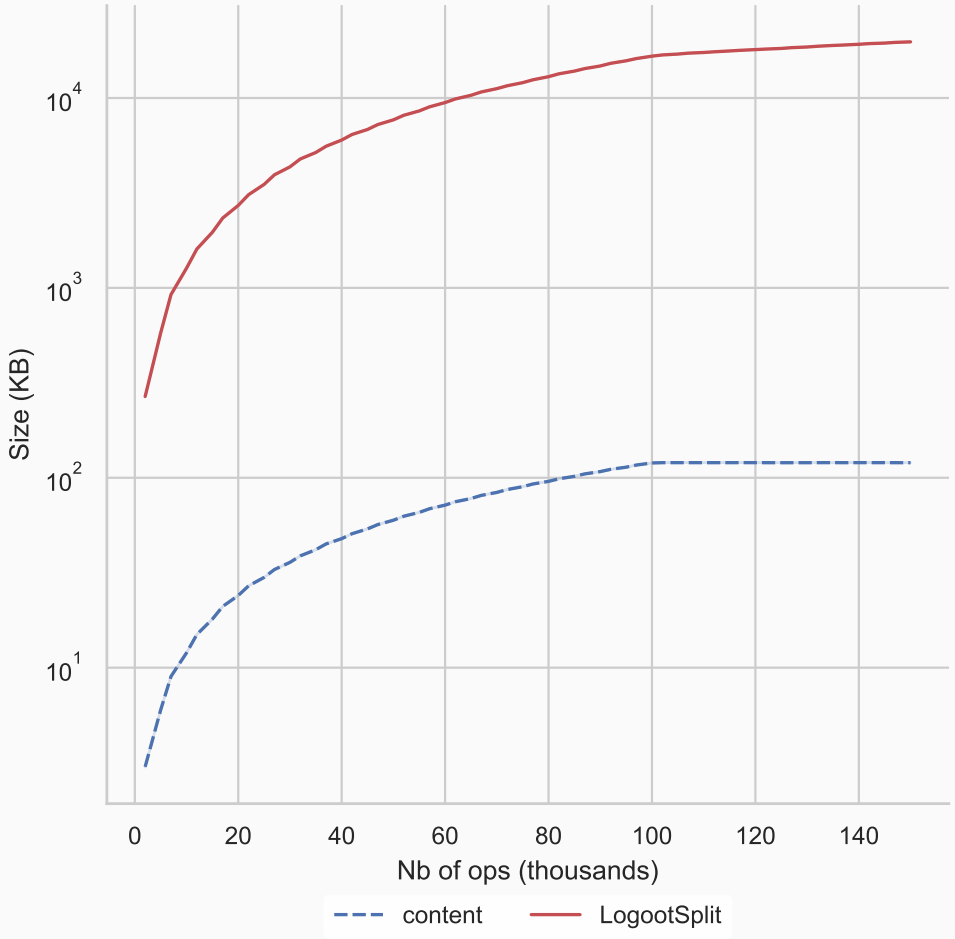
- Doit garantir convergence à terme [1]...
- ...malgré ordres différents d'intégration des modifications

Nécessite mécanismes de résolution de conflits

[1]. Terry et al., « Managing Update Conflicts in Bayou, a Weakly Connected Replicated Storage System ».

Évaluation de MUTE

Taille du texte comparée à taille de la séquence répliquée



- 1% contenu...
- ...99% métadonnées

Comment peut-on réduire le surcoût mémoire des mécanismes de résolution de conflits dans les applications pair-à-pair ?

Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs)[2]

- Nouvelles spécifications des types de données, e.g. *Ensemble* ou *Séquence*
- Incorpore nativement mécanisme de résolution de conflits

[2]. Shapiro et al., « Conflict-Free Replicated Data Types ».

Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs) [2]

- Nouvelles spécifications des types de données, e.g. *Ensemble* ou *Séquence*
- Incorpore nativement mécanisme de résolution de conflits

Propriétés des CRDTs

- Permettent modifications sans coordination
- Garantissent la convergence forte

[2]. Shapiro et al., « Conflict-Free Replicated Data Types ».

Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs) [2]

- Nouvelles spécifications des types de données, e.g. *Ensemble* ou *Séquence*
- Incorpore nativement mécanisme de résolution de conflits

Propriétés des CRDTs

- Permettent modifications sans coordination
- Garantissent la convergence forte

Convergence forte

Ensemble des noeuds ayant intégrés le même ensemble de modifications obtient des états équivalents, sans nécessiter d'actions ou messages supplémentaires

[2]. Shapiro et al., « Conflict-Free Replicated Data Types ».

LogootSplit [4], un CRDT pour le type Séquence

- Assigne identifiant de position à chaque élément de la séquence

[3]. Preguica et al., « A Commutative Replicated Data Type for Cooperative Editing ».
[4]. André et al., « Supporting Adaptable Granularity of Changes for Massive-Scale Collaborative Editing ».

LogootSplit [4], un CRDT pour le type Séquence

- Assigne identifiant de position à chaque élément de la séquence

Propriétés des identifiants de position [3]

1. Unique
2. Immuable
3. Ordonnable par une relation d'ordre strict total $<_{id}$
4. Appartenant à un espace dense

[3]. Preguica et al., « A Commutative Replicated Data Type for Cooperative Editing ».
[4]. André et al., « Supporting Adaptable Granularity of Changes for Massive-Scale Collaborative Editing ».

LogootSplit [4], un CRDT pour le type Séquence

- Assigne identifiant de position à chaque élément de la séquence

Propriétés des identifiants de position [3]

1. Unique
2. Immuable
3. Ordonnable par une relation d'ordre strict total $<_{id}$
4. Appartenant à un espace dense

- Ordonne les éléments entre eux en utilisant leurs identifiants

[3]. Preguica et al., « A Commutative Replicated Data Type for Cooperative Editing ».
[4]. André et al., « Supporting Adaptable Granularity of Changes for Massive-Scale Collaborative Editing ».

Identifiant LogootSplit

Identifiant

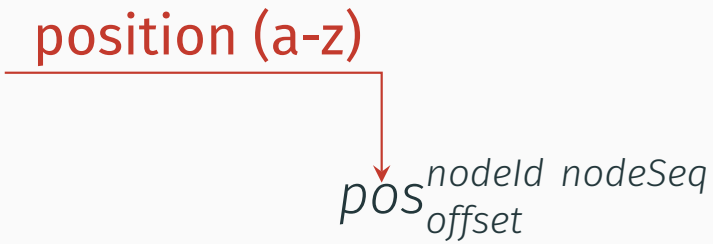
- Composé d'un ou plusieurs tuples suivants

$$pos_{offset}^{nodeId\ \ nodeSeq}$$

Identifiant LogootSplit

Identifiant

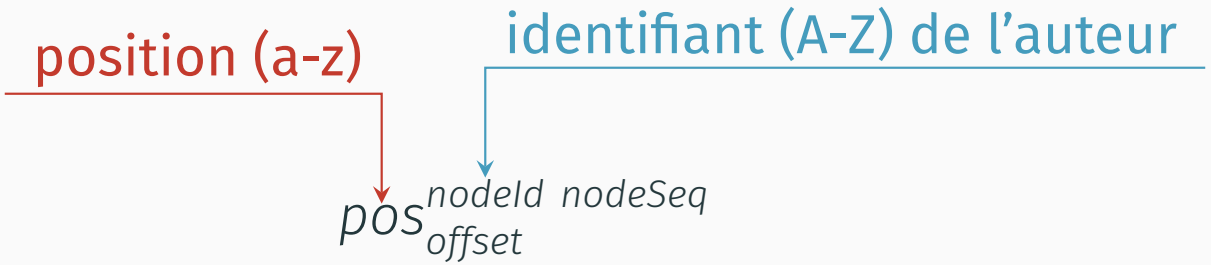
- Composé d'un ou plusieurs tuples suivants



Identifiant LogootSplit

Identifiant

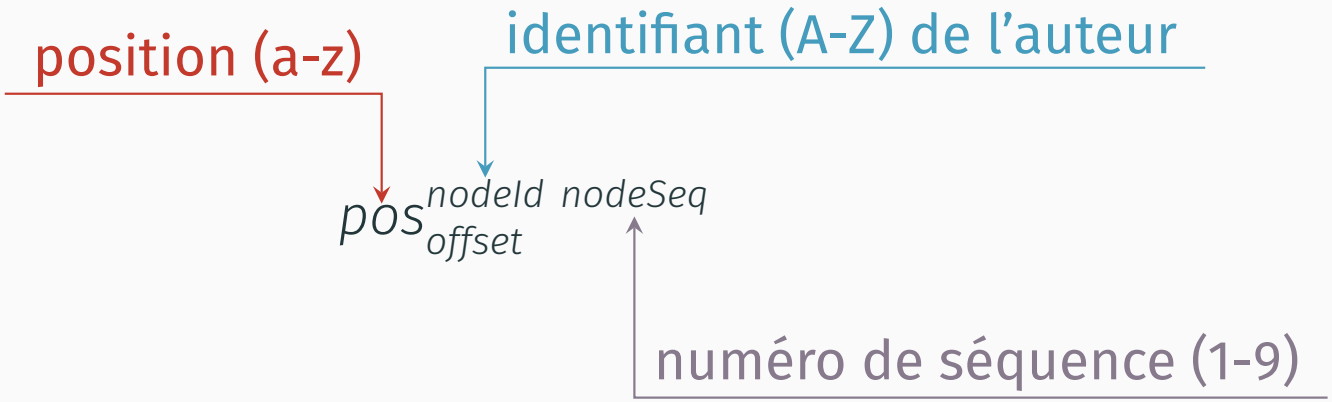
- Composé d'un ou plusieurs tuples suivants



Identifiant LogootSplit

Identifiant

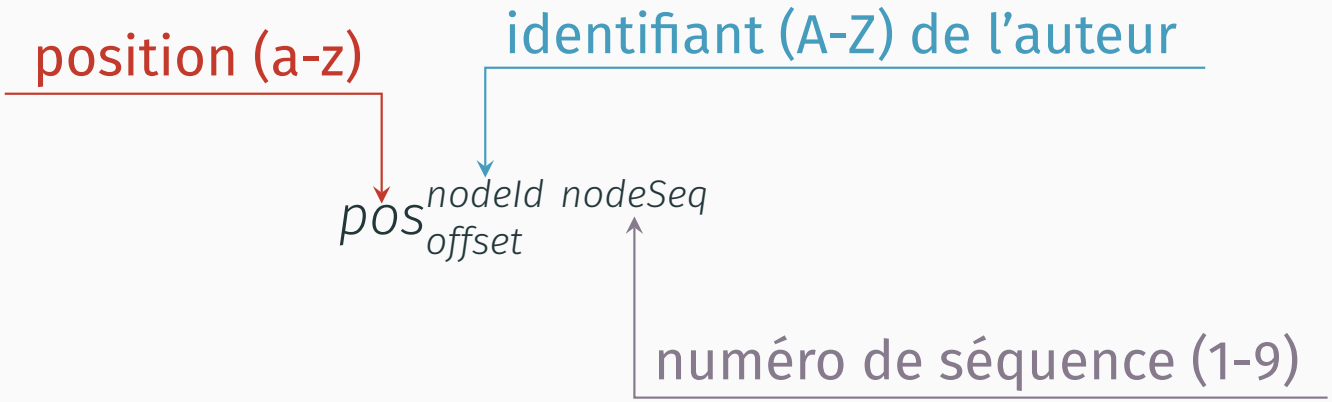
- Composé d'un ou plusieurs tuples suivants



Identifiant LogootSplit

Identifiant

- Composé d'un ou plusieurs tuples suivants



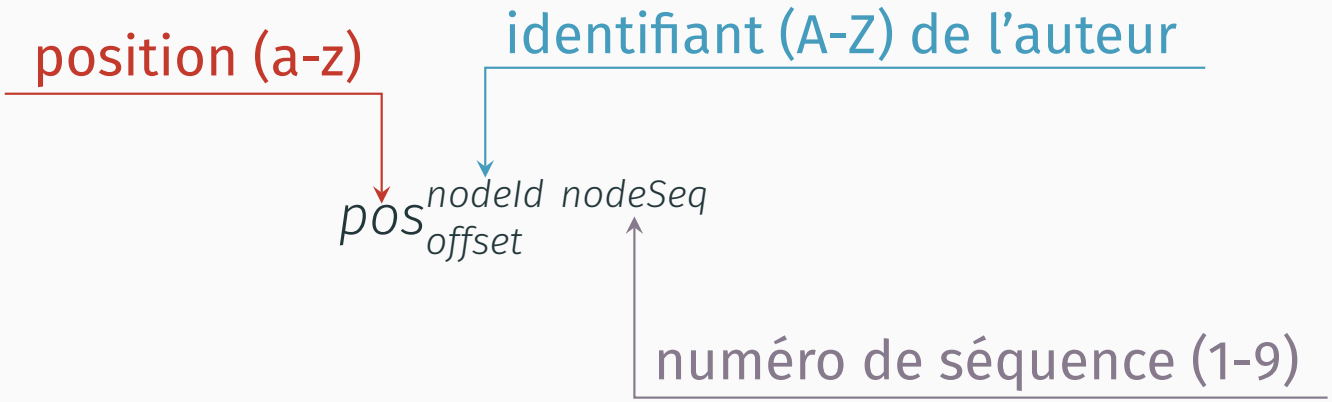
Exemples

d_0^{F5}

Identifiant LogootSplit

Identifiant

- Composé d'un ou plusieurs tuples suivants



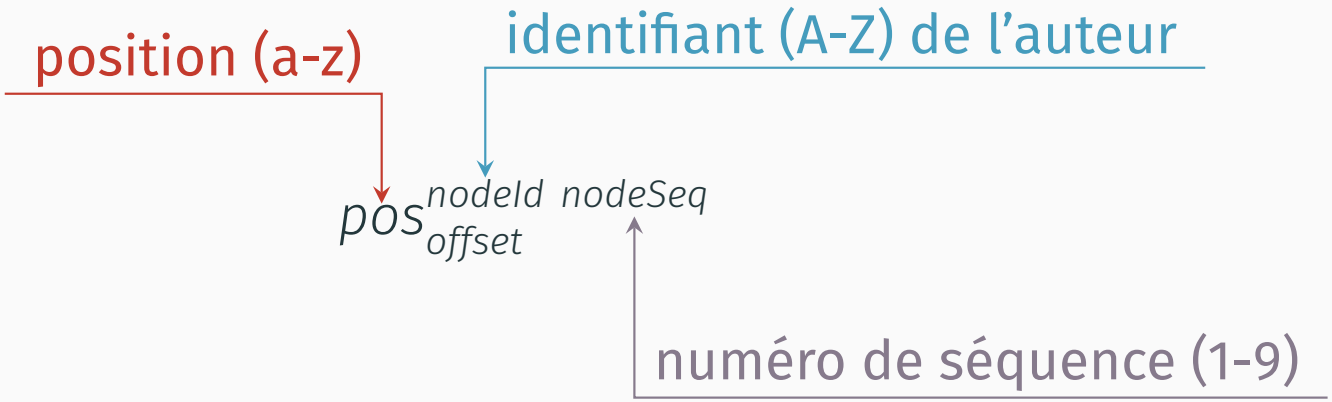
Exemples

$$d_0^{F5} <_{id} m_0^{C1}$$

Identifiant LogootSplit

Identifiant

- Composé d'un ou plusieurs tuples suivants



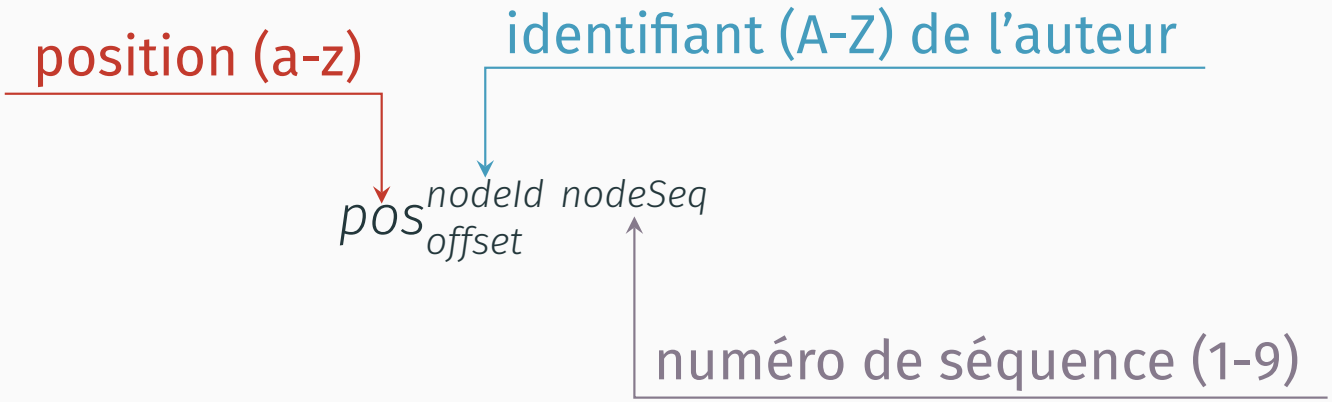
Exemples

$$d_0^{F5} <_{id} m_0^{C1} <_{id} m_0^{C1} f_0^{E1}$$

Identifiant LogootSplit

Identifiant

- Composé d'un ou plusieurs tuples suivants



Exemples

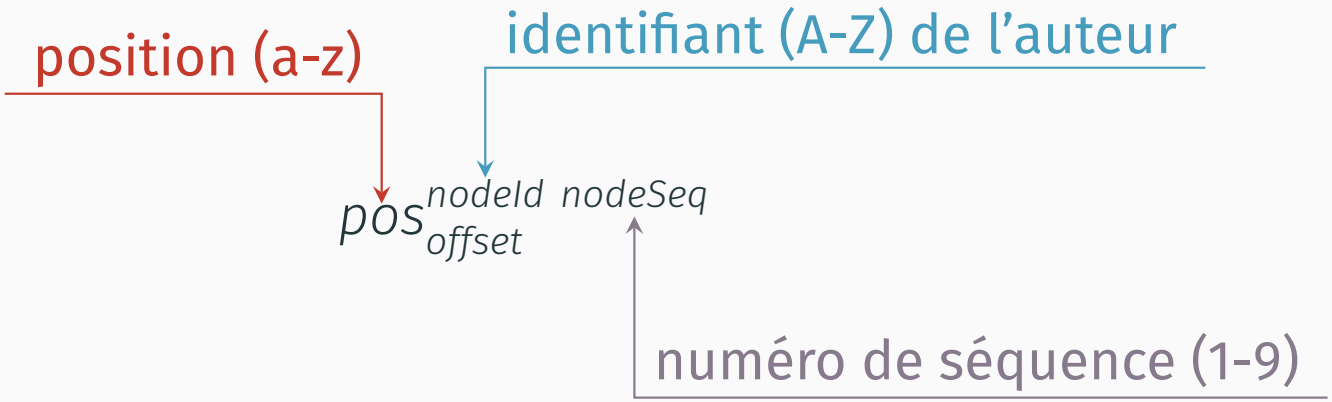
$$d_0^{F5} <_{id} m_0^{C1} <_{id} m_0^{C1} f_0^{E1}$$

$$i_0^{B1} <_{id} \quad ? \quad <_{id} i_1^{B1}$$

Identifiant LogootSplit

Identifiant

- Composé d'un ou plusieurs tuples suivants



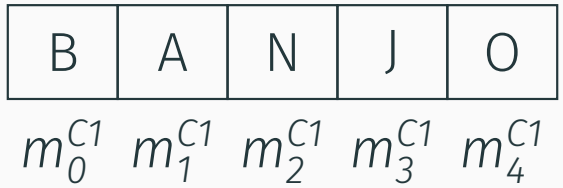
Exemples

$$d_0^{F5} <_{id} m_0^{C1} <_{id} m_0^{C1} f_0^{E1}$$

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

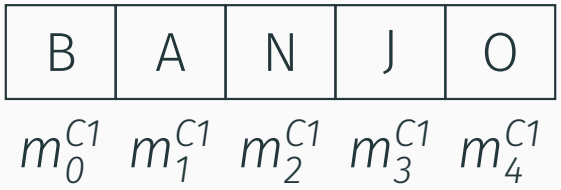
Bloc LogootSplit

- Coûteux de stocker les identifiants de chaque élément



Bloc LogootSplit

- Coûteux de stocker les identifiants de chaque élément



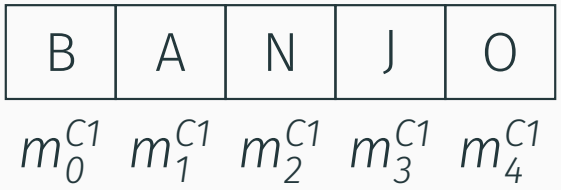
- Aggrège en un bloc éléments ayant identifiants contigus

Identifiants contigus

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

Bloc LogootSplit

- Coûteux de stocker les identifiants de chaque élément



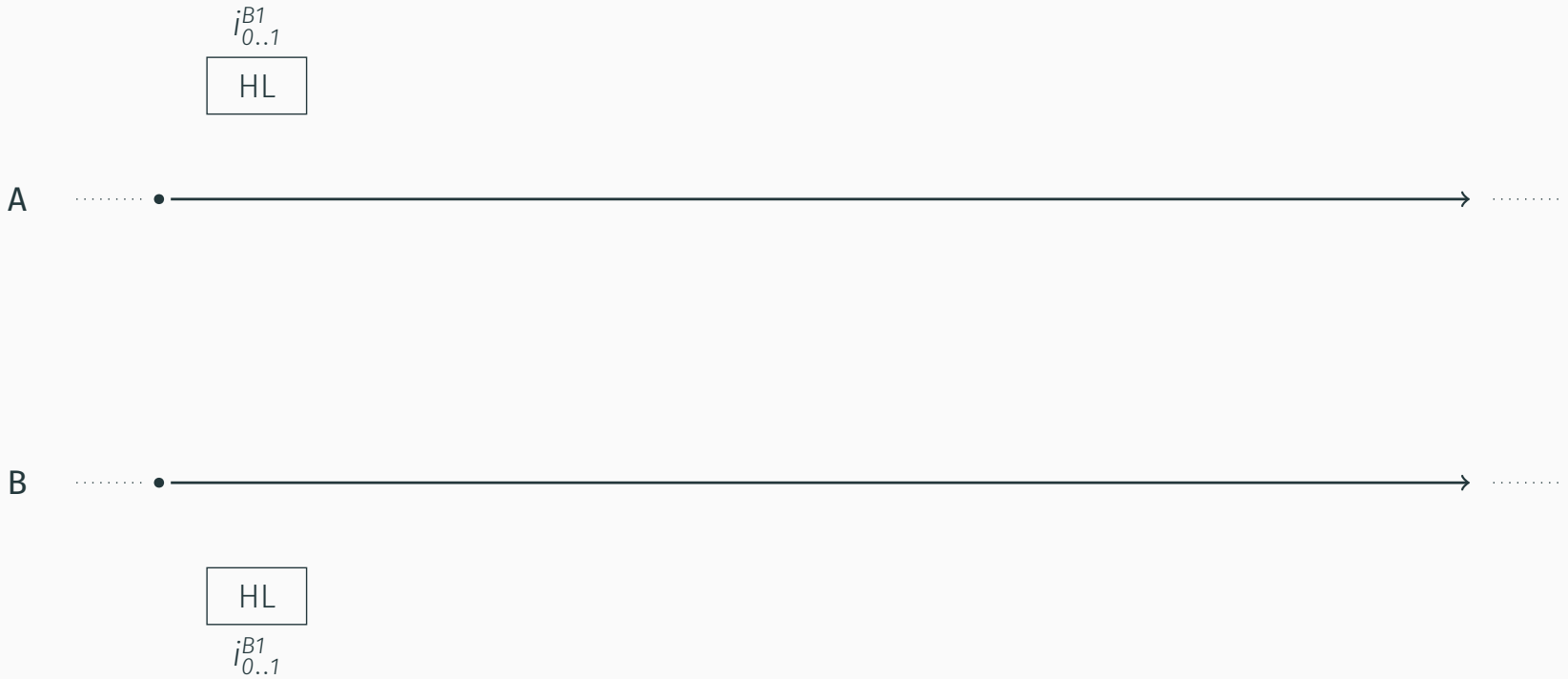
- Aggrège en un bloc éléments ayant identifiants contigus

Identifiants contigus

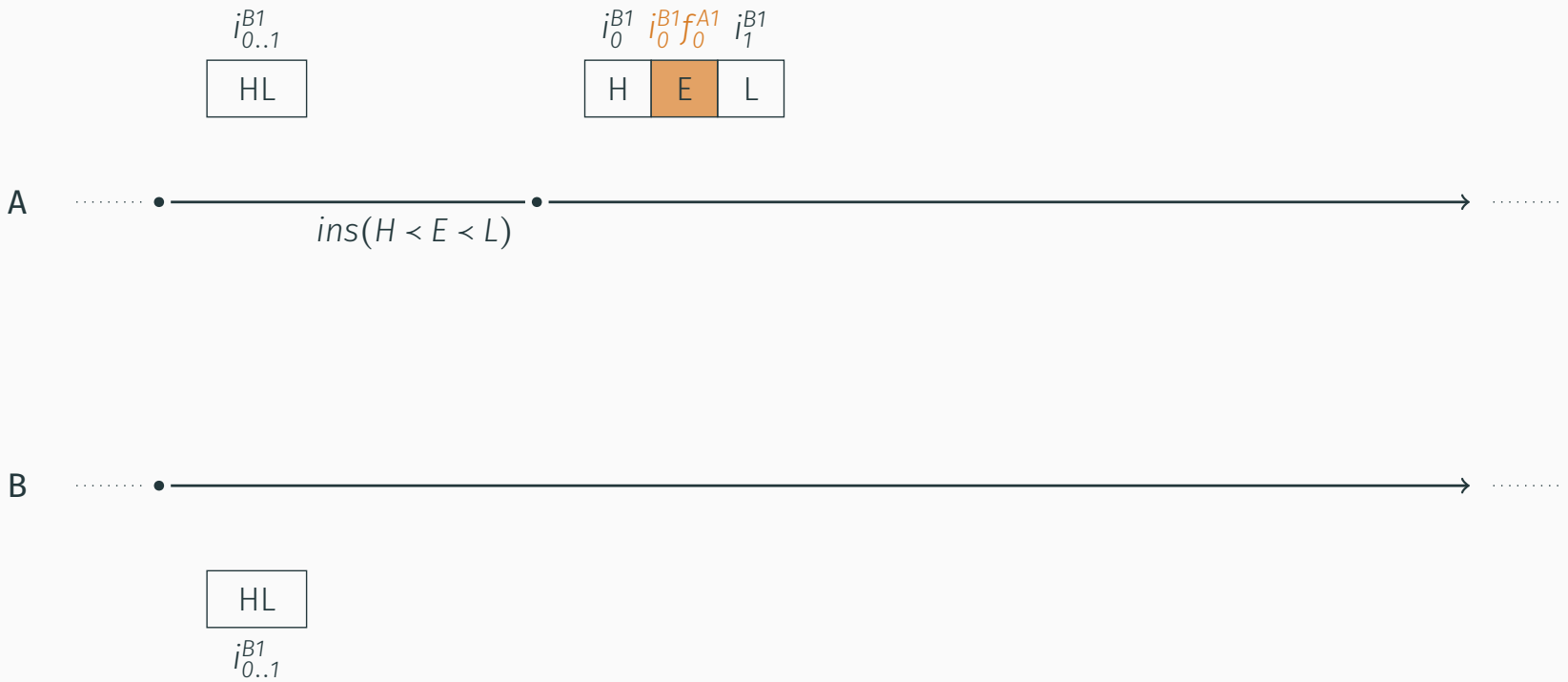
Deux identifiants sont contigus si et seulement si les deux identifiants sont identiques à l'exception de leur dernier offset et que leur derniers offsets sont consécutifs.

- Note l'intervalle d'identifiants d'un bloc : $pos_{begin..end}^{nodeId\ nodeSeq}$

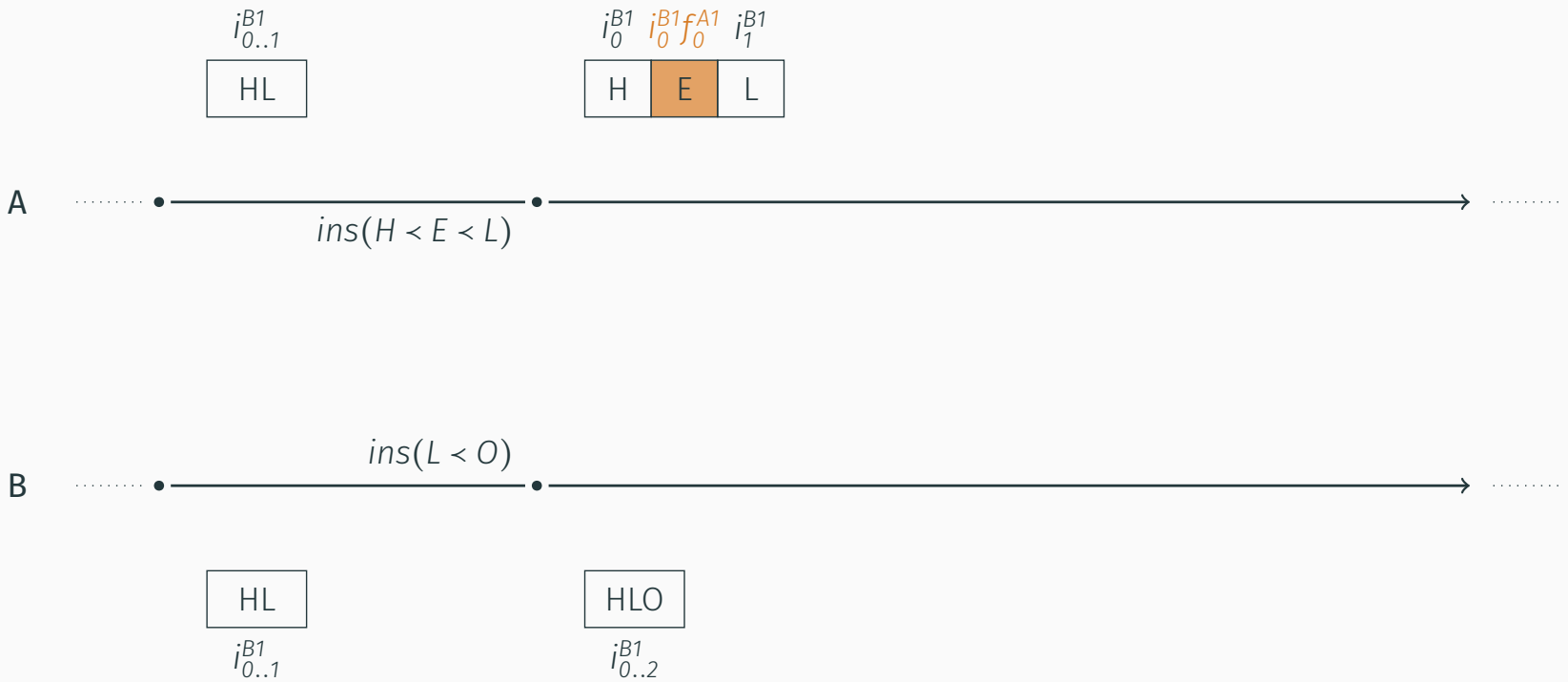
Exemple insertions concurrentes



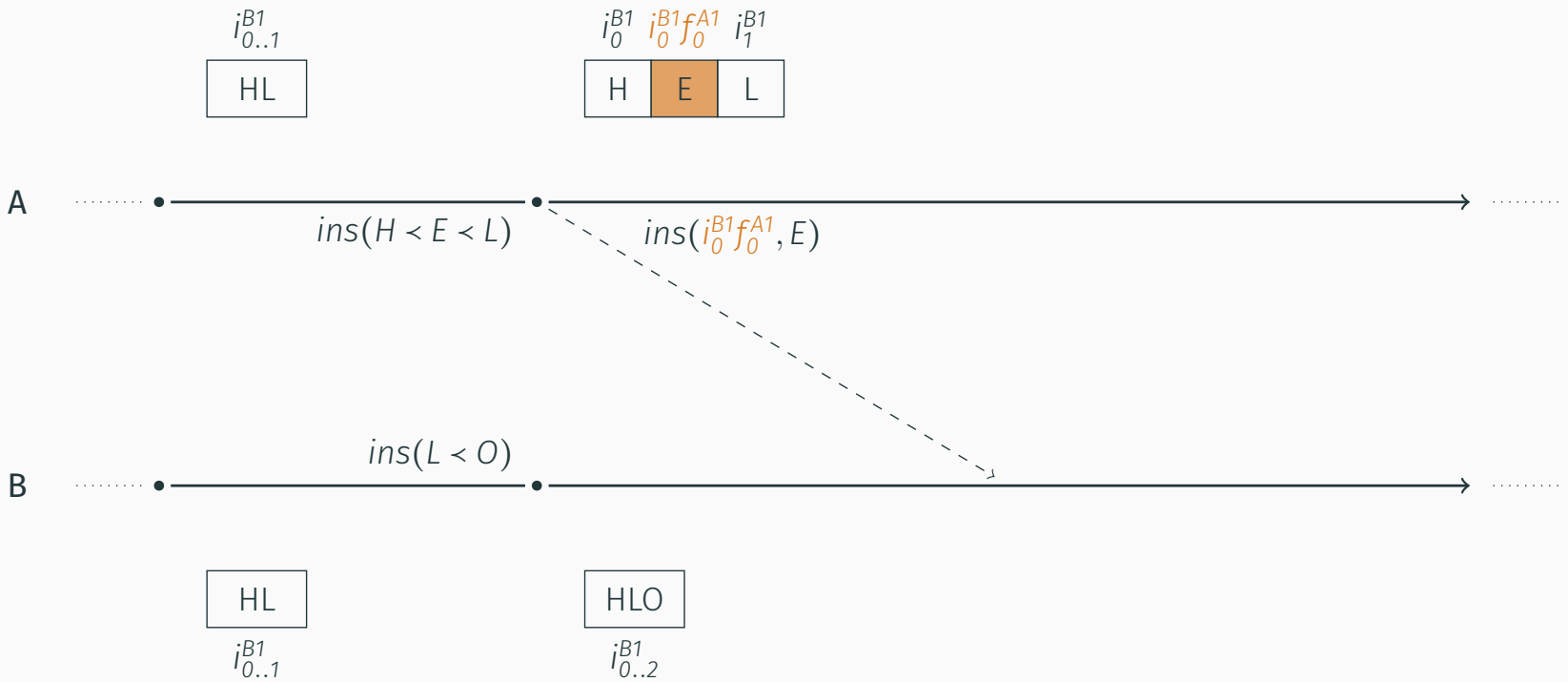
Exemple insertions concurrentes



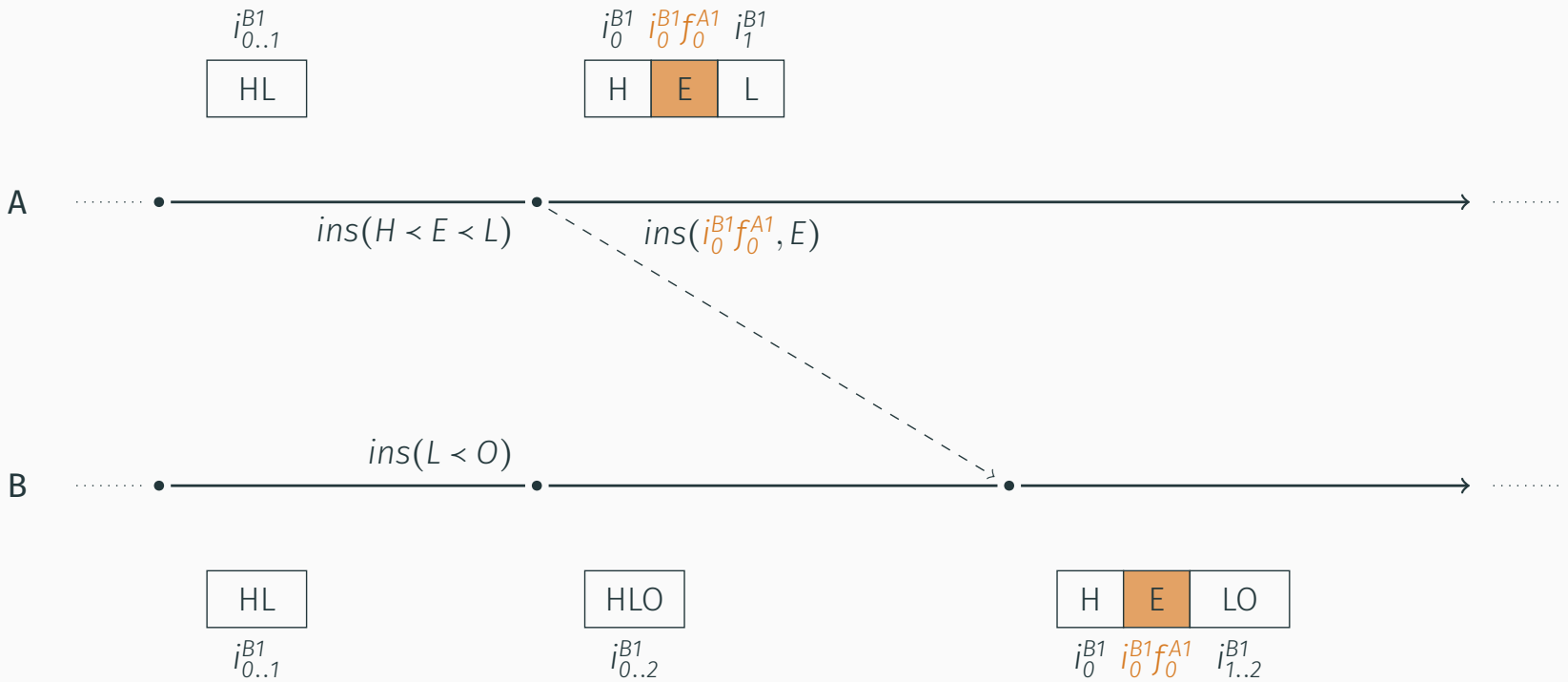
Exemple insertions concurrentes



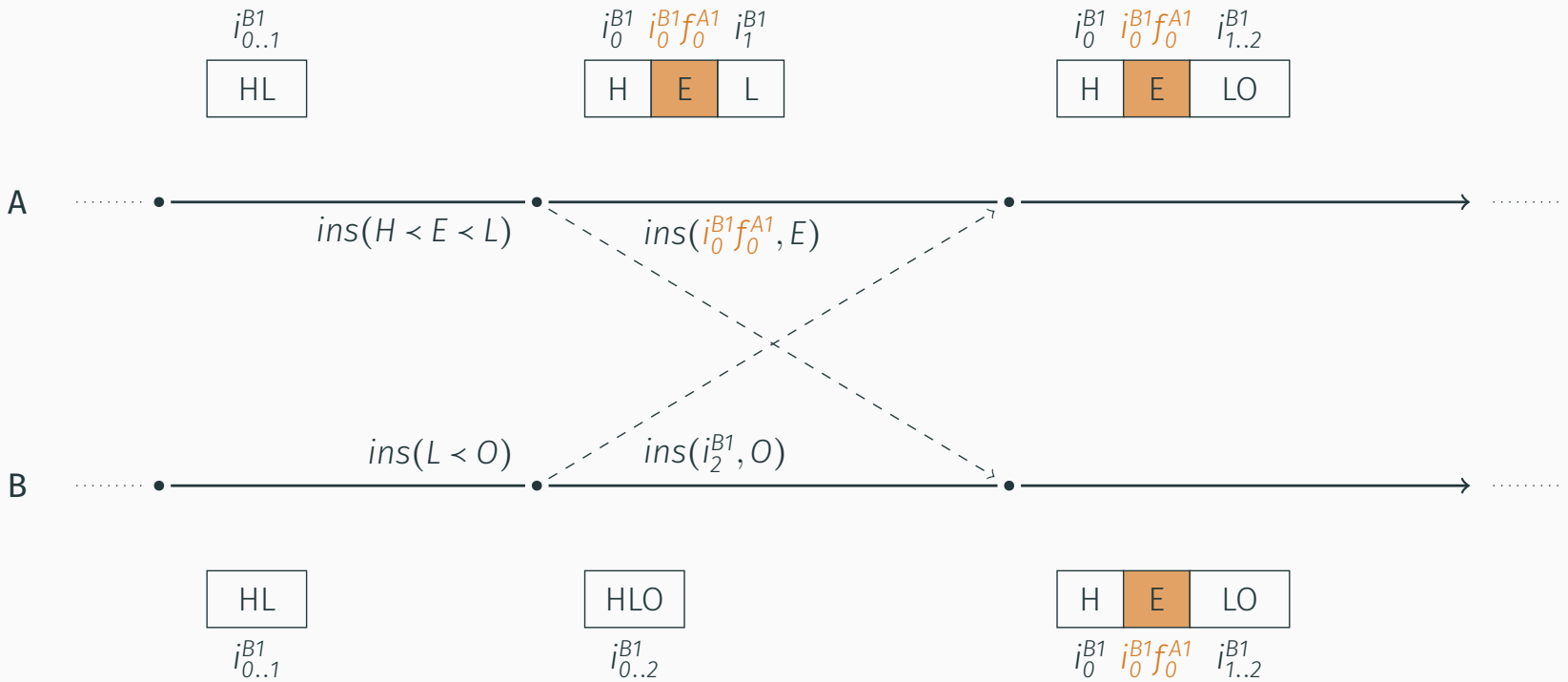
Exemple insertions concurrentes



Exemple insertions concurrentes



Exemple insertions concurrentes



Limites de LogootSplit

Sources croissance métadonnées

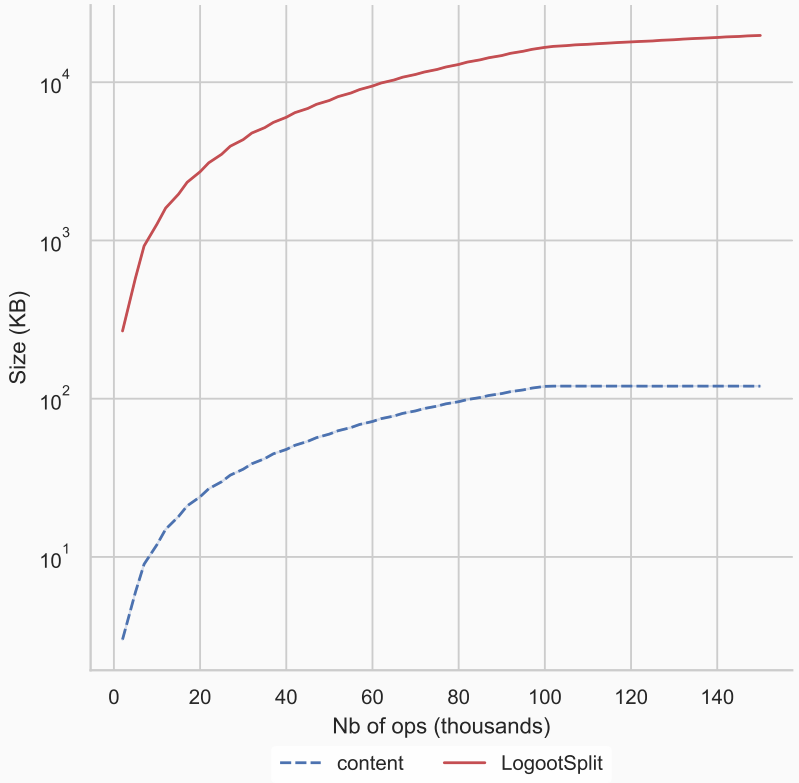
- Croissance non-bornée de la taille des identifiants
- Fragmentation en blocs courts

Limites de LogootSplit

Sources croissance métadonnées

- Croissance non-bornée de la taille des identifiants
- Fragmentation en blocs courts

Taille du contenu comparé à la taille de la séquence LogootSplit



Mitigation du surcoût des CRDTs pour le type Séquence

L'approche core-nebula [5]

- Ré-assigne des identifiants courts aux éléments, c.-à-d. les *renomme*
- Transforme les opérations *insert* et *remove* concurrentes...

[5]. Zawirski et al., « Asynchronous rebalancing of a replicated tree ».

Mitigation du surcoût des CRDTs pour le type Séquence

L'approche core-nebula [5]

- Ré-assigne des identifiants courts aux éléments, c.-à-d. les *renomme*
- Transforme les opérations *insert* et *remove* concurrentes...
- ...mais ne supportent pas opérations *rename* concurrentes

[5]. Zawirski et al., « Asynchronous rebalancing of a replicated tree ».

Mitigation du surcoût des CRDTs pour le type Séquence

L'approche core-nebula [5]

- Ré-assigne des identifiants courts aux éléments, c.-à-d. les *renomme*
- Transforme les opérations *insert* et *remove* concurrentes...
- ...mais ne supportent pas opérations *rename* concurrentes

Inadaptée aux applications pair-à-pair

[5]. Zawirski et al., « Asynchronous rebalancing of a replicated tree ».

Proposition

Mécanisme de renommage supportant les renommages concurrents

RenamableLogootSplit

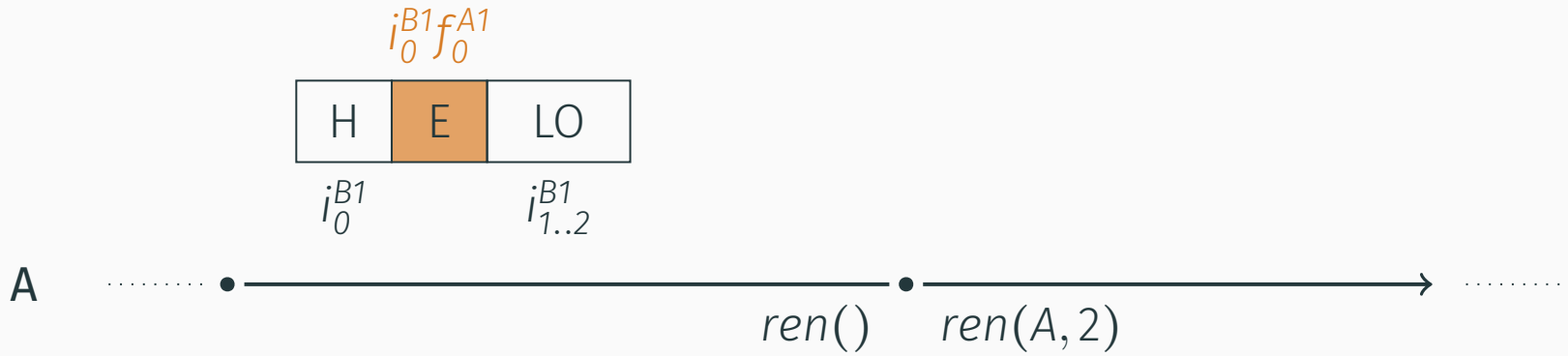
Contribution : RenamableLogootSplit

- CRDT pour le type Séquence qui incorpore un mécanisme de renommage
- Prend la forme d'une nouvelle opération : *rename*

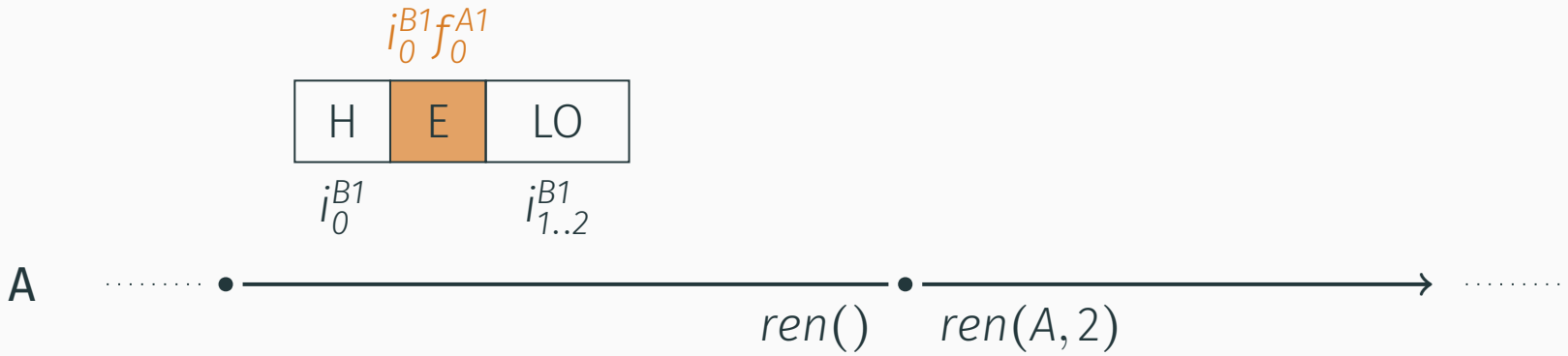
Propriétés de l'opération *rename*

- Est déterministe
- Préserve l'intention des utilisateur-rices
- Préserve la séquence, c.-à-d. unicité et ordre de ses identifiants
- Commute avec les opérations *insert*, *remove* mais aussi *rename* concurrentes

Opération *rename*

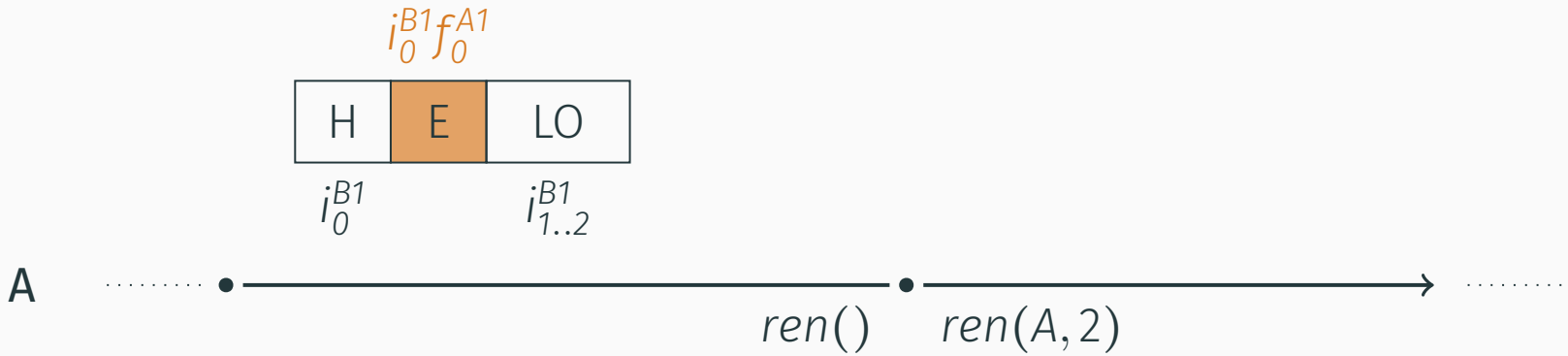


Opération *rename*



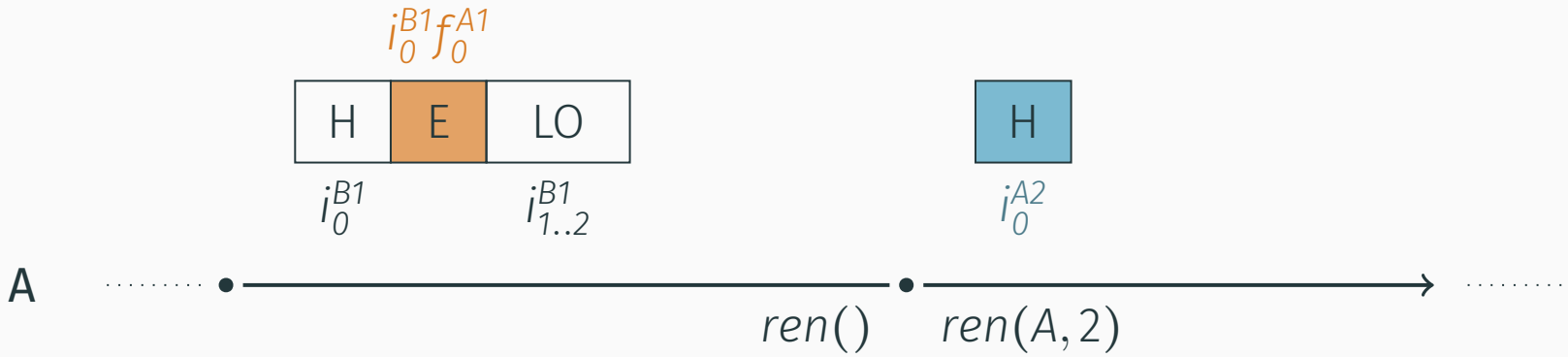
- Génère nouvel identifiant pour le 1er élément :

Opération *rename*



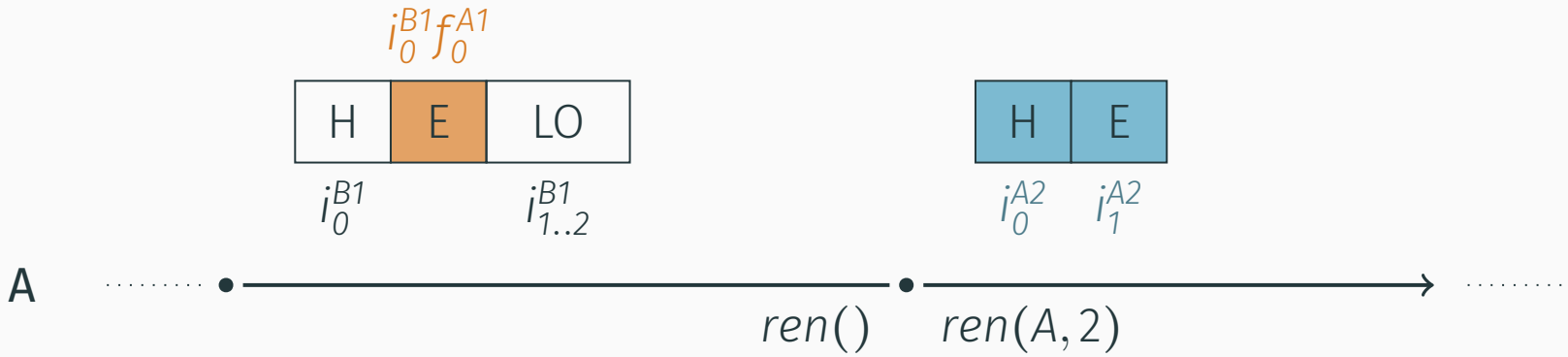
- Génère nouvel identifiant pour le 1er élément : $i_0^{B1} \rightarrow i_0^{A2}$

Opération *rename*



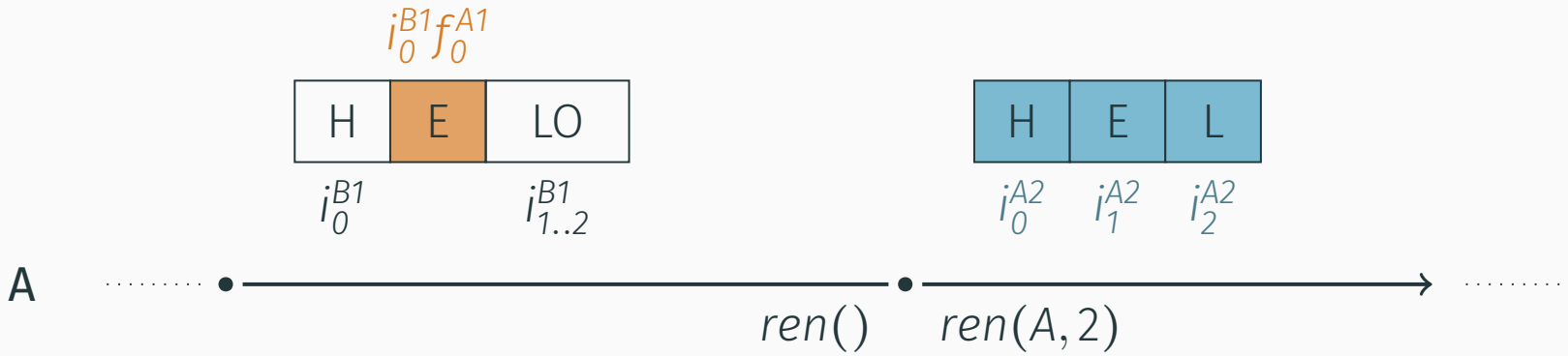
- Génère nouvel identifiant pour le 1er élément : $i_0^{B1} \rightarrow i_0^{A2}$
- Puis génère identifiants contigus pour éléments suivants :

Opération *rename*



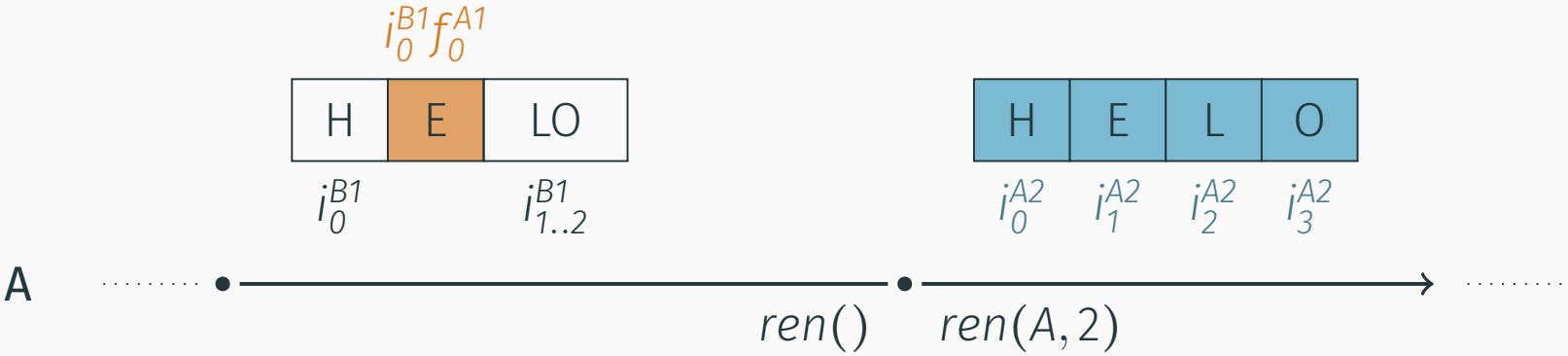
- Génère nouvel identifiant pour le 1er élément : $i_0^{B1} \rightarrow i_0^{A2}$
- Puis génère identifiants contigus pour éléments suivants : i_1^{A2}

Opération *rename*



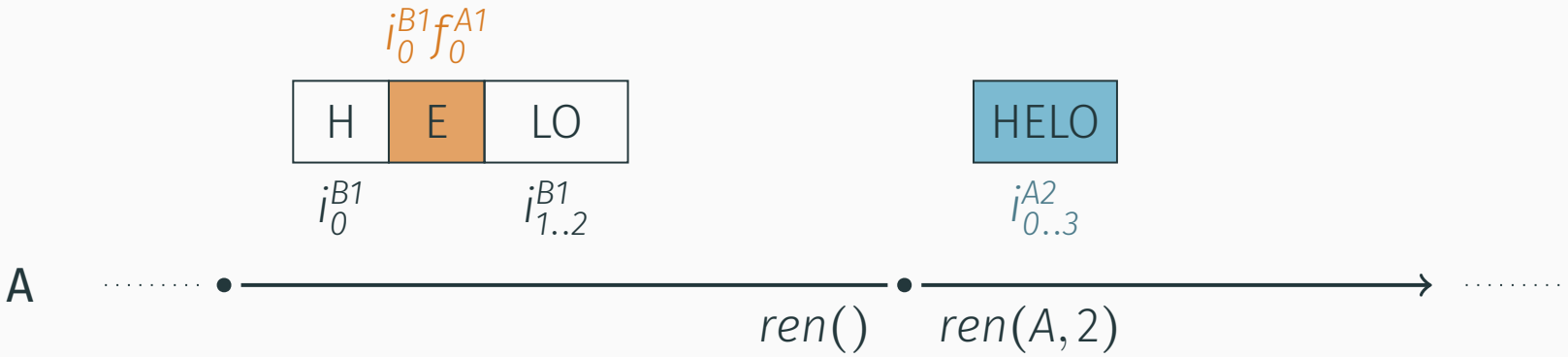
- Génère nouvel identifiant pour le 1er élément : $i_0^{B1} \rightarrow i_0^{A2}$
- Puis génère identifiants contigus pour éléments suivants : i_1^{A2}, i_2^{A2}

Opération *rename*



- Génère nouvel identifiant pour le 1er élément : $i_0^{B1} \rightarrow i_0^{A2}$
- Puis génère identifiants contigus pour éléments suivants : i_1^{A2}, i_2^{A2}, ...

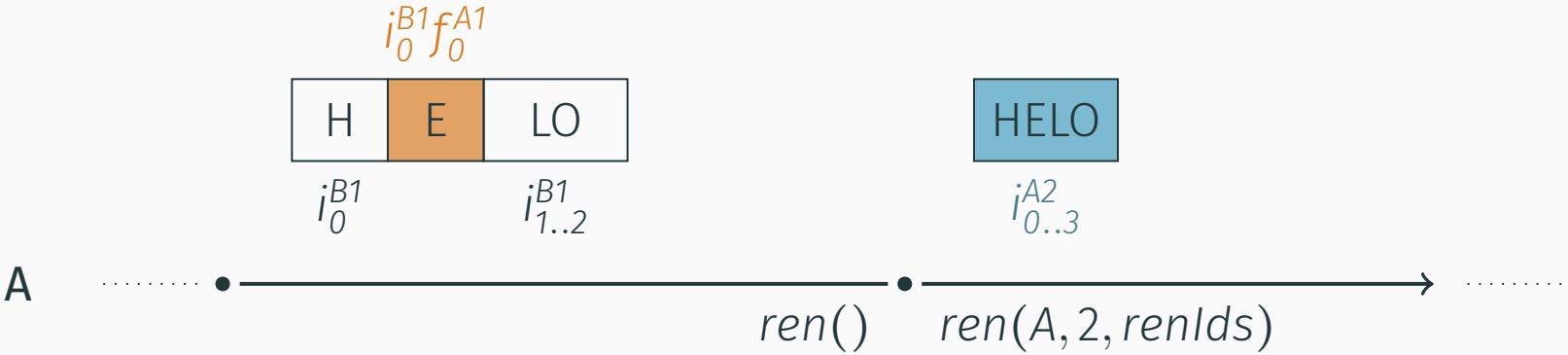
Opération *rename*



- Génère nouvel identifiant pour le 1er élément : $i_0^{B1} \rightarrow i_0^{A2}$
- Puis génère identifiants contigus pour éléments suivants : i_1^{A2}, i_2^{A2}, ...

Regroupe tous les éléments en 1 unique bloc

Opération *rename*

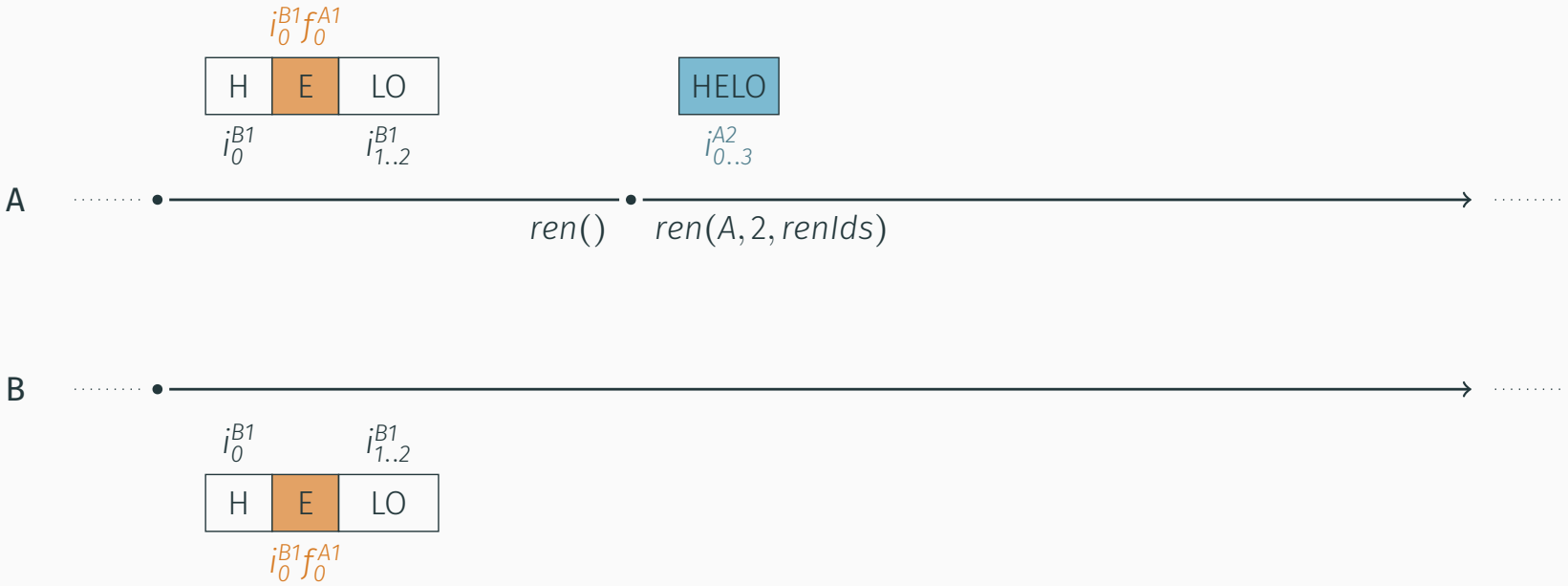


- Génère nouvel identifiant pour le 1er élément : $i_0^{B1} \rightarrow i_0^{A2}$
- Puis génère identifiants contigus pour éléments suivants : i_1^{A2}, i_2^{A2}, ...

Regroupe tous les éléments en 1 unique bloc

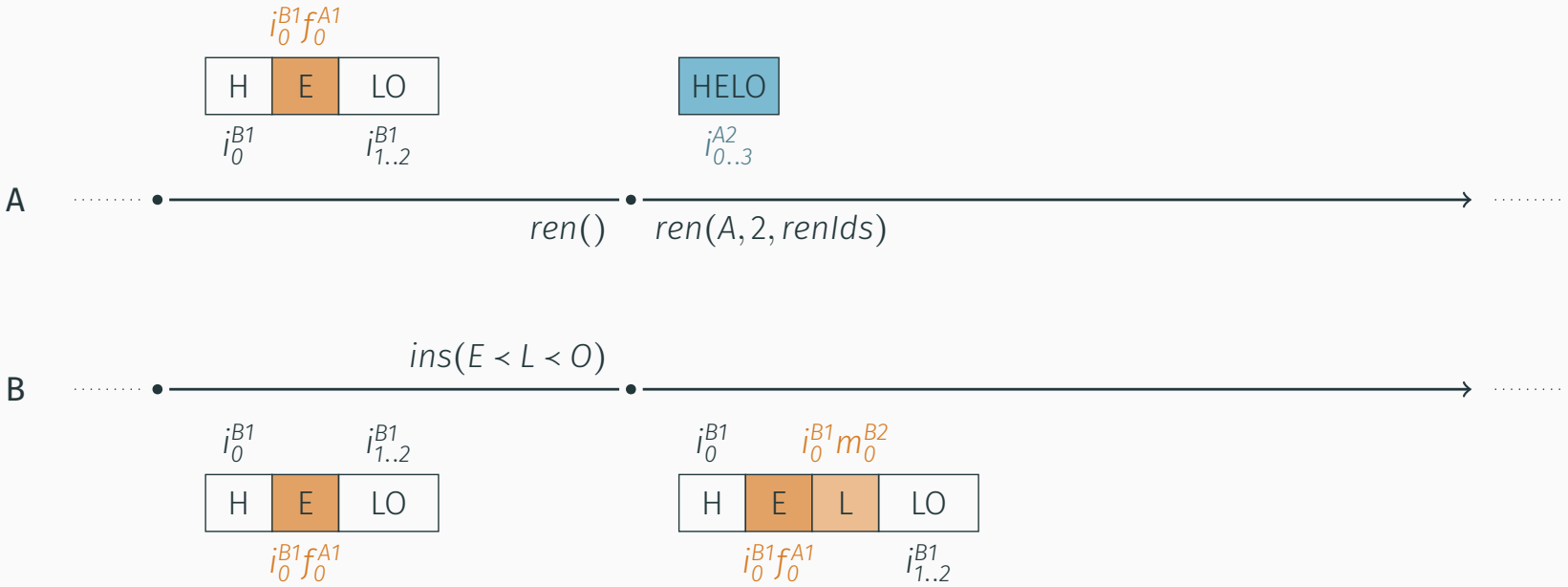
- Stocke identifiants ($[i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, \dots]$) de l'état d'origine : *renIds*

Interactions avec opérations *insert* et *remove* concurrentes



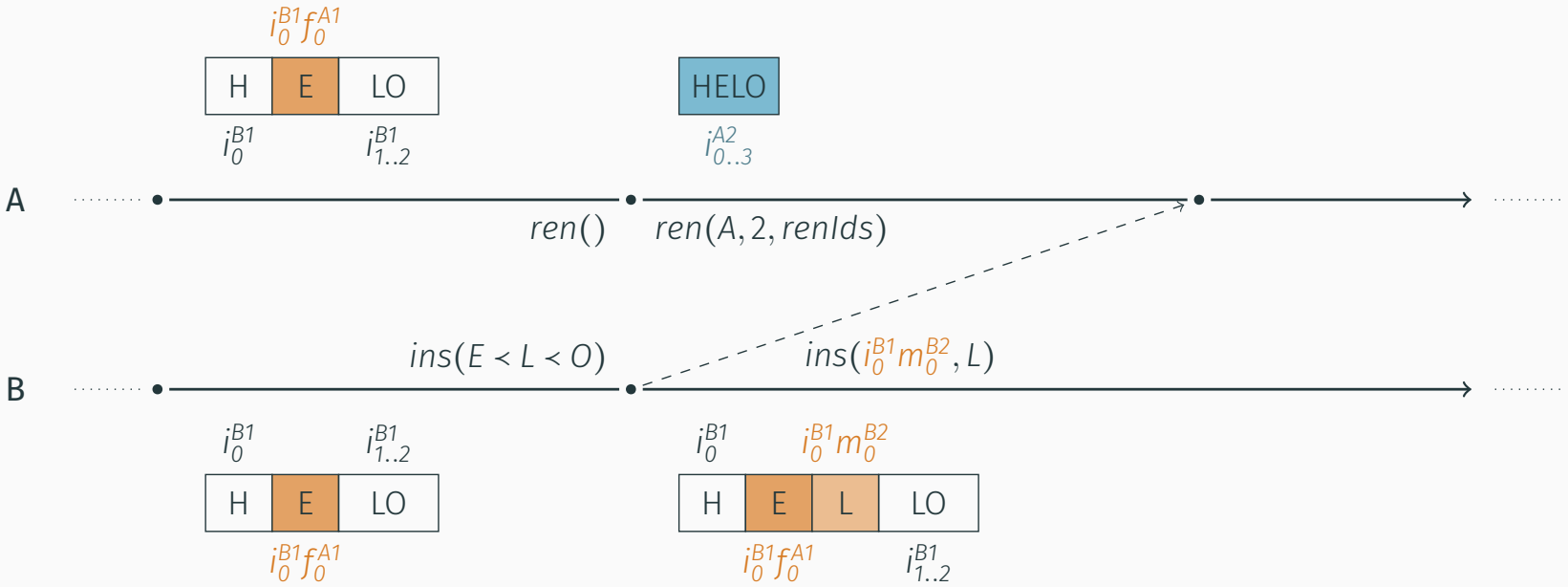
- Peuvent générer opérations concurrentes aux opérations *rename*

Interactions avec opérations *insert* et *remove* concurrentes



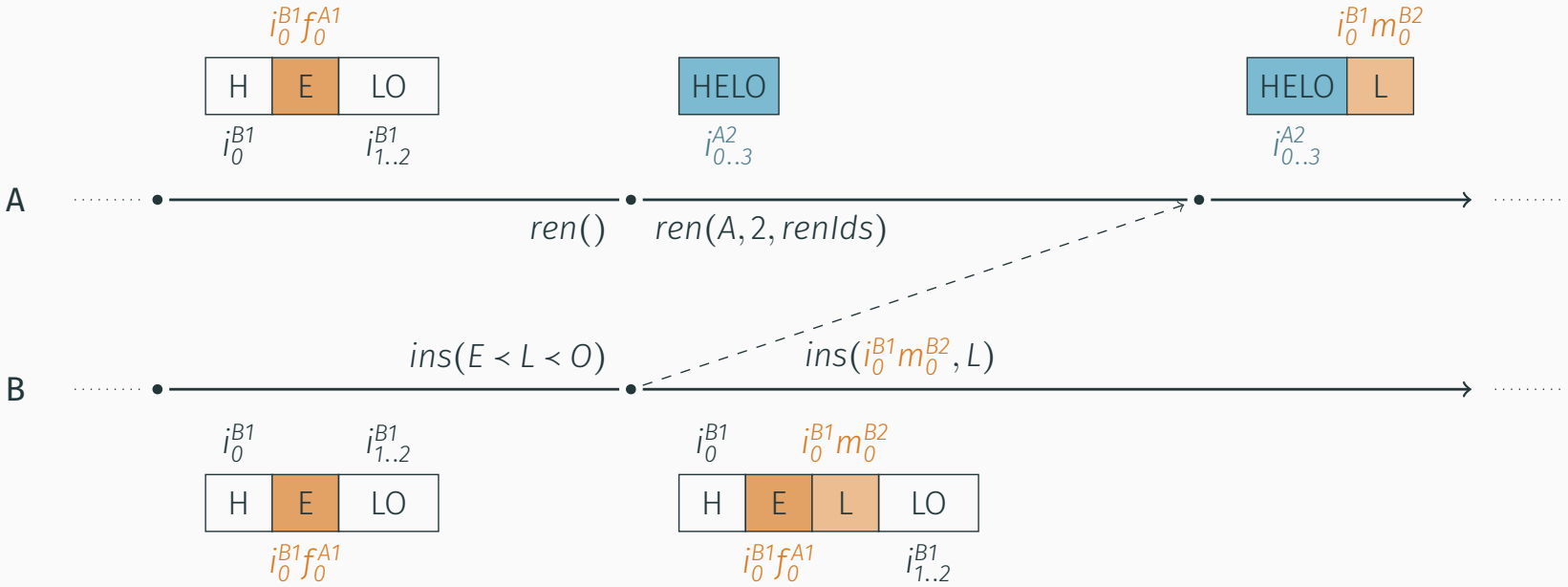
- Peuvent générer opérations concurrentes aux opérations *rename*

Interactions avec opérations *insert* et *remove* concurrentes



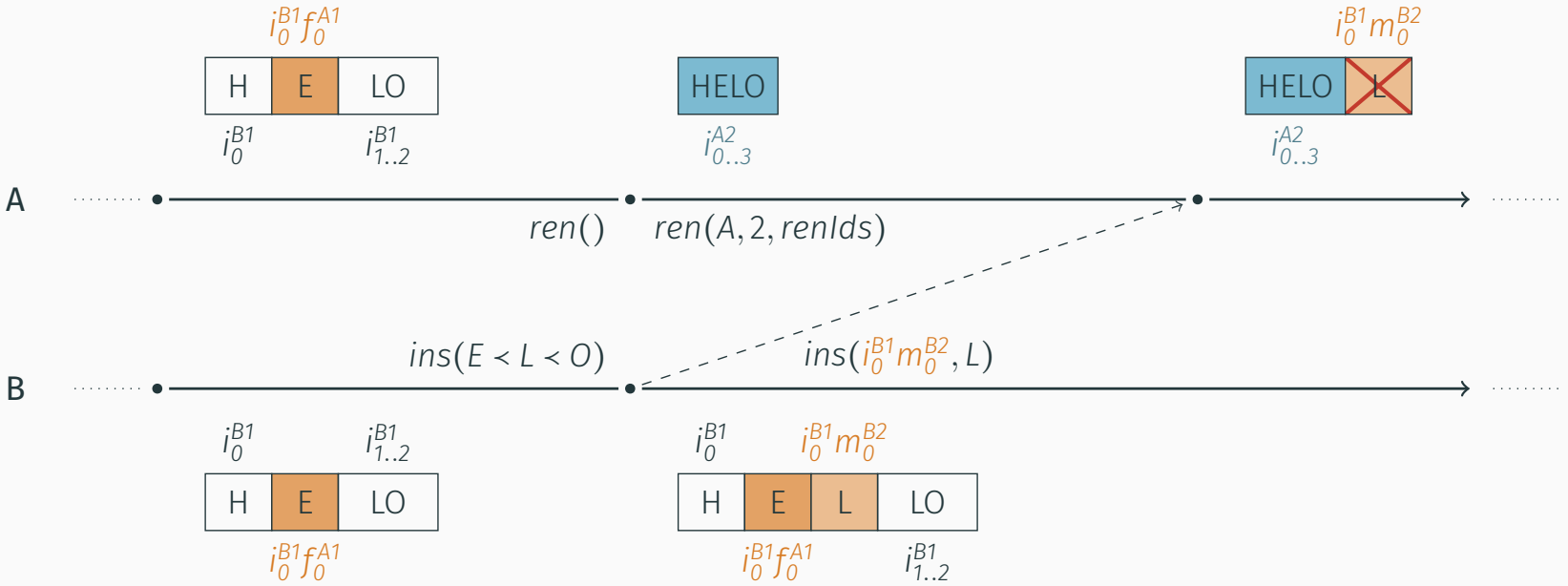
- Peuvent générer opérations concurrentes aux opérations *rename*

Interactions avec opérations *insert* et *remove* concurrentes



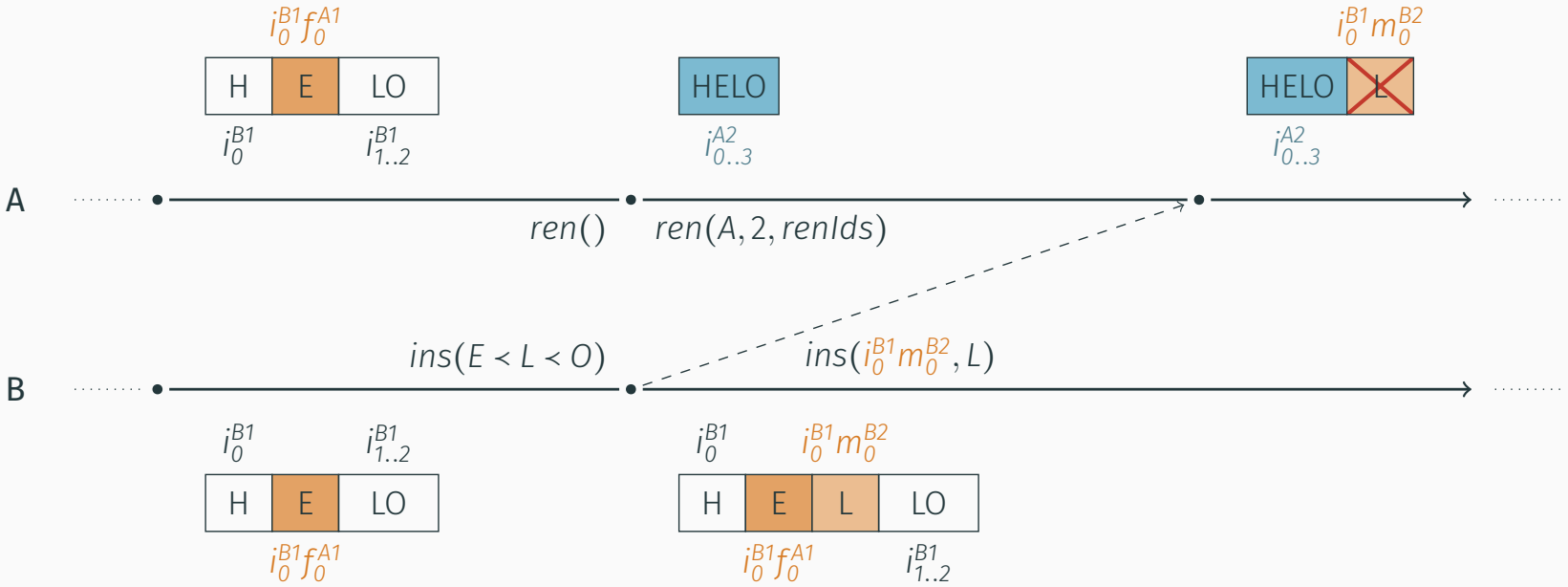
- Peuvent générer opérations concurrentes aux opérations *rename*

Interactions avec opérations *insert* et *remove* concurrentes



- Peuvent générer opérations concurrentes aux opérations *rename*
- Produisent anomalies si intégrées naïvement

Interactions avec opérations *insert* et *remove* concurrentes



- Peuvent générer opérations concurrentes aux opérations *rename*
- Produisent anomalies si intégrées naïvement

Nécessité d'un mécanisme dédié

Mécanisme de résolution de conflits

Besoins

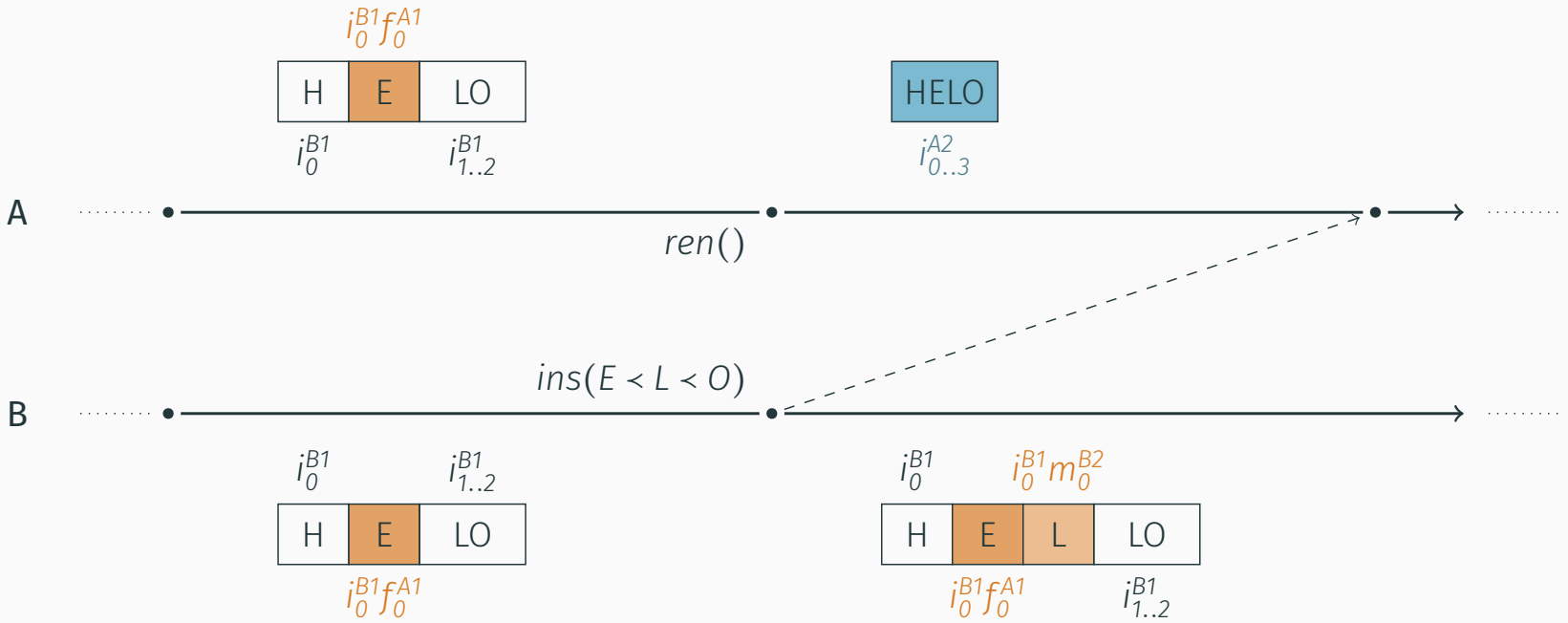
1. Détecter les opérations concurrentes aux opérations *rename*
2. Prendre en compte effet des opérations *rename* lors de l'intégration des opérations concurrentes

Mécanisme de résolution de conflits

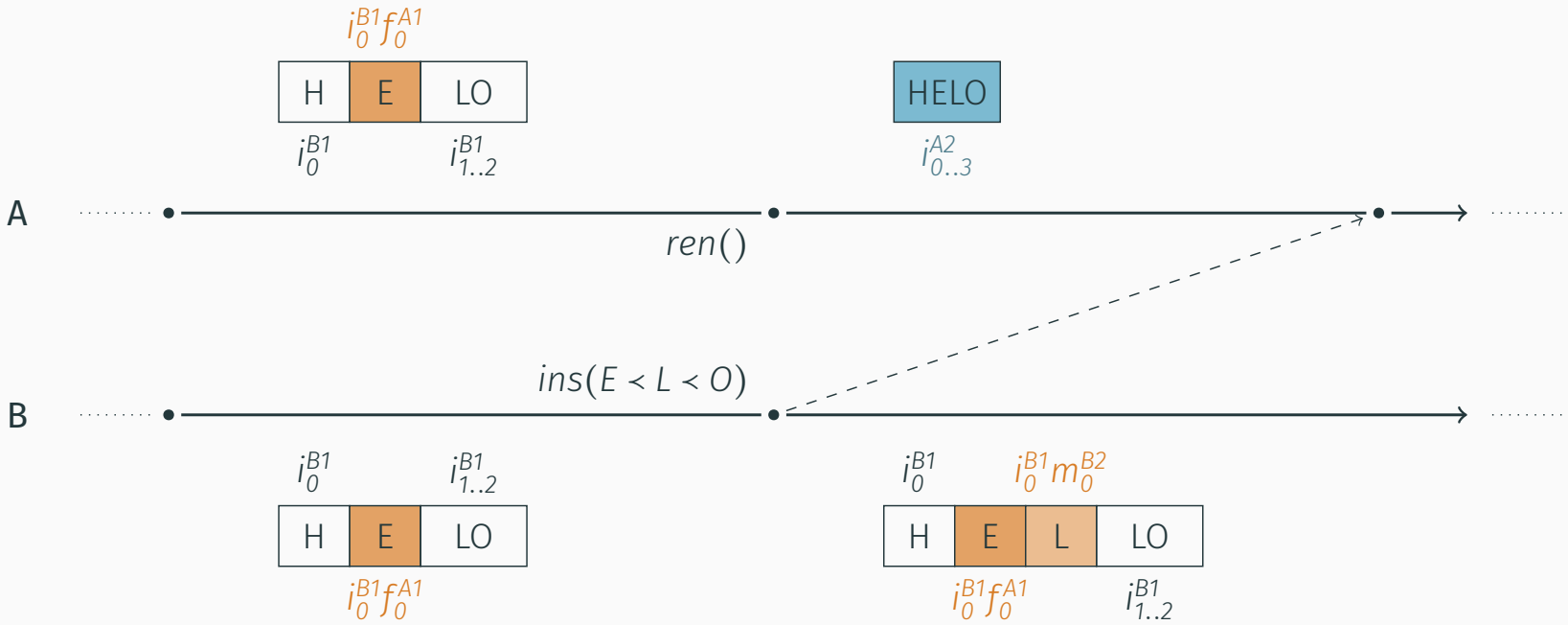
Besoins

1. Détecter les opérations concurrentes aux opérations *rename*
2. Prendre en compte effet des opérations *rename* lors de l'intégration des opérations concurrentes

Détection des opérations concurrentes à opération *rename*

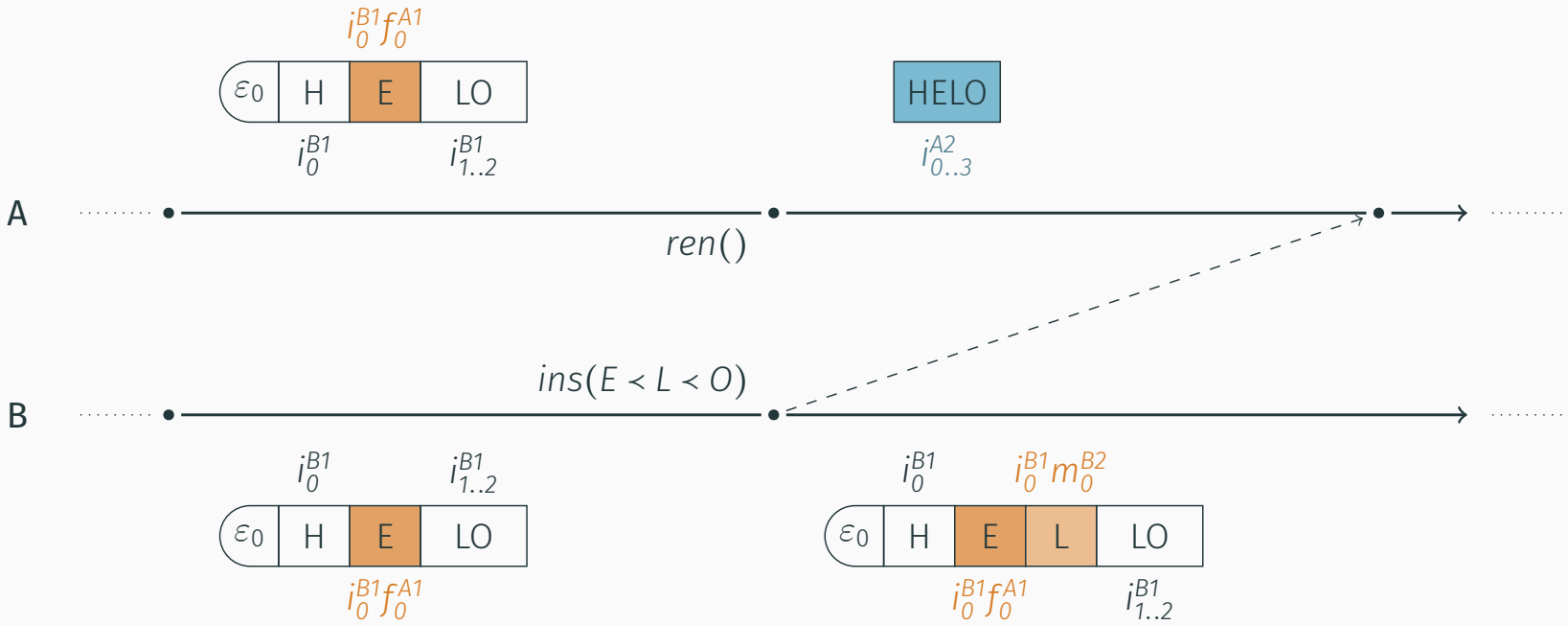


Détection des opérations concurrentes à opération *rename*



Ajout mécanisme d'époques

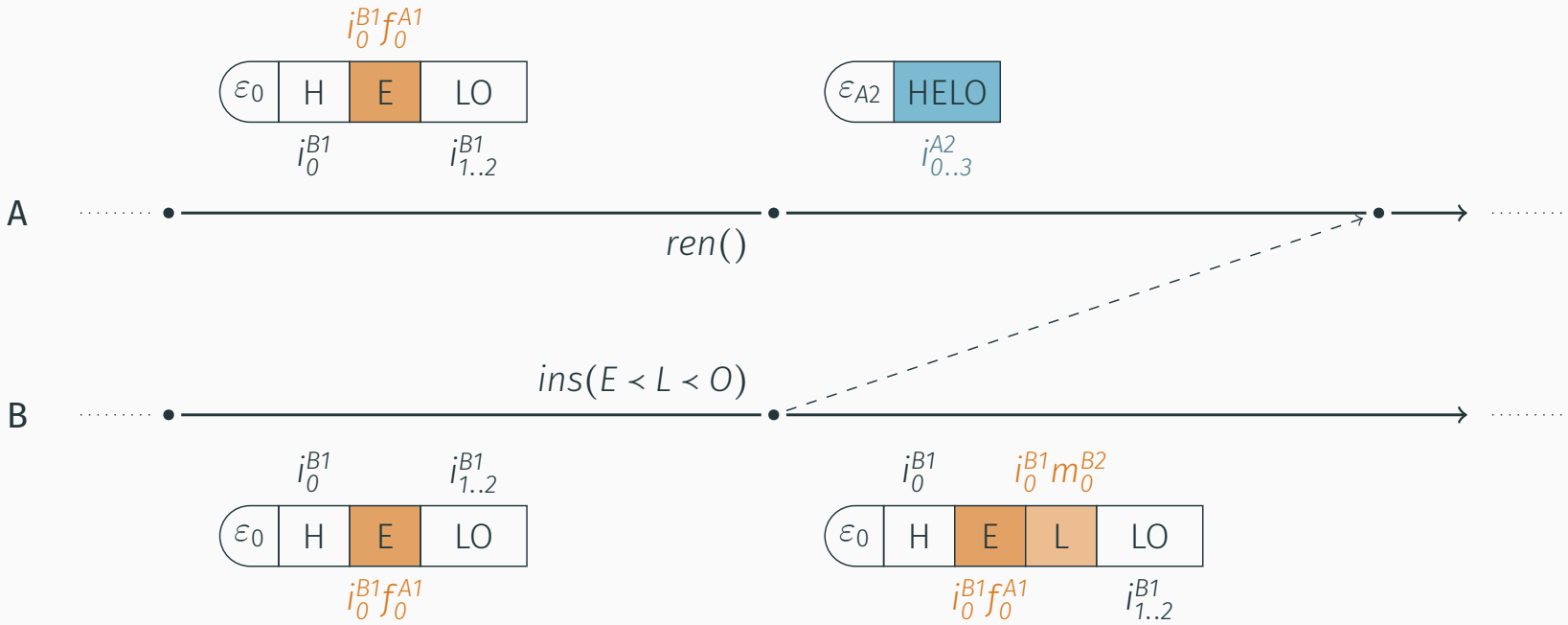
Détection des opérations concurrentes à opération *rename*



Ajout mécanisme d'époques

- Séquence commence à époque d'origine, notée ε_0

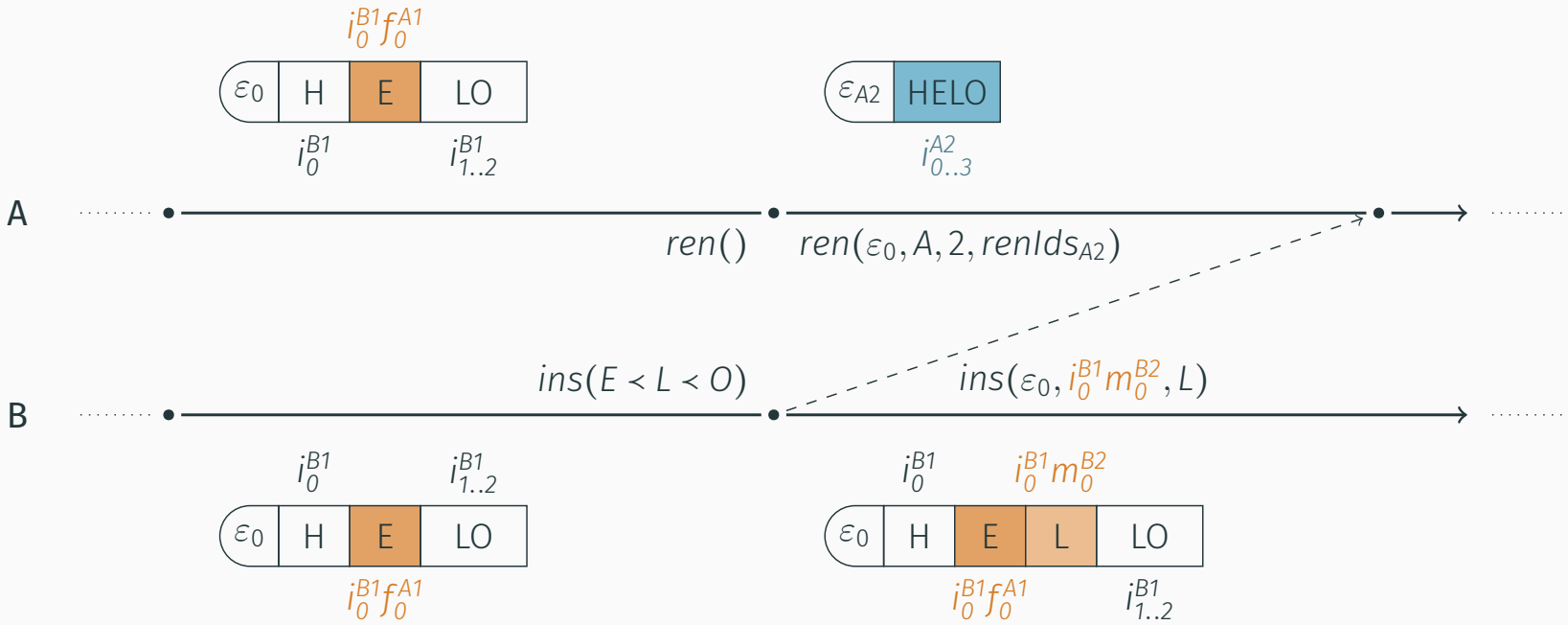
Détection des opérations concurrentes à opération *rename*



Ajout mécanisme d'époques

- Séquence commence à époque d'origine, notée ε_0
- *rename* font progresser à nouvelle époque, $\varepsilon_{nodeId\ nodeSeq}$

Détection des opérations concurrentes à opération *rename*



Ajout mécanisme d'époques

- Séquence commence à époque d'origine, notée ε_0
- *rename* font progresser à nouvelle époque, $\varepsilon_{nodeId\ nodeSeq}$
- Opérations labellisées avec époque de génération

Mécanisme de résolution de conflits

Besoins

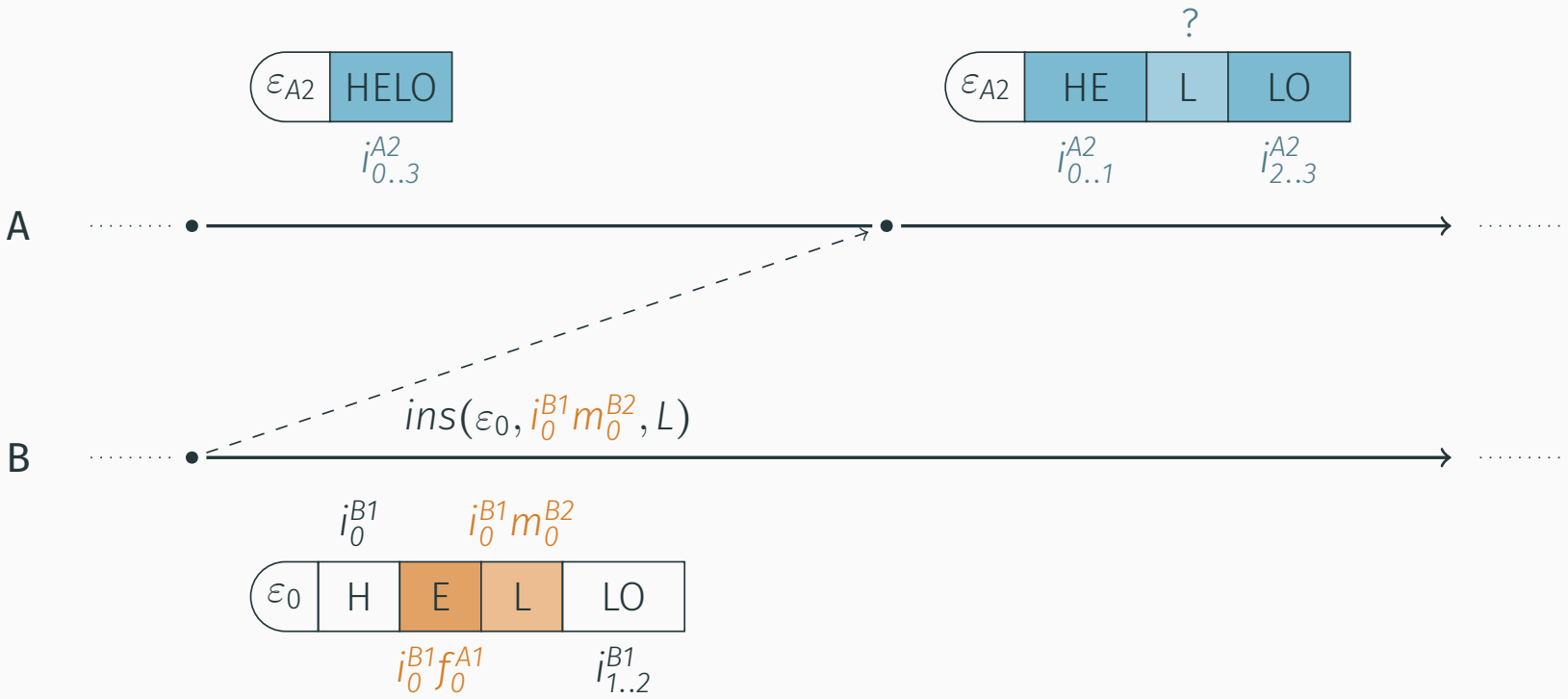
1. Détecter les opérations concurrentes aux opérations *rename*
2. Prendre en compte effet des opérations *rename* lors de l'intégration des opérations concurrentes

Mécanisme de résolution de conflits

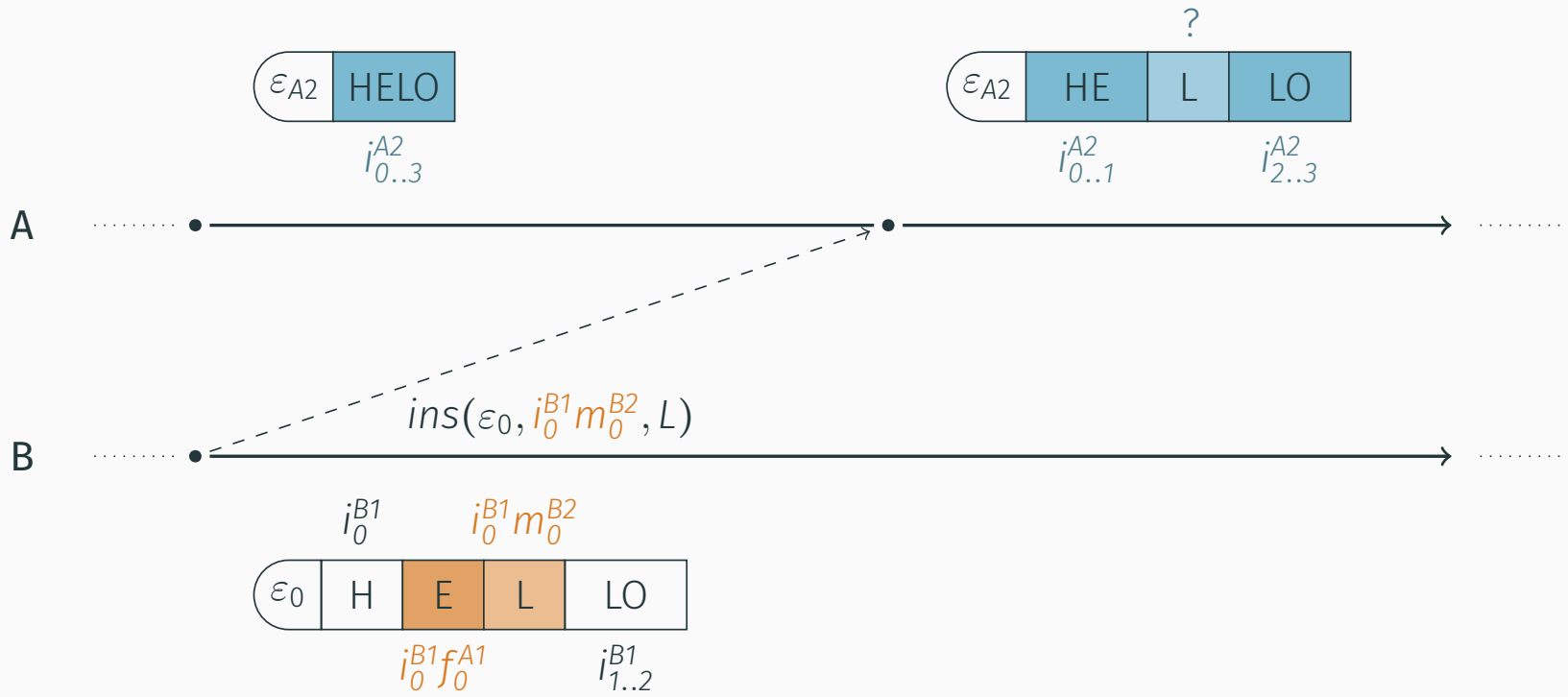
Besoins

1. Détecter les opérations concurrentes aux opérations *rename*
2. Prendre en compte effet des opérations *rename* lors de l'intégration des opérations concurrentes

Intégration des opérations *insert* et *remove* concurrentes

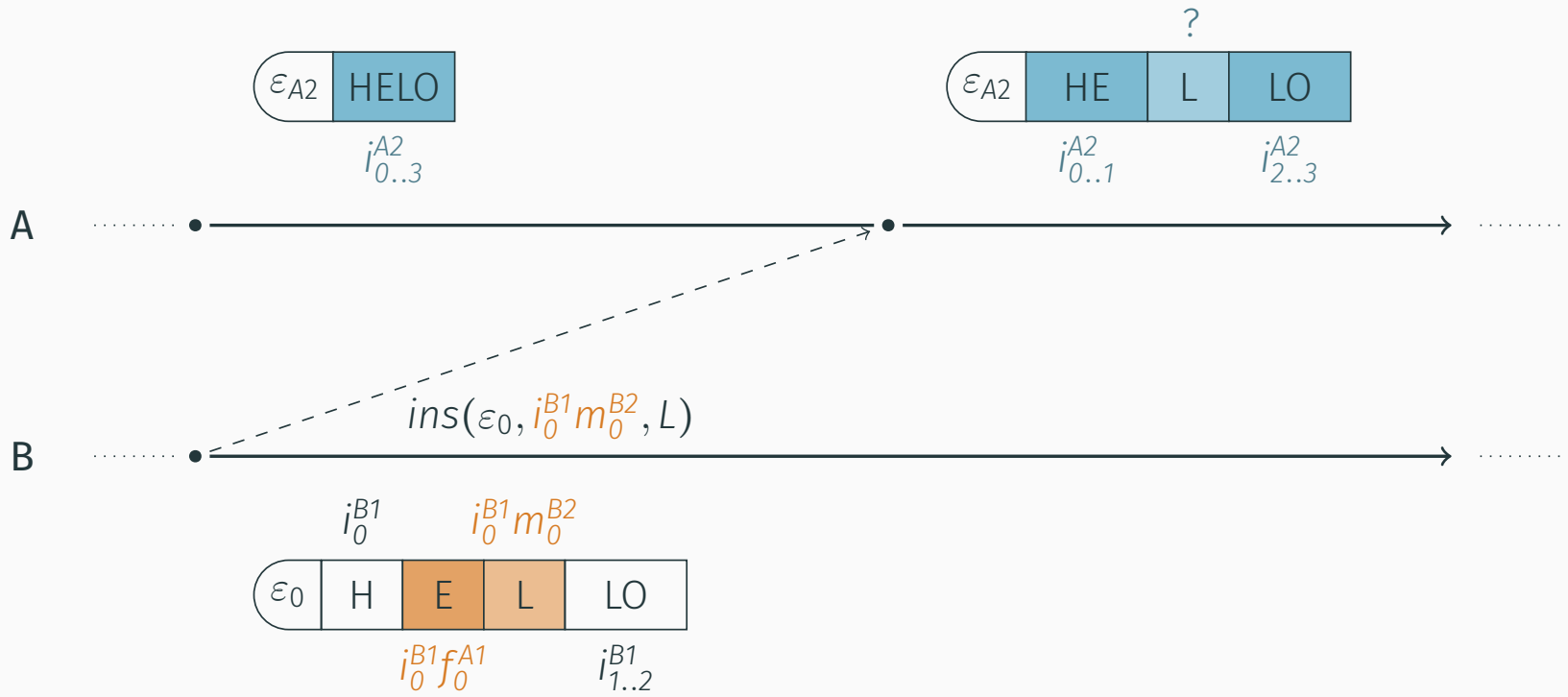


Intégration des opérations *insert* et *remove* concurrentes



Ajout d'un mécanisme de transformation des opérations *insert* et *remove* concurrentes

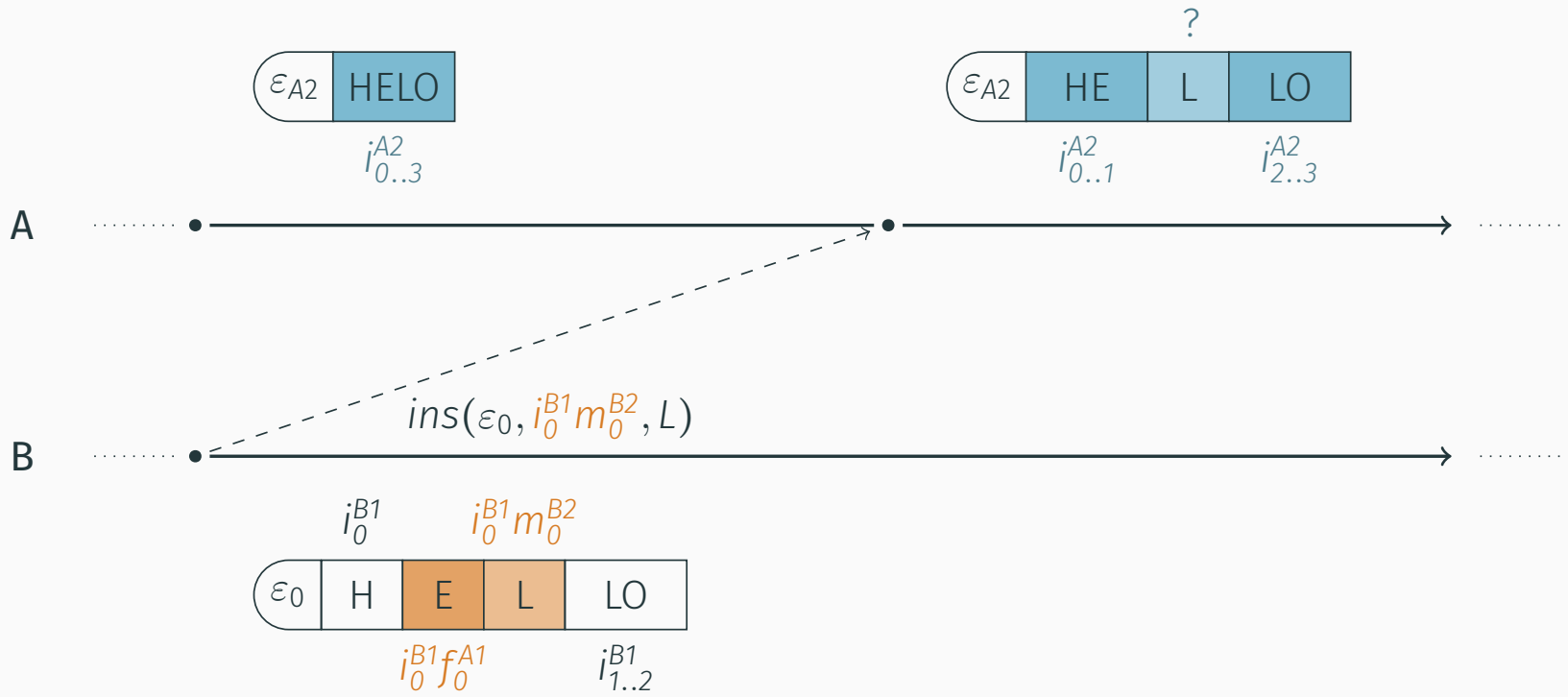
Intégration des opérations *insert* et *remove* concurrentes



Ajout d'un mécanisme de transformation des opérations *insert* et *remove* concurrentes

- Prend la forme de l'algorithme `renameId`

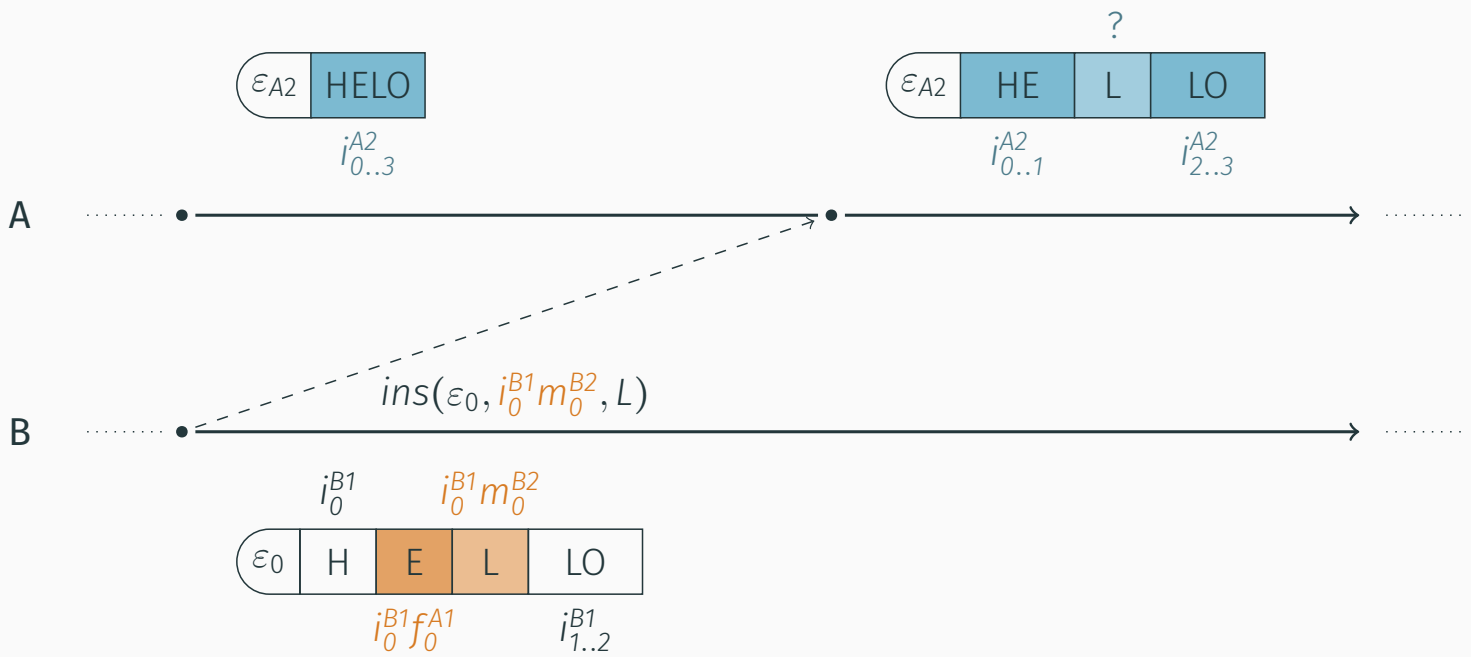
Intégration des opérations *insert* et *remove* concurrentes



Ajout d'un mécanisme de transformation des opérations *insert* et *remove* concurrentes

- Prend la forme de l'algorithme `renameId`
- Inclure l'effet de l'opération *rename* dans l'opération transformée

Exemple de `renameId`

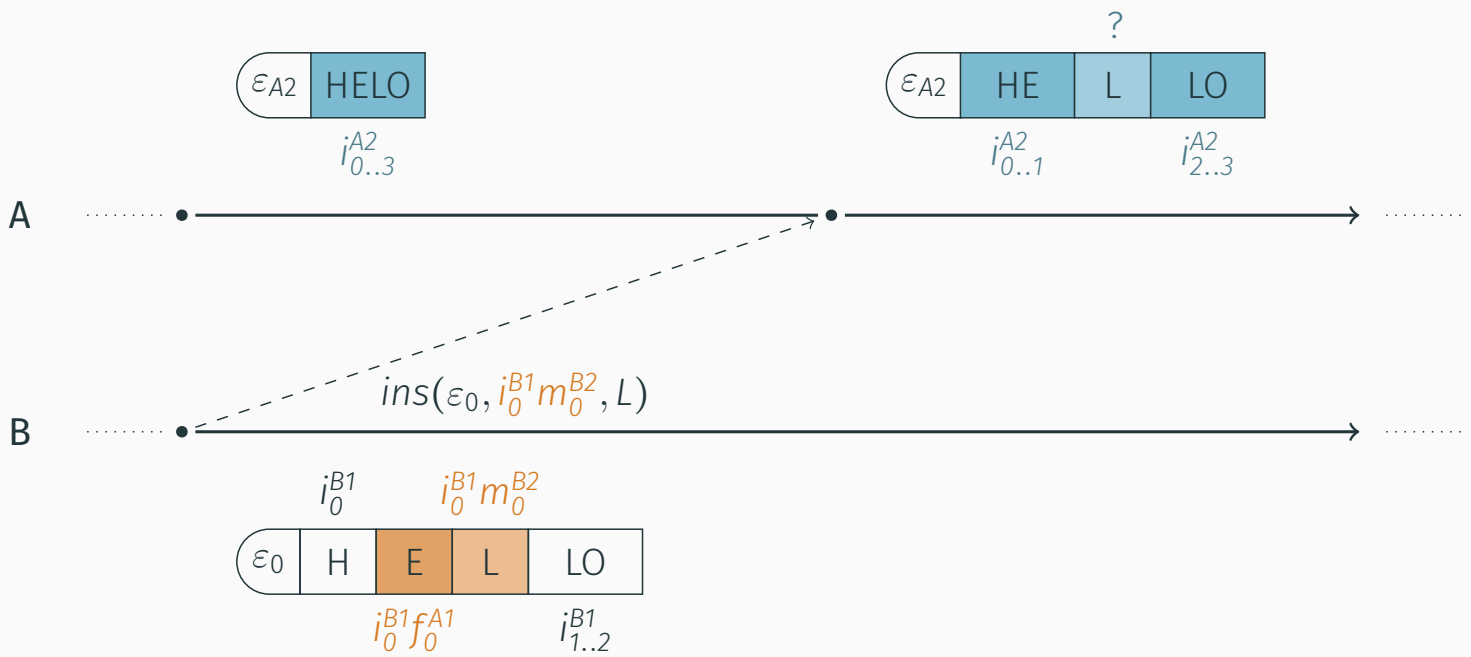


Rappel :

$$renIds_{A2} = [i^{B1}_0, i^{B1}_0 f^{A1}_0, i^{B1}_1, i^{B1}_2]$$

Exemple avec $i^{B1}_0 m^{B2}_0$

Exemple de `renameId`



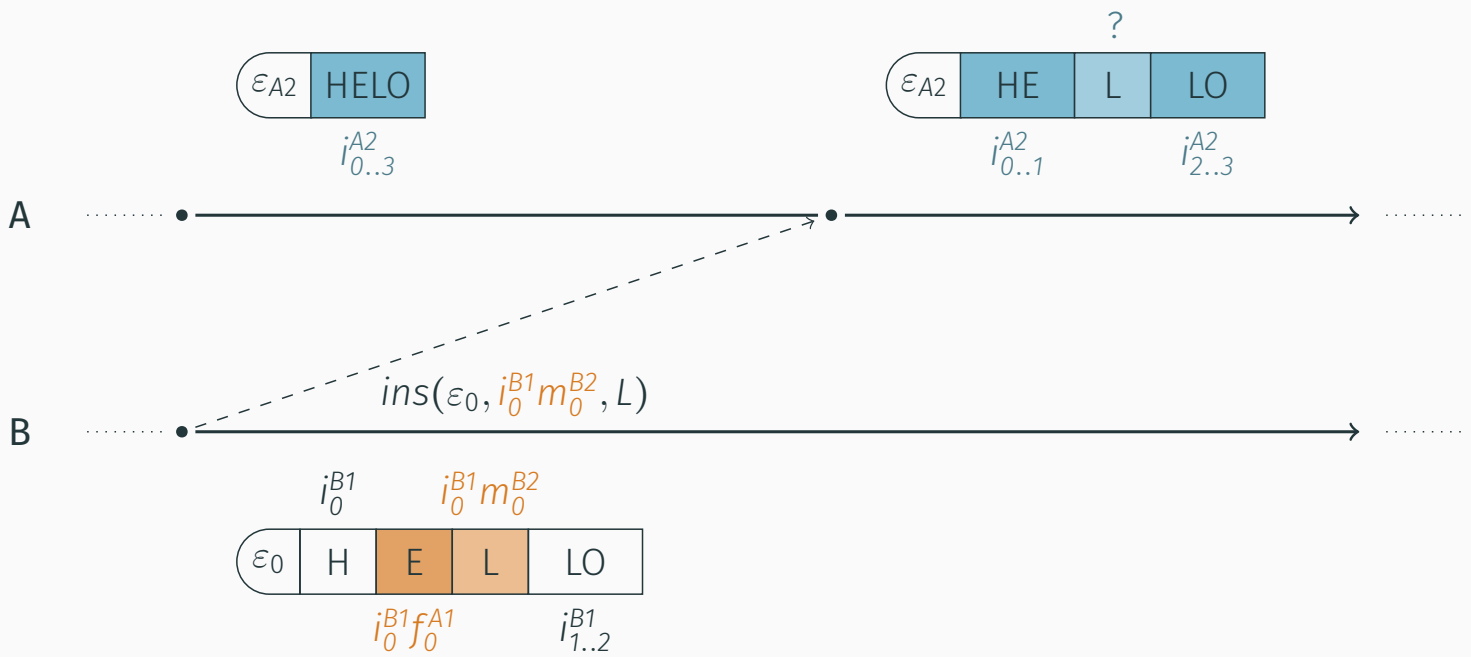
Rappel :

$$renIds_{A2} = [i^{B1}_0, i^{B1}_0 f^{A1}_0, i^{B1}_1, i^{B1}_2]$$

Exemple avec $i^{B1}_0 m^{B2}_0$

- Trouver son prédecesseur dans $renIds_{A2}$: $i^{B1}_0 f^{A1}_0$

Exemple de `renameId`



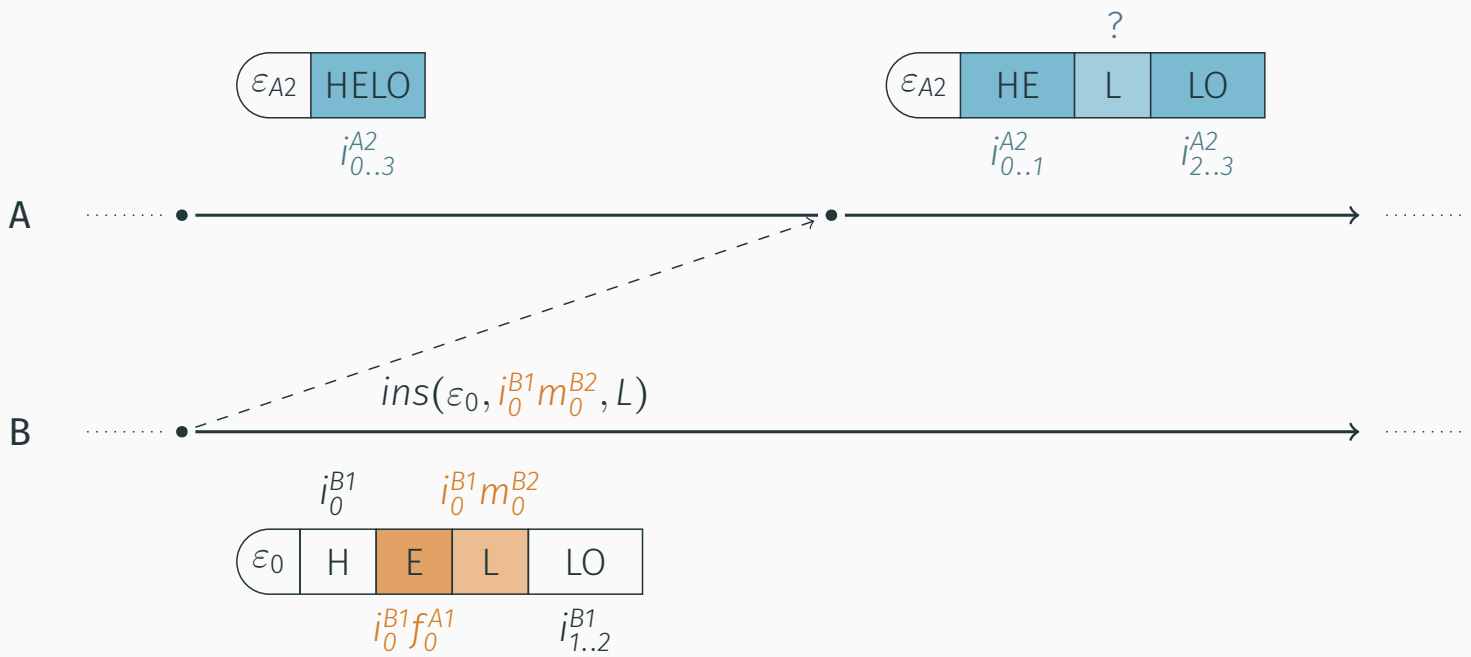
Rappel :

$$renIds_{A2} = [i^{B1}_0, i^{B1}_0 f^{A1}_0, i^{B1}_1, i^{B1}_2]$$

Exemple avec $i^{B1}_0 m^{B2}_0$

- Trouver son prédecesseur dans $renIds_{A2}$: $i^{B1}_0 f^{A1}_0$
- Utiliser son index (1) pour trouver équivalent à époque ε_{A2} : i^{A2}_1

Exemple de `renameId`



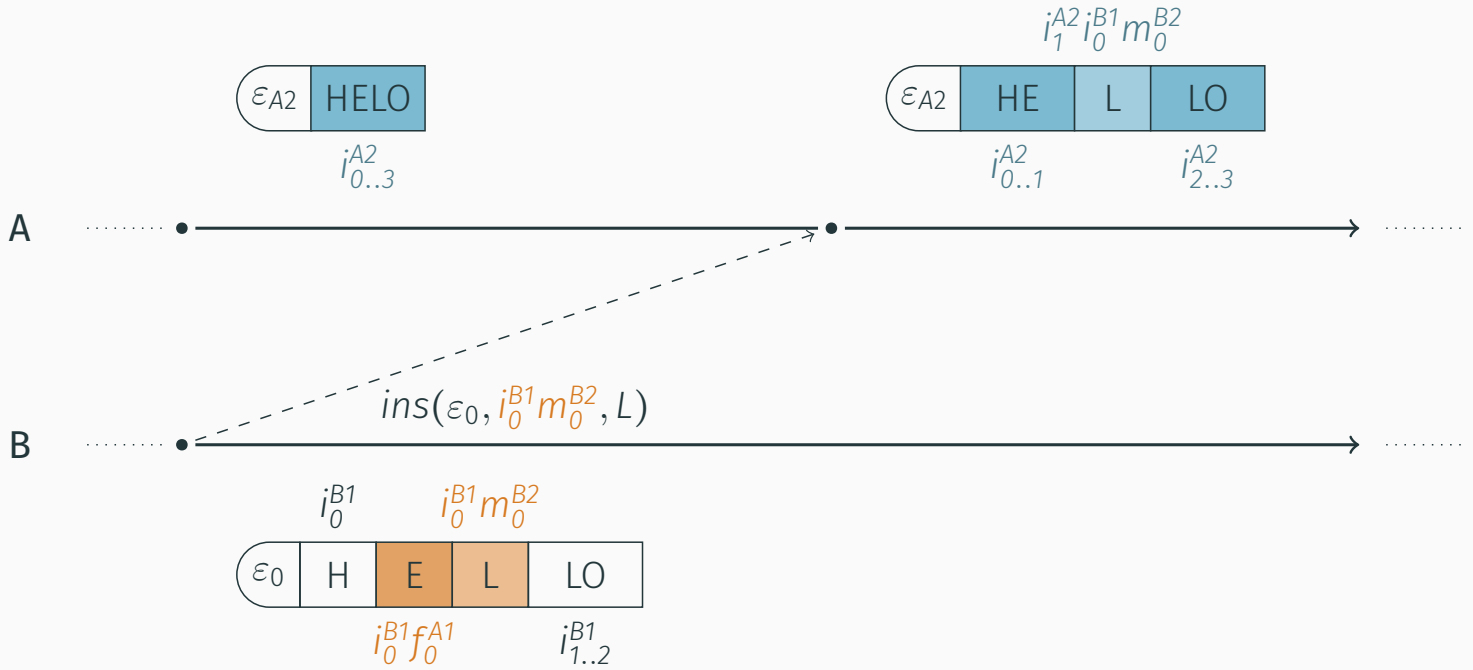
Rappel :

$$renIds_{A2} = [i^{B1}_0, i^{B1}_0 f^{A1}_0, i^{B1}_1, i^{B1}_2]$$

Exemple avec $i^{B1}_0 m^{B2}_0$

- Trouver son prédecesseur dans $renIds_{A2}$: $i^{B1}_0 f^{A1}_0$
- Utiliser son index (1) pour trouver équivalent à époque ε_{A2} : i^{A2}_1
- Préfixer $i^{B1}_0 m^{B2}_0$ par ce dernier : $i^{A2}_1 i^{B1}_0 m^{B2}_0$

Exemple de `renameId`



Rappel :

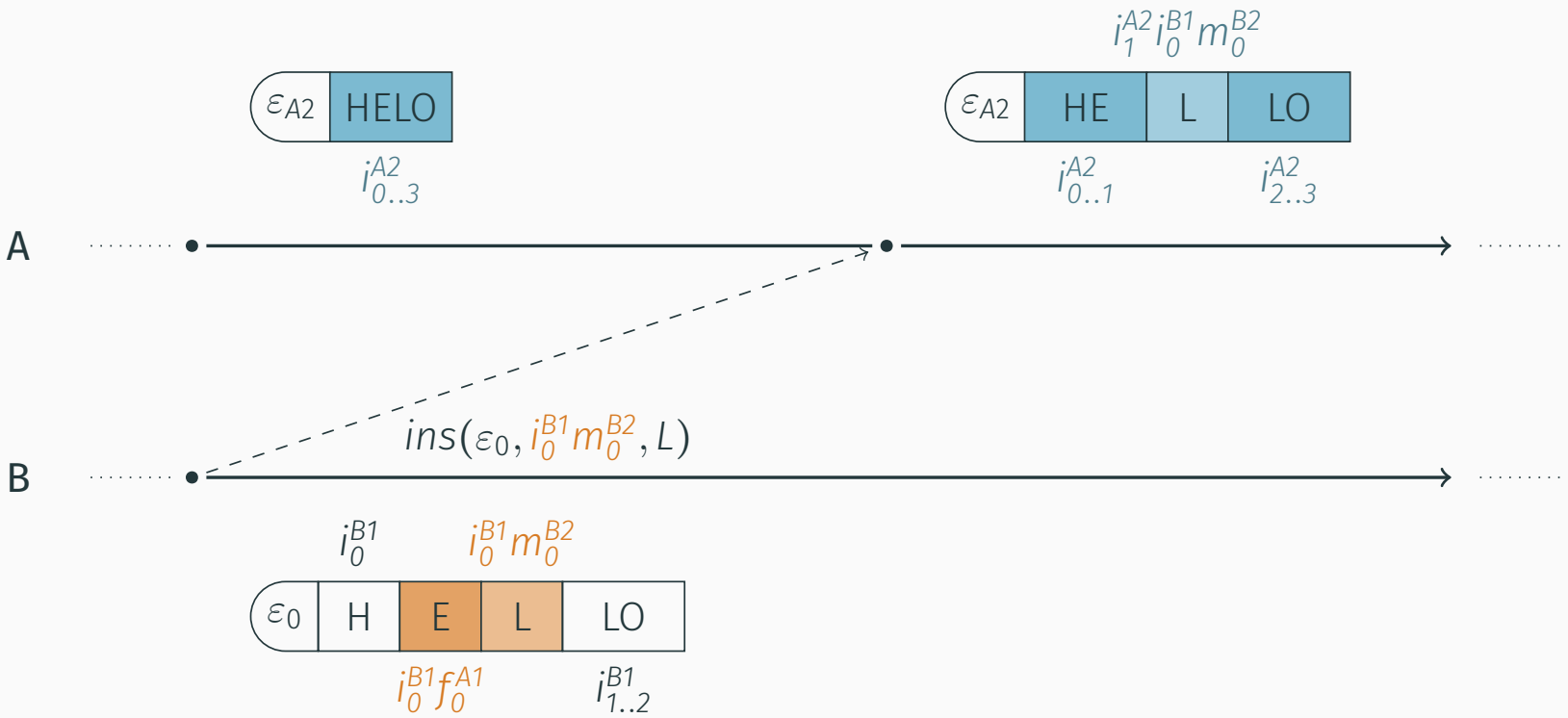
$$renIds_{A2} = [i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$$

Exemple avec $i_0^{B1} m_0^{B2}$

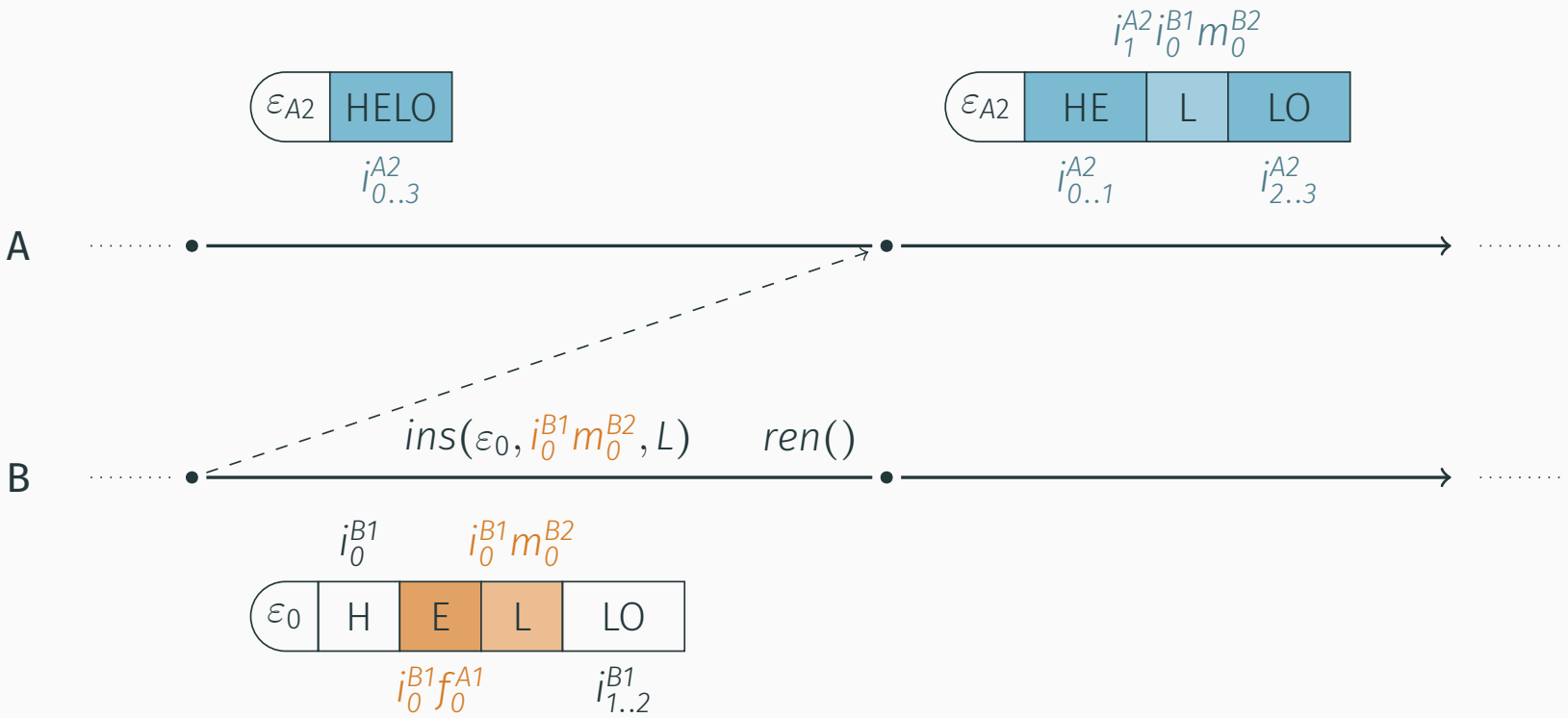
- Trouver son prédecesseur dans $renIds_{A2}$: $i_0^{B1} f_0^{A1}$
- Utiliser son index (1) pour trouver équivalent à époque ε_{A2} : i_1^{A2}
- Préfixer $i_0^{B1} m_0^{B2}$ par ce dernier : $i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2}$

Et en cas d’opérations *rename* concurrentes ?

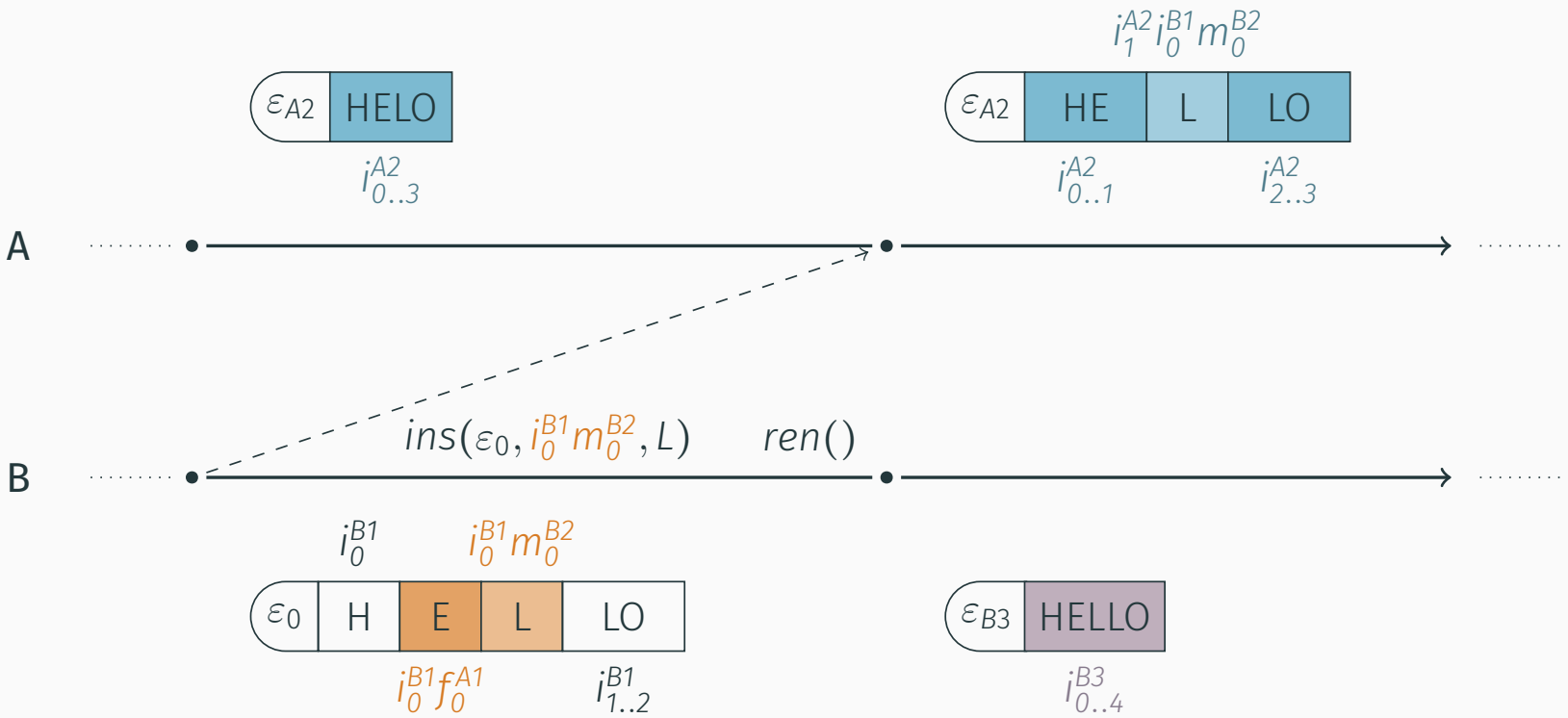
Opérations *rename* concurrentes



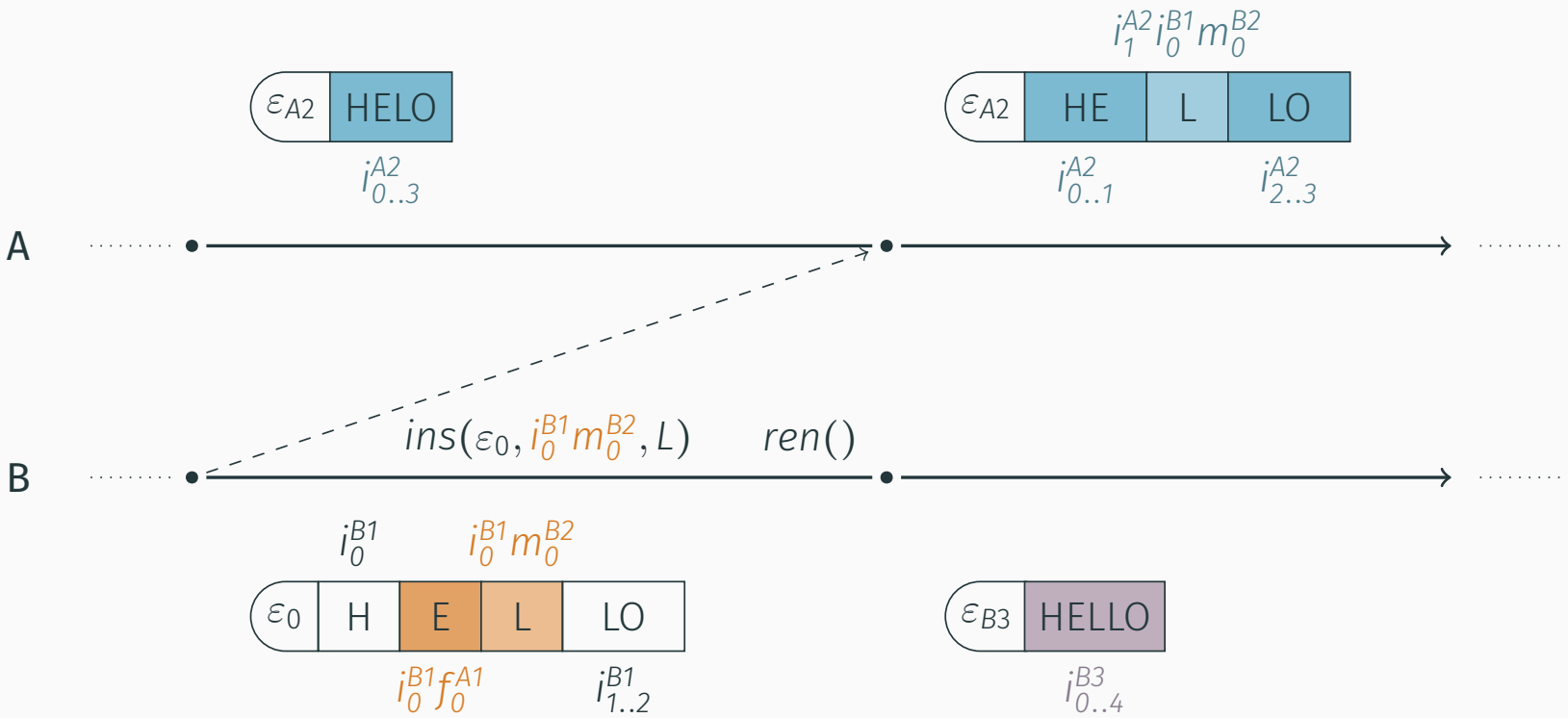
Opérations *rename* concurrentes



Opérations *rename* concurrentes

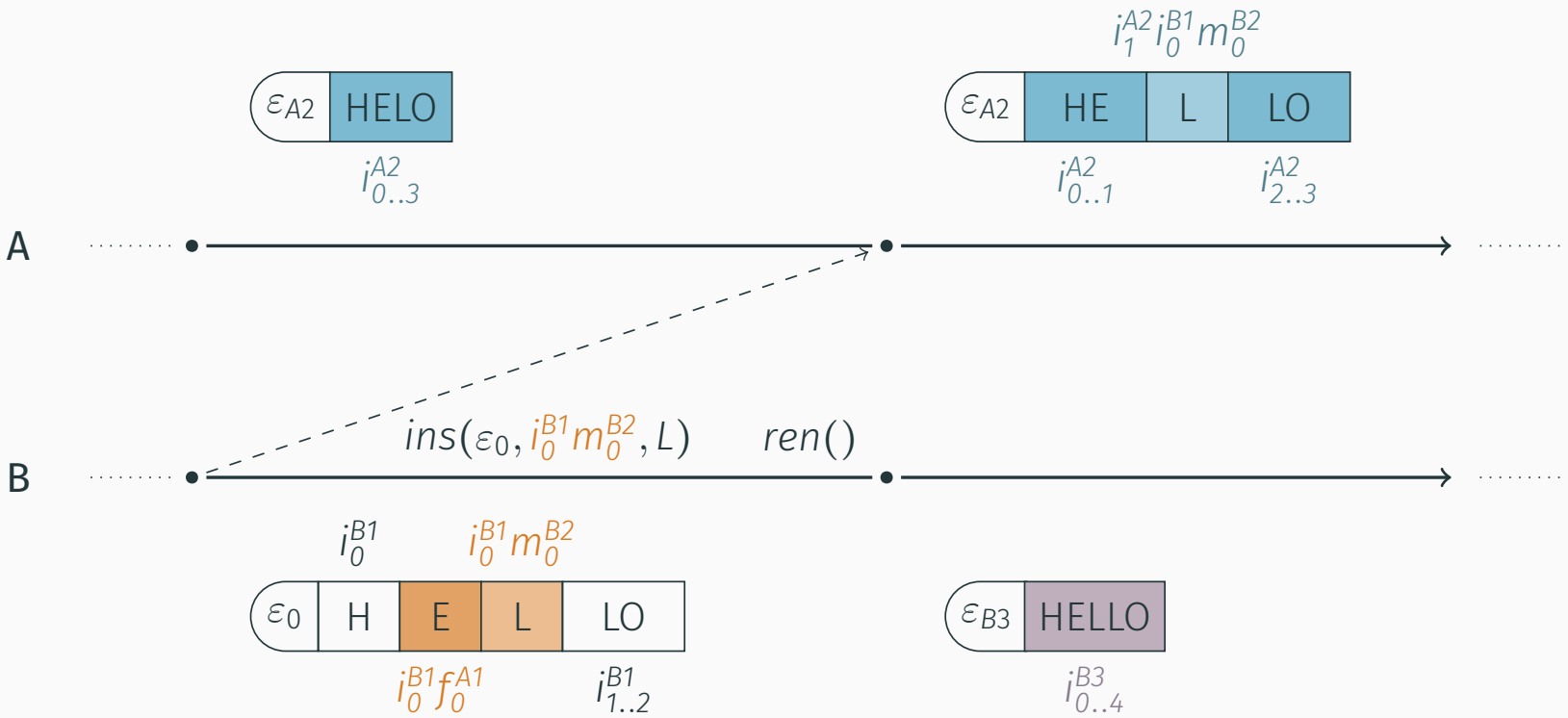


Opérations *rename* concurrentes



Comment faire converger les noeuds ?

Opérations *rename* concurrentes



Comment faire converger les noeuds ?

Besoin d'un mécanisme additionnel de résolution de conflits

Résolution de conflits entre opérations *rename* concurrentes

Observation

- Opérations *rename* sont des opérations systèmes...
- ...pas des opérations utilisateur-rices

Résolution de conflits entre opérations *rename* concurrentes

Observation

- Opérations *rename* sont des opérations systèmes...
- ...pas des opérations utilisateur-rices

Proposition

- Considérer une opération *rename* comme prioritaire...
- ...et ignorer les opérations *rename* en conflit avec elle

Algorithme d’intégration d’une opération *rename*

Intuition

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues
2. Choisir entre époque courante et nouvelle époque l'époque cible

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues
2. Choisir entre époque courante et nouvelle époque l'époque cible
3. Si changement d'époque cible

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues
2. Choisir entre époque courante et nouvelle époque l'époque cible
3. Si changement d'époque cible
   - 3.1 Calculer chemin entre époque courante et époque cible, et notamment leur Plus Proche Ancêtre Commun (PPAC)

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues
2. Choisir entre époque courante et nouvelle époque l'époque cible
3. Si changement d'époque cible
   - 3.1 Calculer chemin entre époque courante et époque cible, et notamment leur Plus Proche Ancêtre Commun (PPAC)
   - 3.2 Annuler l'effet des opérations *rename* de l'époque courante au PPAC

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues
2. Choisir entre époque courante et nouvelle époque l'époque cible
3. Si changement d'époque cible
   - 3.1 Calculer chemin entre époque courante et époque cible, et notamment leur Plus Proche Ancêtre Commun (PPAC)
   - 3.2 Annuler l'effet des opérations *rename* de l'époque courante au PPAC
   - 3.3 Appliquer l'effet des opérations *rename* du PPAC à l'époque cible

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

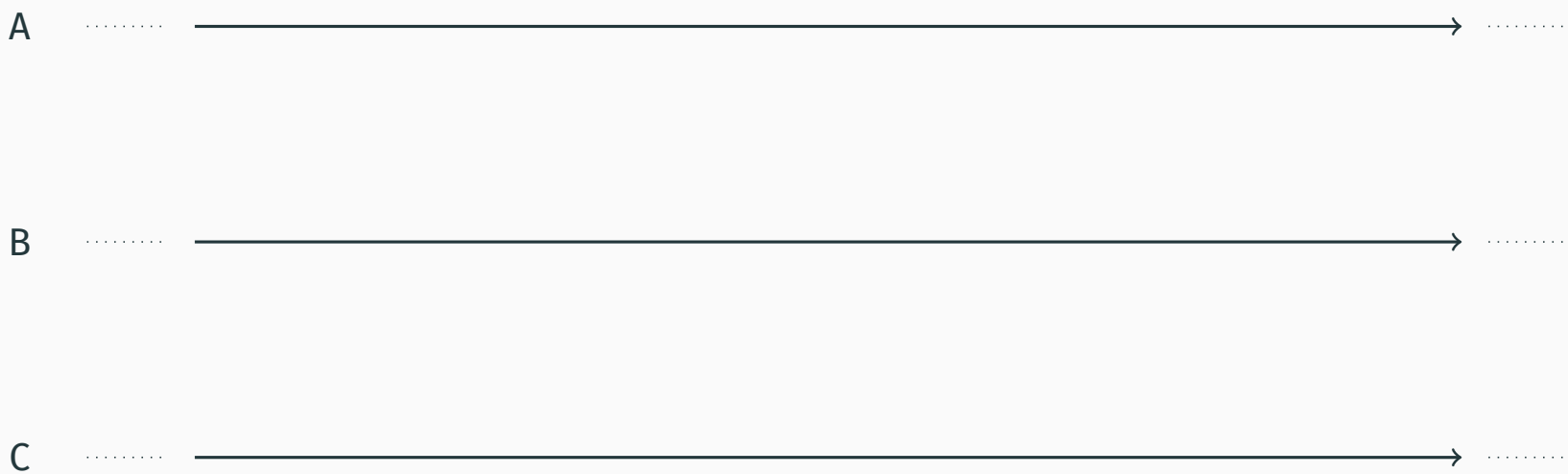
1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues
2. Choisir entre époque courante et nouvelle époque l'époque cible
3. Si changement d'époque cible
   - 3.1 Calculer chemin entre époque courante et époque cible, et notamment leur Plus Proche Ancêtre Commun (PPAC)
   - 3.2 Annuler l'effet des opérations *rename* de l'époque courante au PPAC
   - 3.3 Appliquer l'effet des opérations *rename* du PPAC à l'époque cible

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

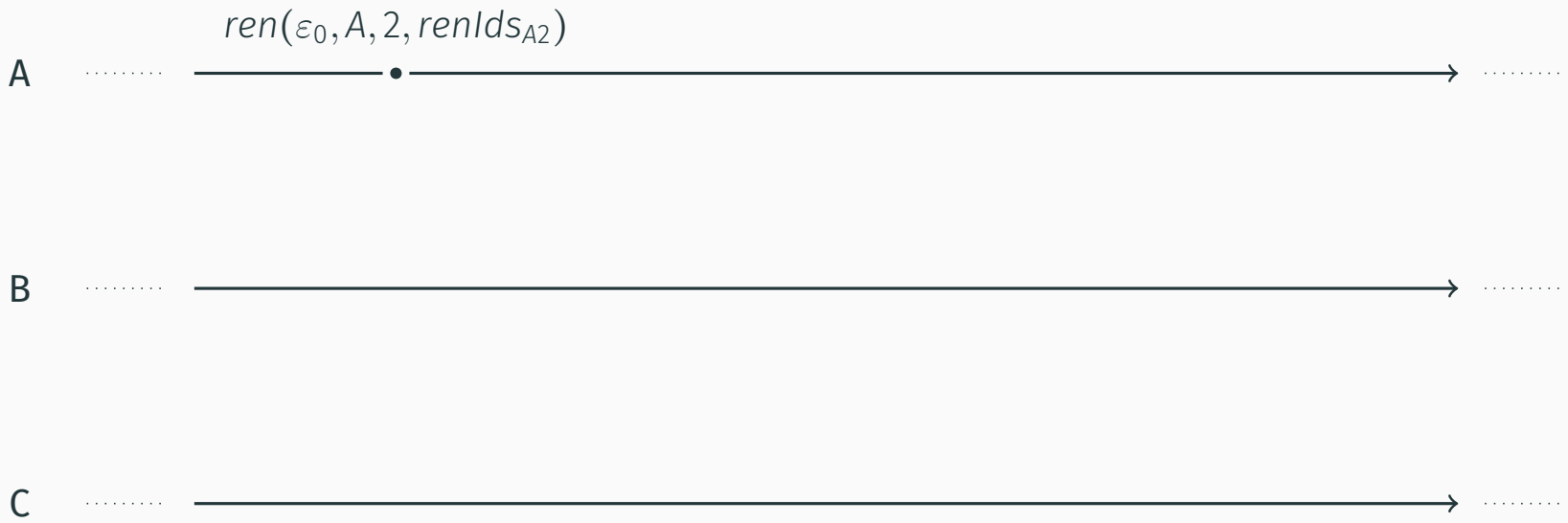
1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues
2. Choisir entre époque courante et nouvelle époque l'époque cible
3. Si changement d'époque cible
   - 3.1 Calculer chemin entre époque courante et époque cible, et notamment leur Plus Proche Ancêtre Commun (PPAC)
   - 3.2 Annuler l'effet des opérations *rename* de l'époque courante au PPAC
   - 3.3 Appliquer l'effet des opérations *rename* du PPAC à l'époque cible

Choisir une époque comme époque cible

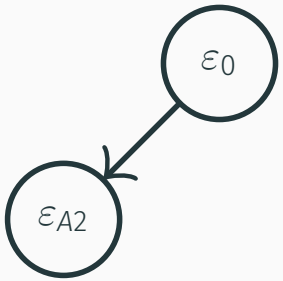


Arbre des époques

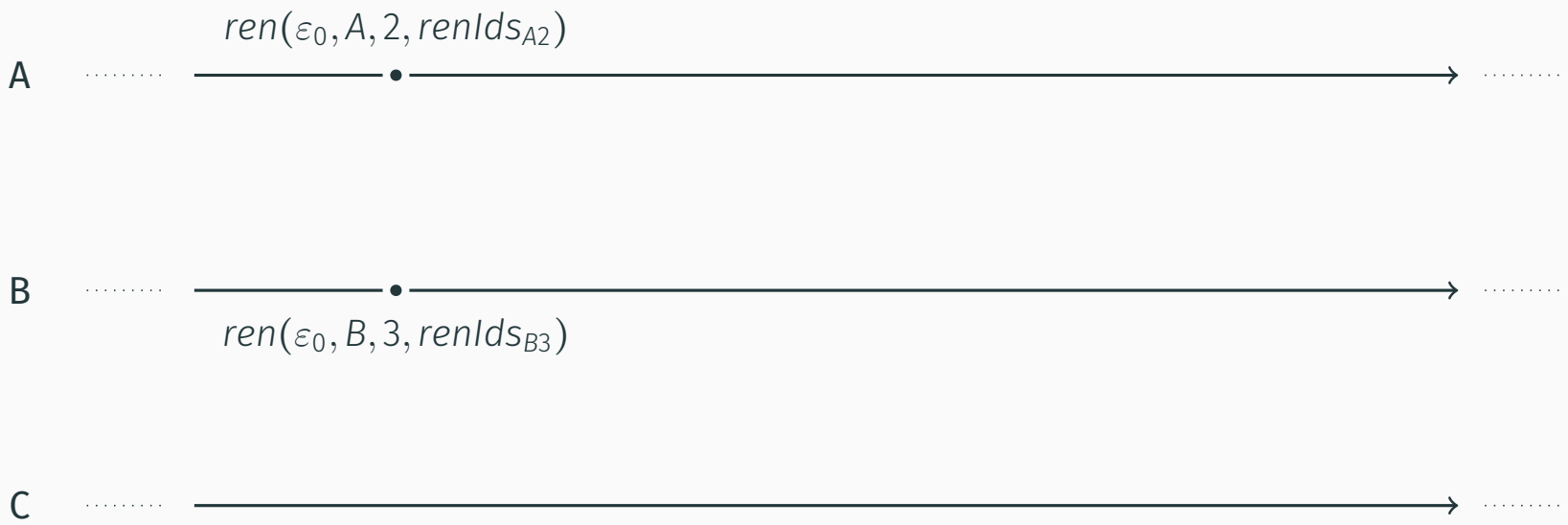
Choisir une époque comme époque cible



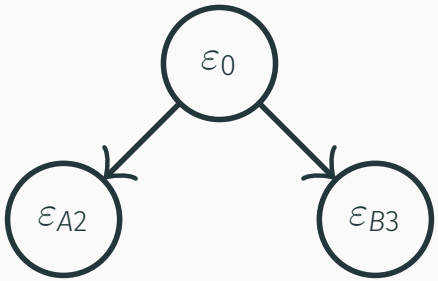
Arbre des époques



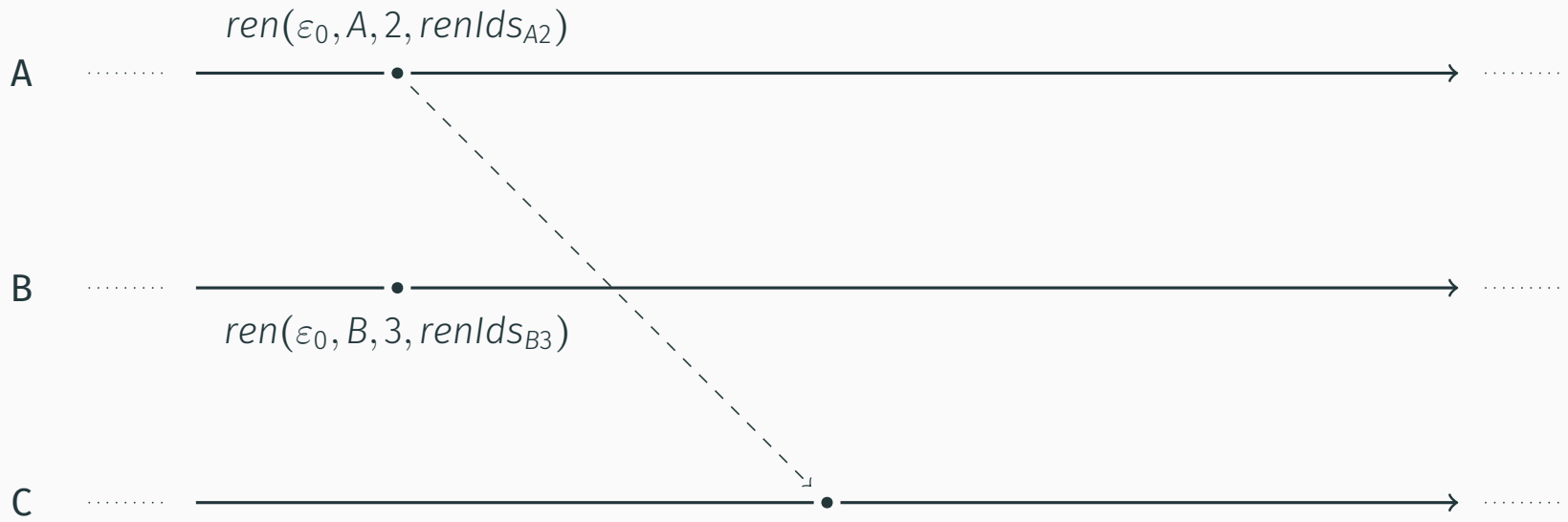
Choisir une époque comme époque cible



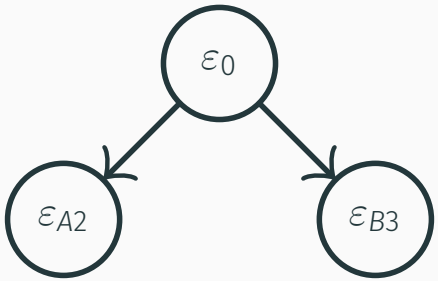
Arbre des époques



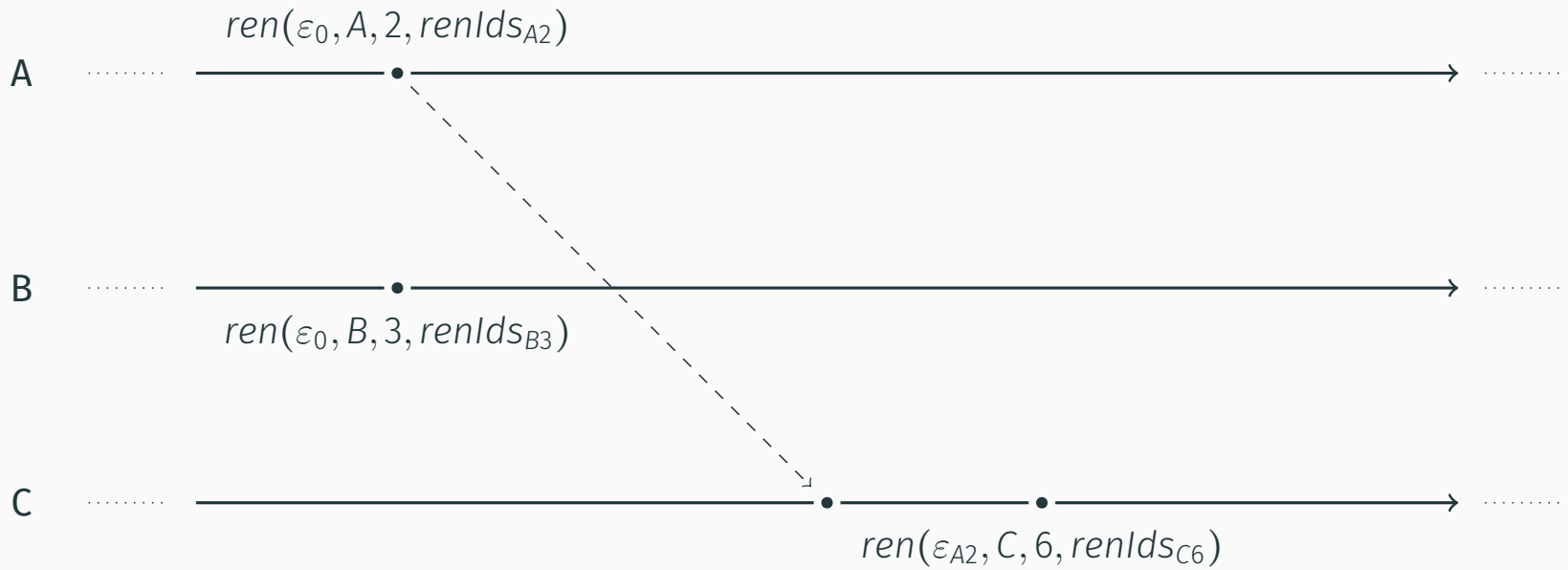
Choisir une époque comme époque cible



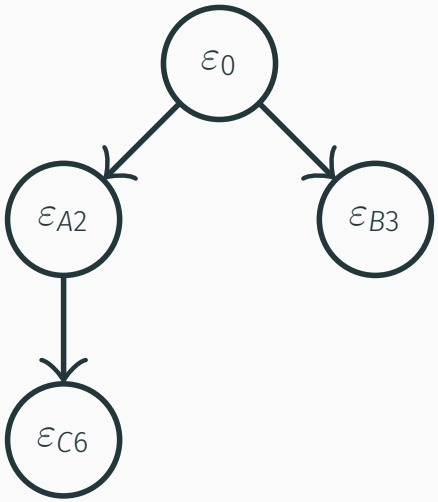
Arbre des époques



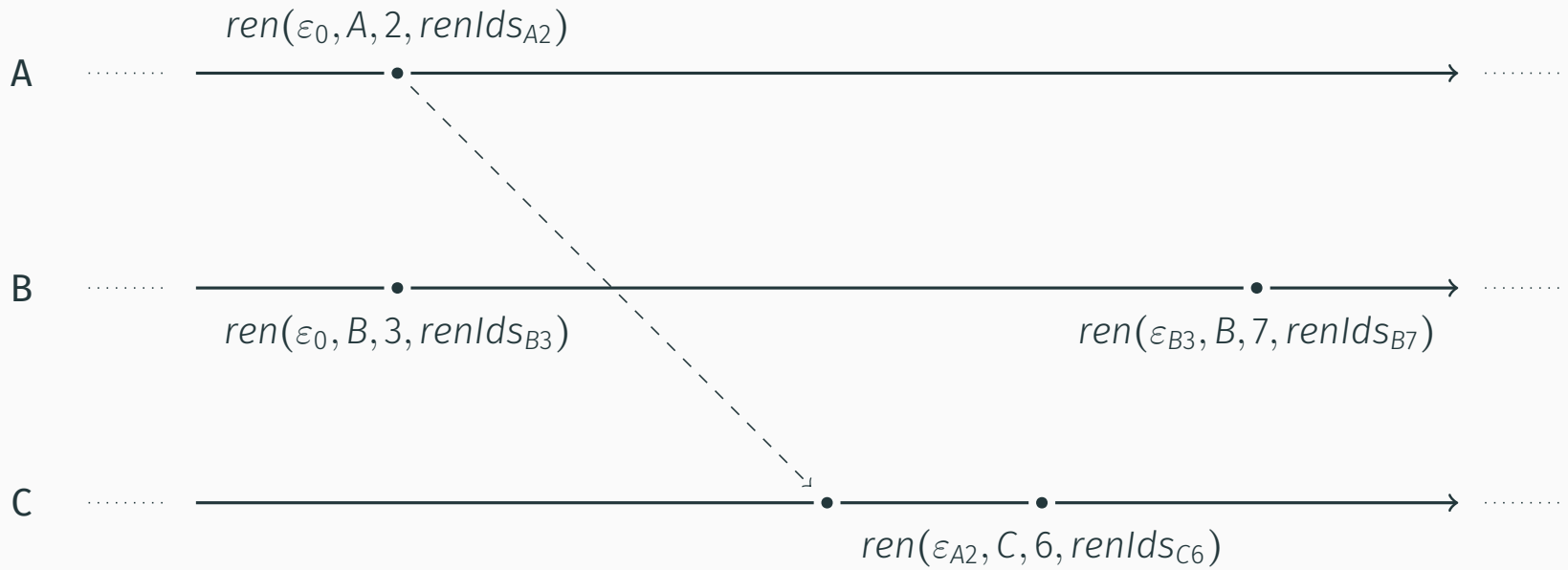
Choisir une époque comme époque cible



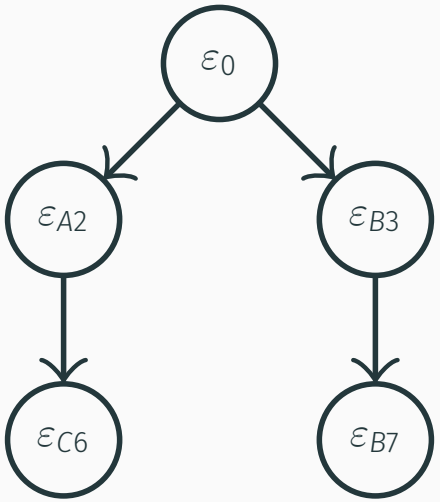
Arbre des époques



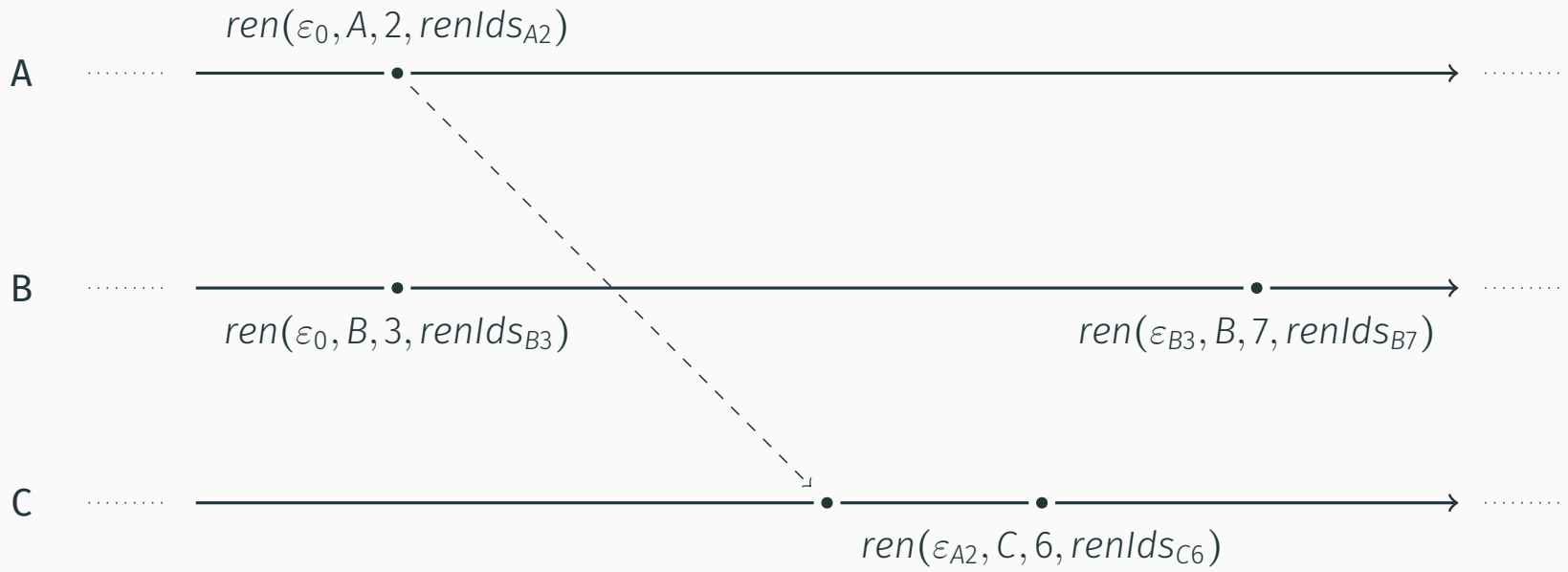
Choisir une époque comme époque cible



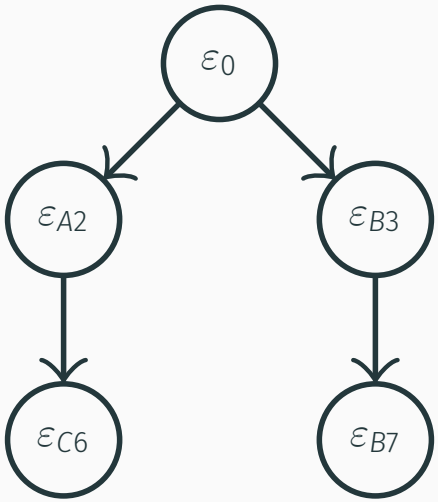
Arbre des époques



Choisir une époque comme époque cible

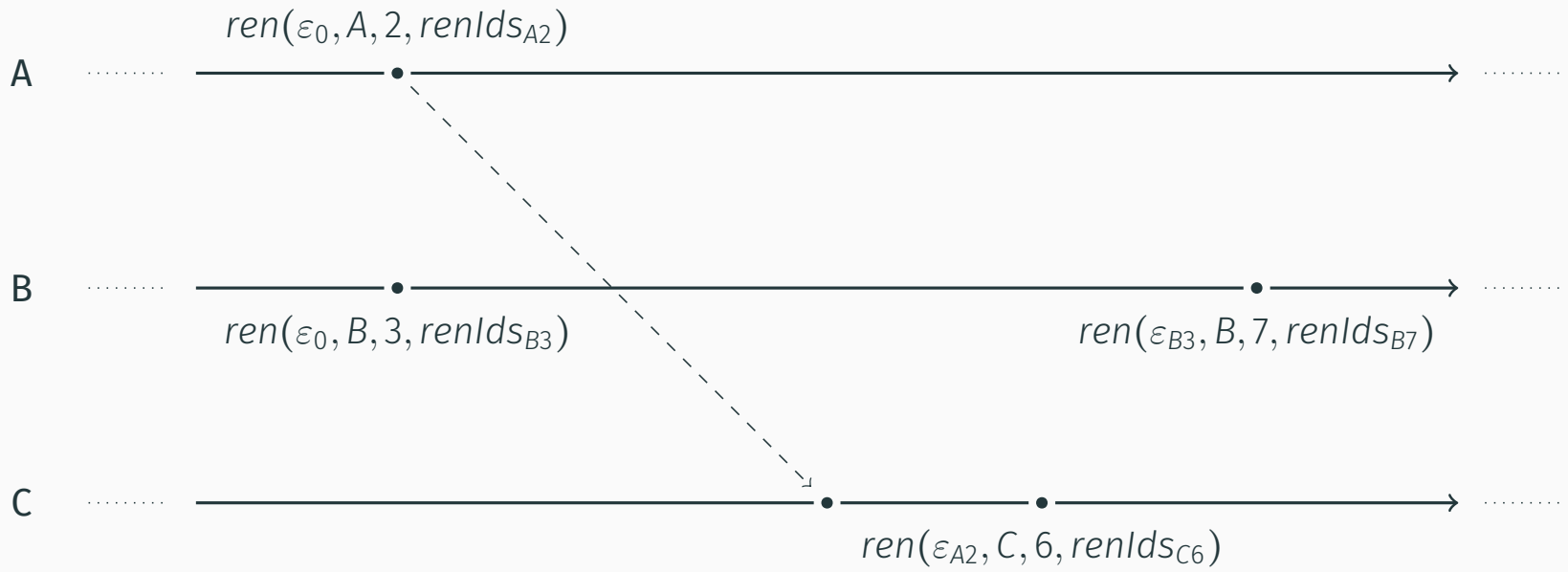


Arbre des époques

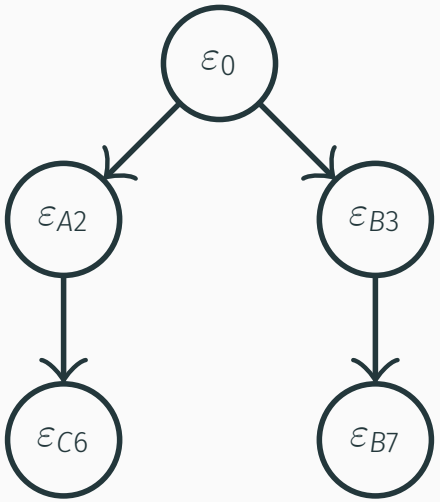


Comment choisir ?

Choisir une époque comme époque cible



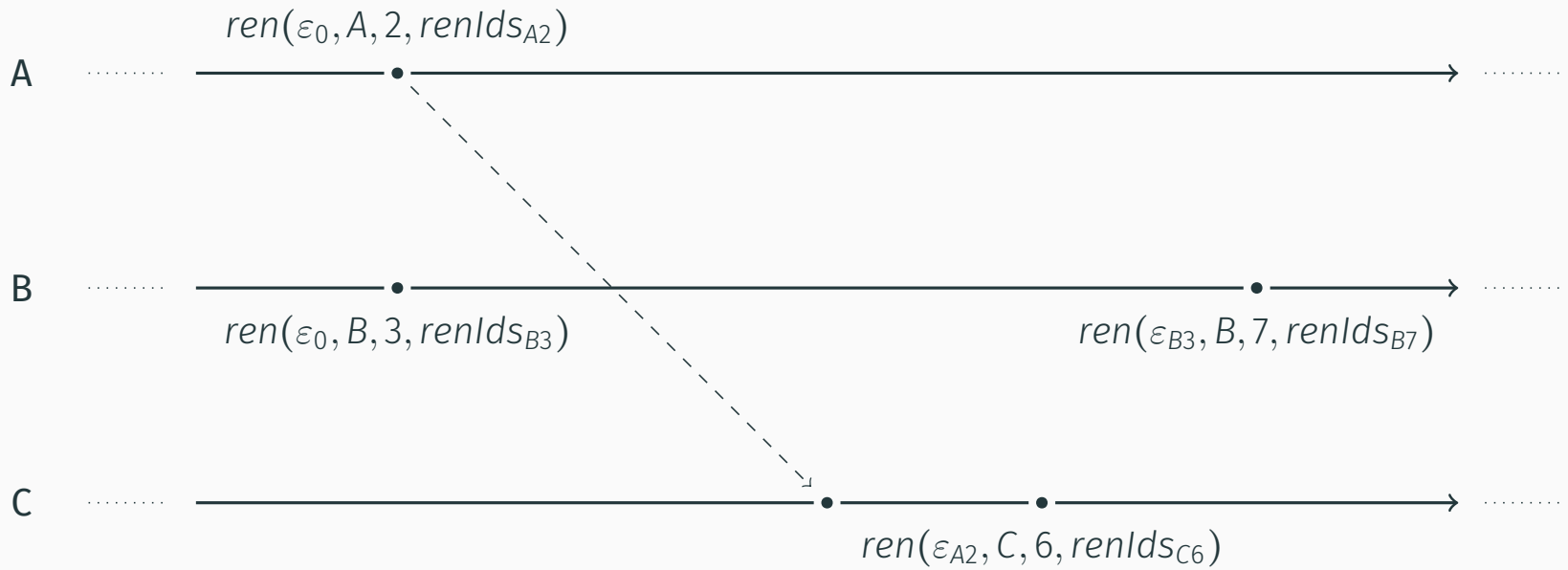
Arbre des époques



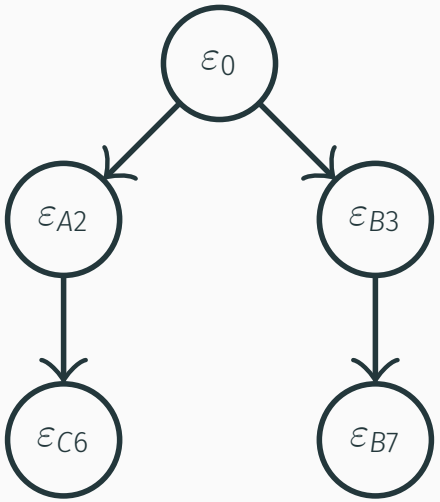
Comment choisir ?

- Définit relation *priority*, notée $<_\varepsilon$, ordre strict total sur les époques

Choisir une époque comme époque cible



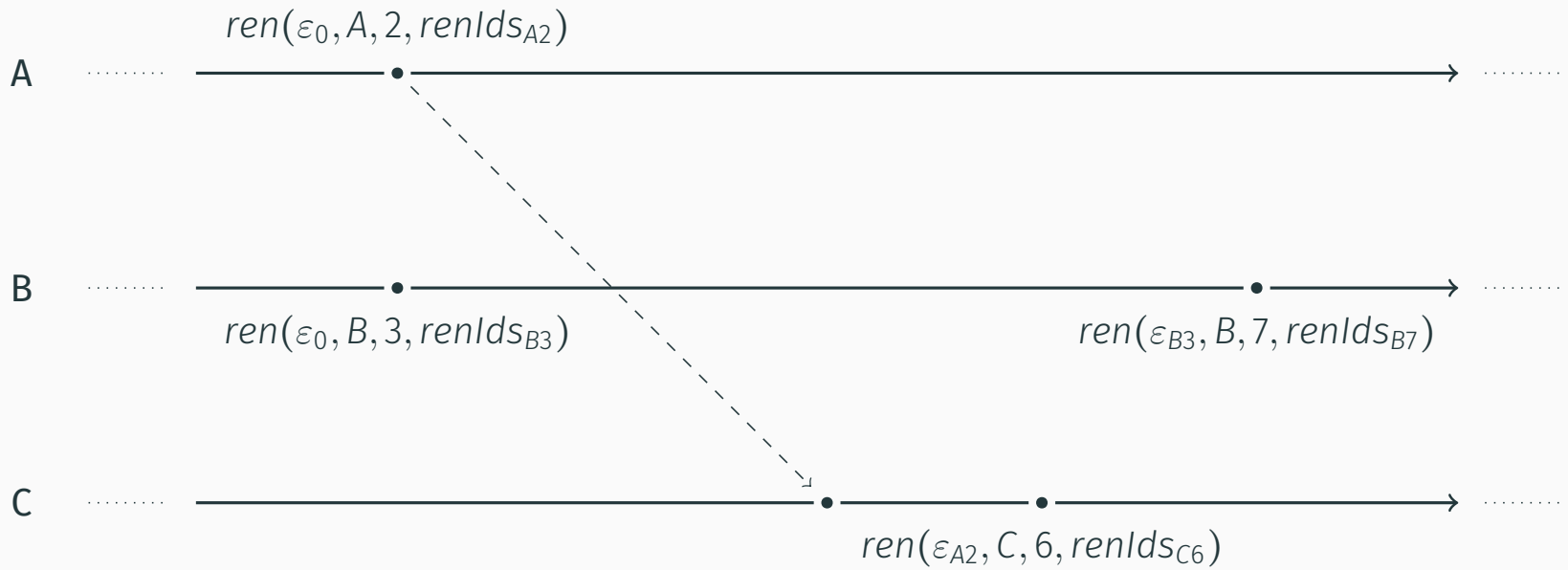
Arbre des époques



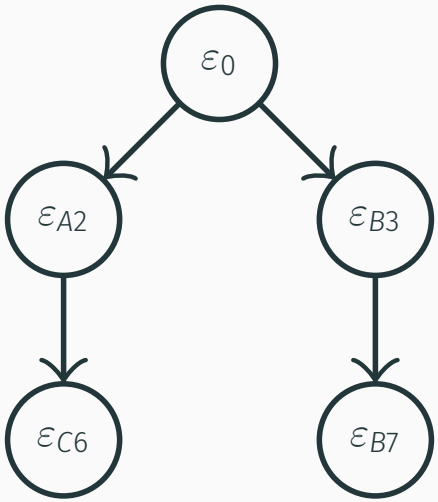
Comment choisir ?

- Définit relation *priority*, notée $<_\varepsilon$, ordre strict total sur les époques
- Utilise ordre lexicographique sur chemins des époques dans l'arbre

Choisir une époque comme époque cible



Arbre des époques



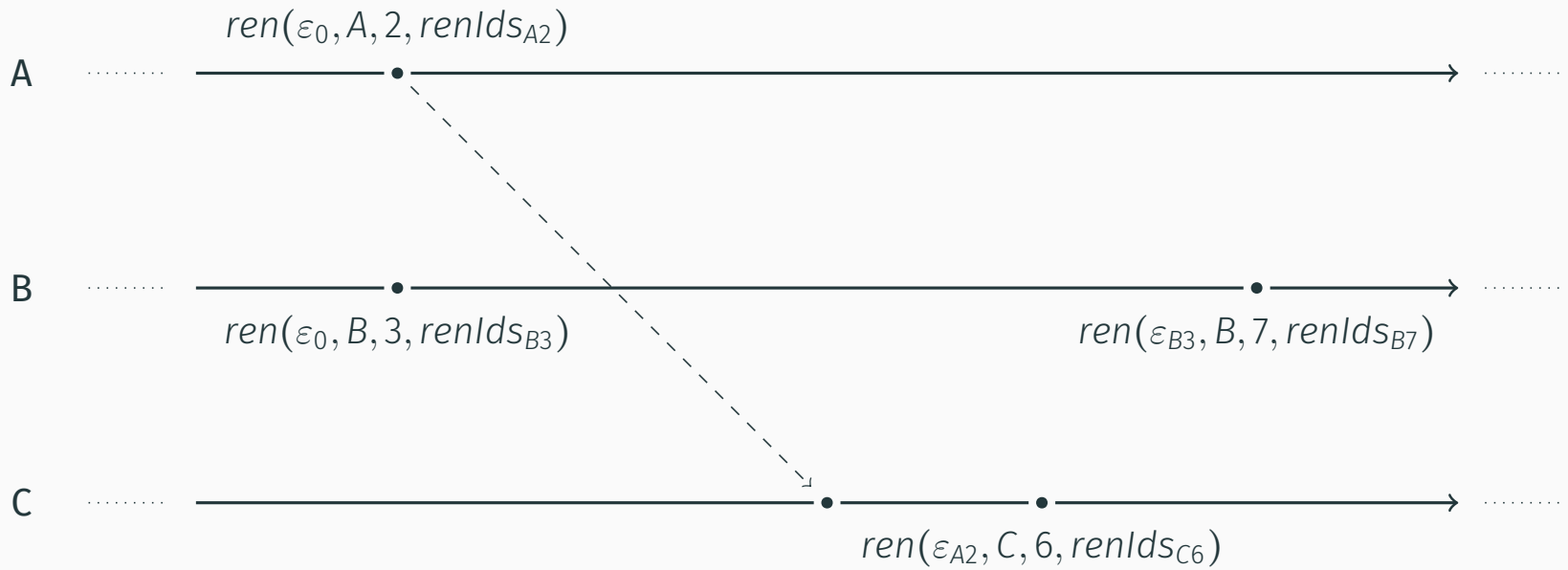
Comment choisir ?

- Définit relation *priority*, notée $<_\varepsilon$, ordre strict total sur les époques
- Utilise ordre lexicographique sur chemins des époques dans l'arbre

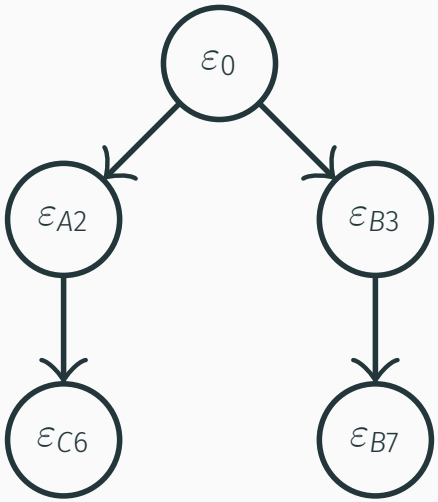
Exemple

$$\varepsilon_0 < \varepsilon_0\varepsilon_{A2}$$

Choisir une époque comme époque cible



Arbre des époques



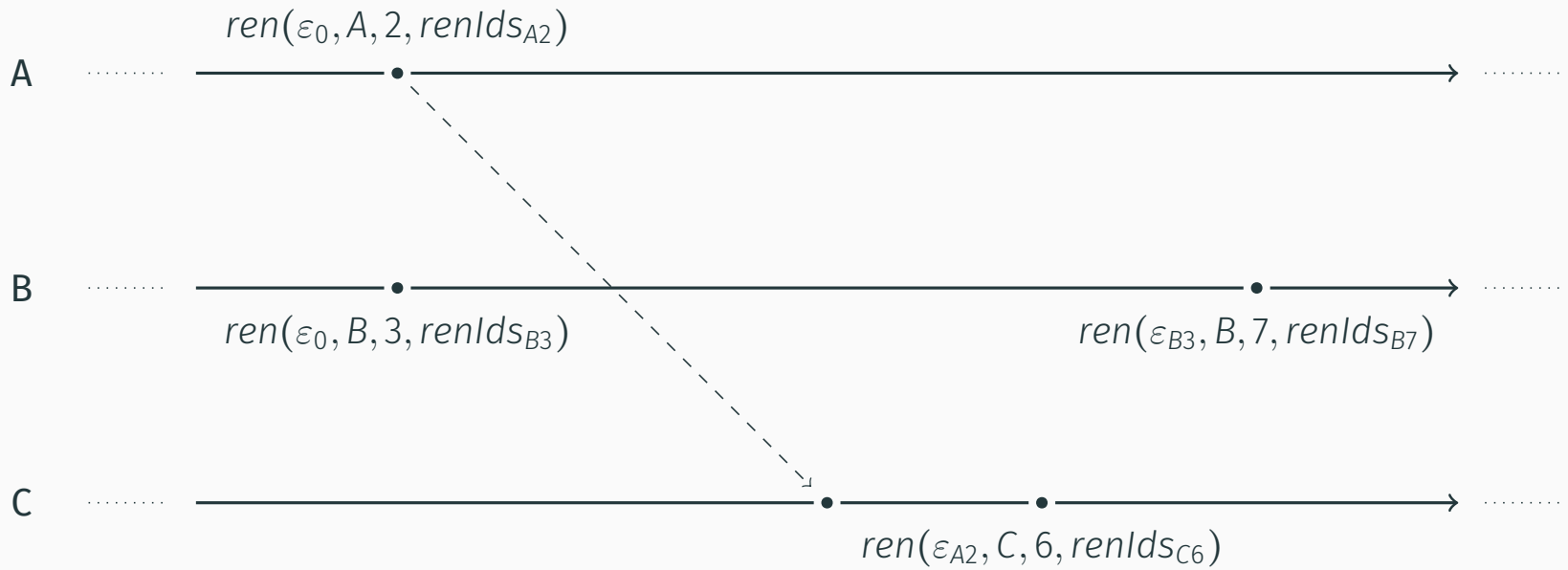
Comment choisir ?

- Définit relation *priority*, notée $<_\varepsilon$, ordre strict total sur les époques
- Utilise ordre lexicographique sur chemins des époques dans l'arbre

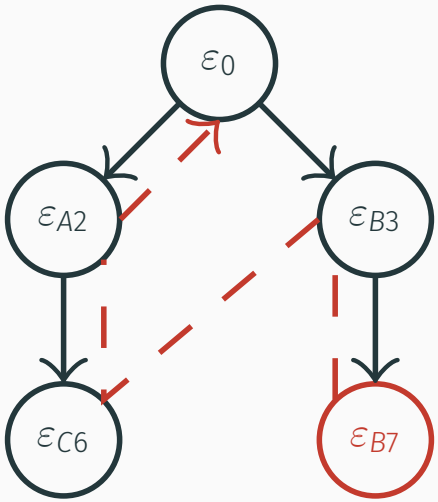
Exemple

$$\varepsilon_0 < \varepsilon_0\varepsilon_{A2} < \varepsilon_0\varepsilon_{A2}\varepsilon_{C6}$$

Choisir une époque comme époque cible



Arbre des époques



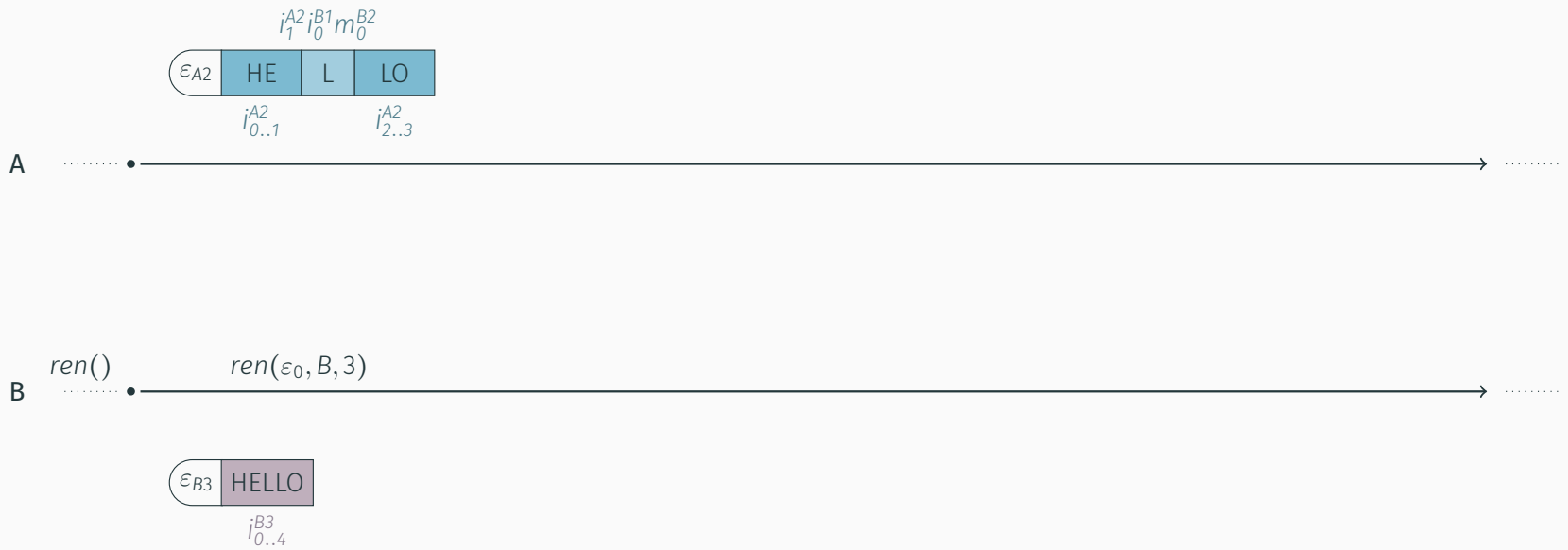
Comment choisir ?

- Définit relation *priority*, notée $<_\varepsilon$, ordre strict total sur les époques
- Utilise ordre lexicographique sur chemins des époques dans l'arbre

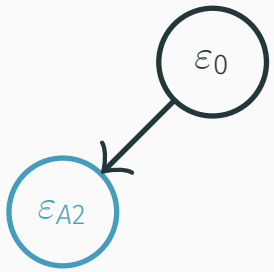
Exemple

$$\varepsilon_0 < \varepsilon_0\varepsilon_{A2} < \varepsilon_0\varepsilon_{A2}\varepsilon_{C6} < \varepsilon_0\varepsilon_{B3}\varepsilon_{B7}$$

Exemple - Calculs des transformations à effectuer



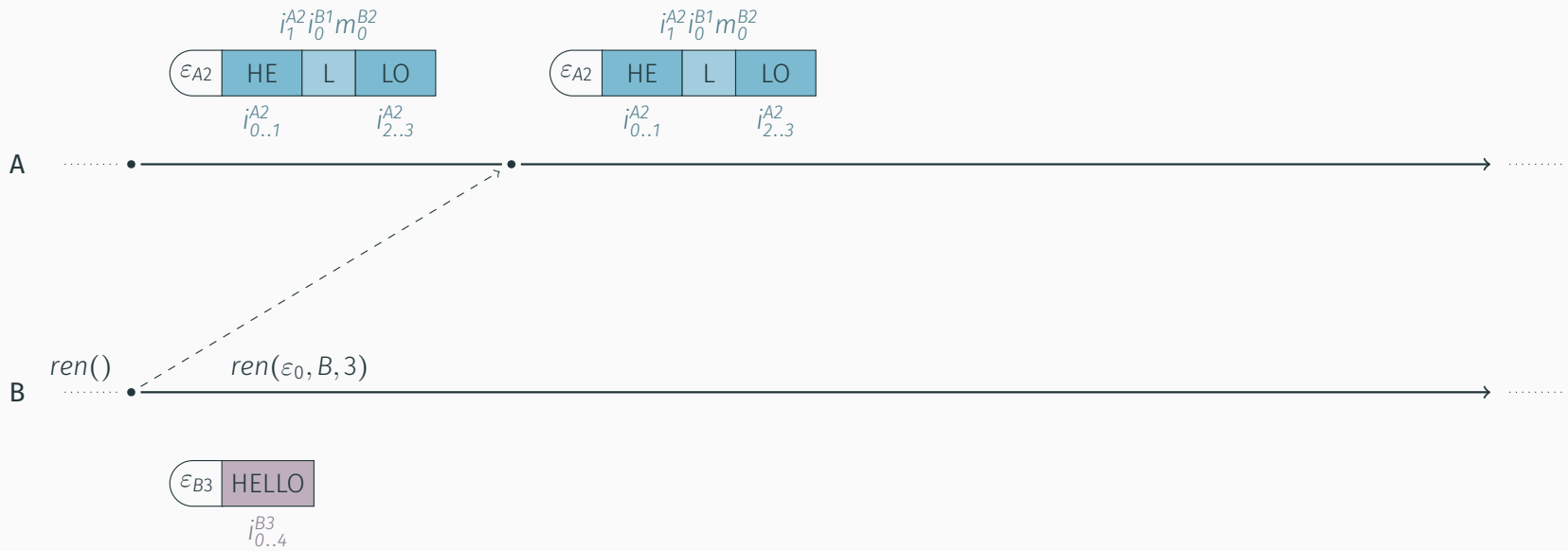
Arbre des époques de A



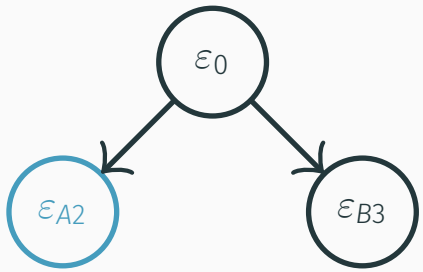
Étapes

- Époque courante : ε_{A2}

Exemple - Calculs des transformations à effectuer



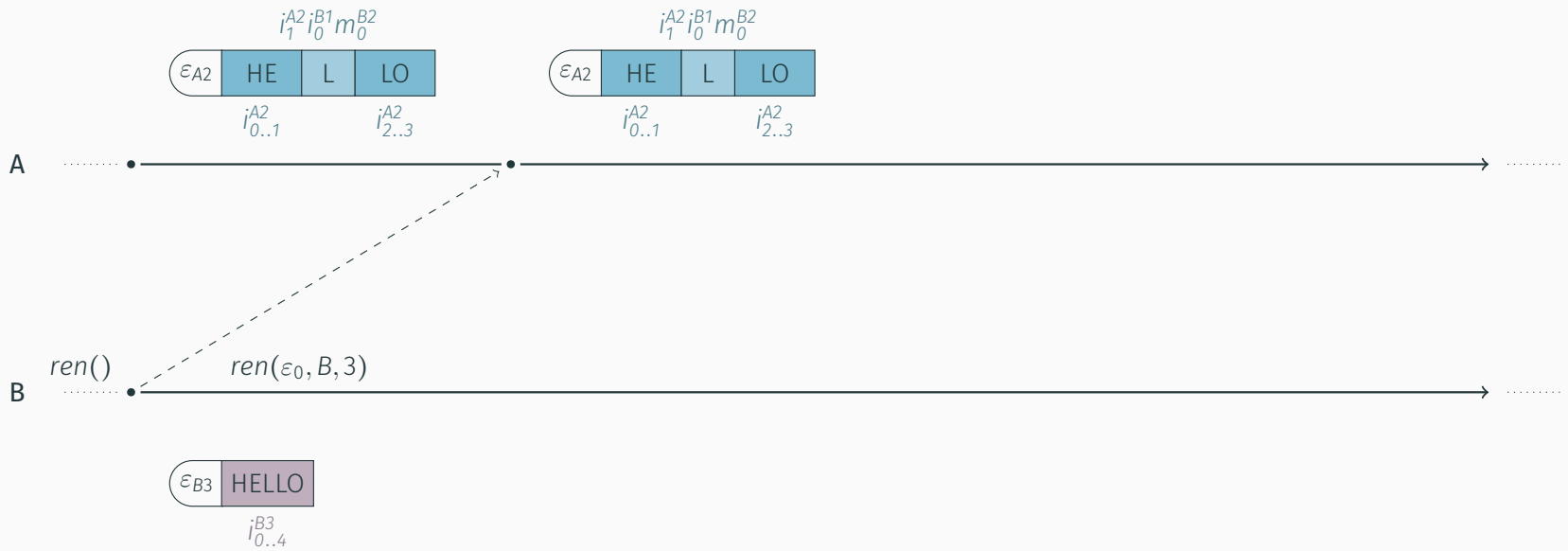
Arbre des époques de A



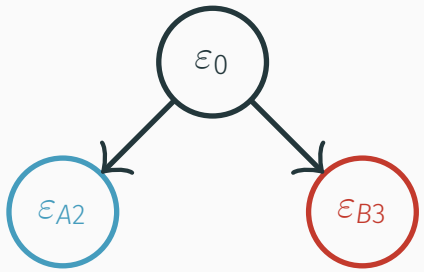
Étapes

- Époque courante : ε_{A2}

Exemple - Calculs des transformations à effectuer



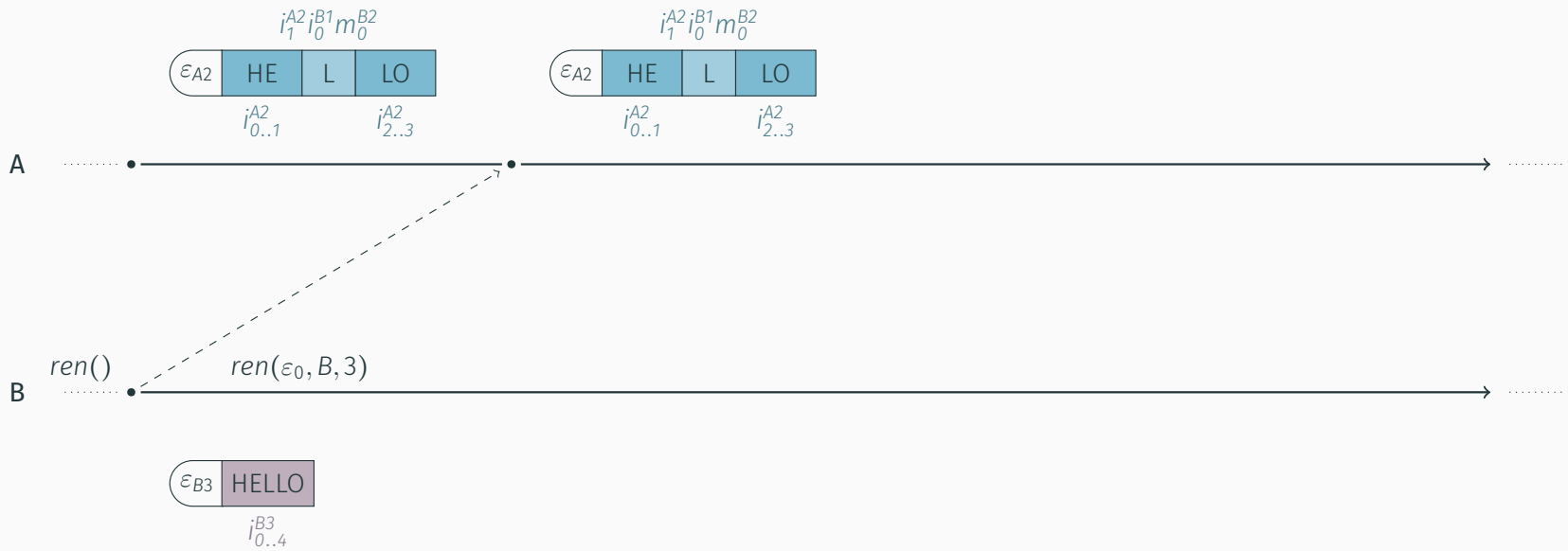
Arbre des époques de A



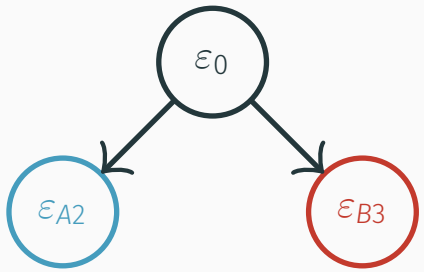
Étapes

- Époque courante : ε_{A2}
- Époque cible : ε_{B3}

Exemple - Calculs des transformations à effectuer



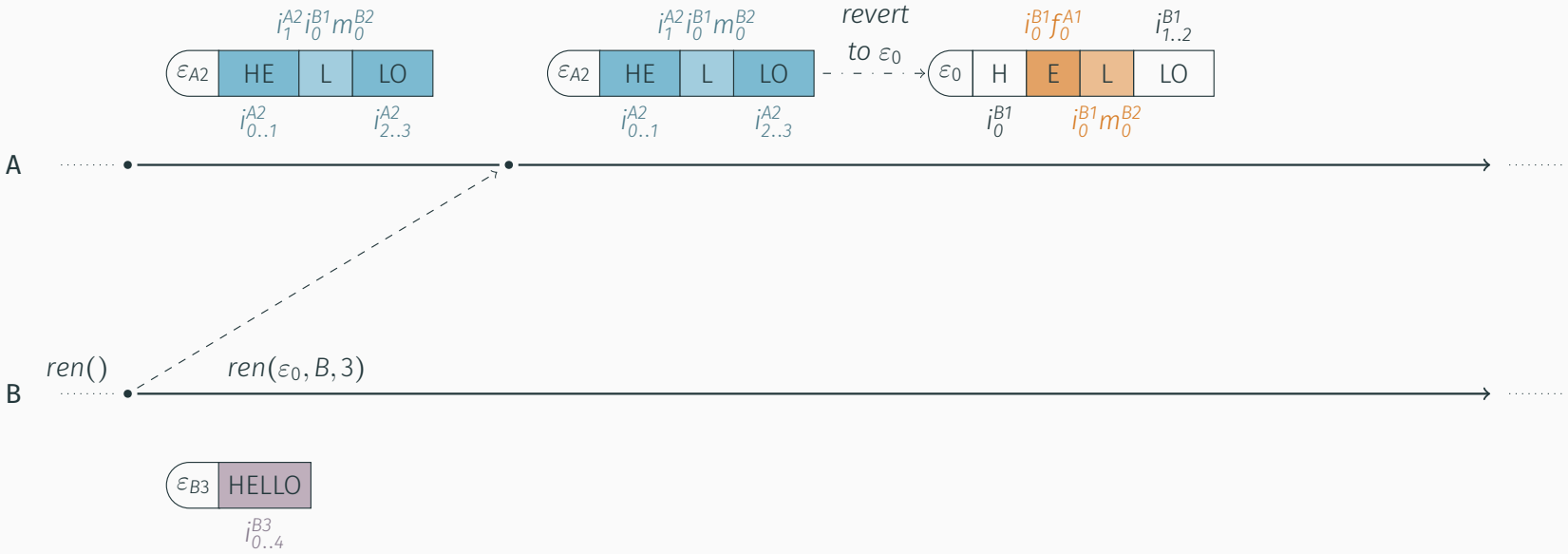
Arbre des époques de A



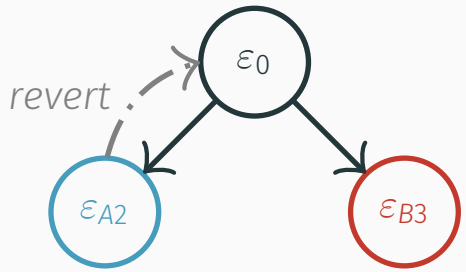
Étapes

- Époque courante : ε_{A2}
- Époque cible : ε_{B3}
- Plus Proche Ancêtre Commun : ε_0

Exemple - Calculs des transformations à effectuer



Arbre des époques de A

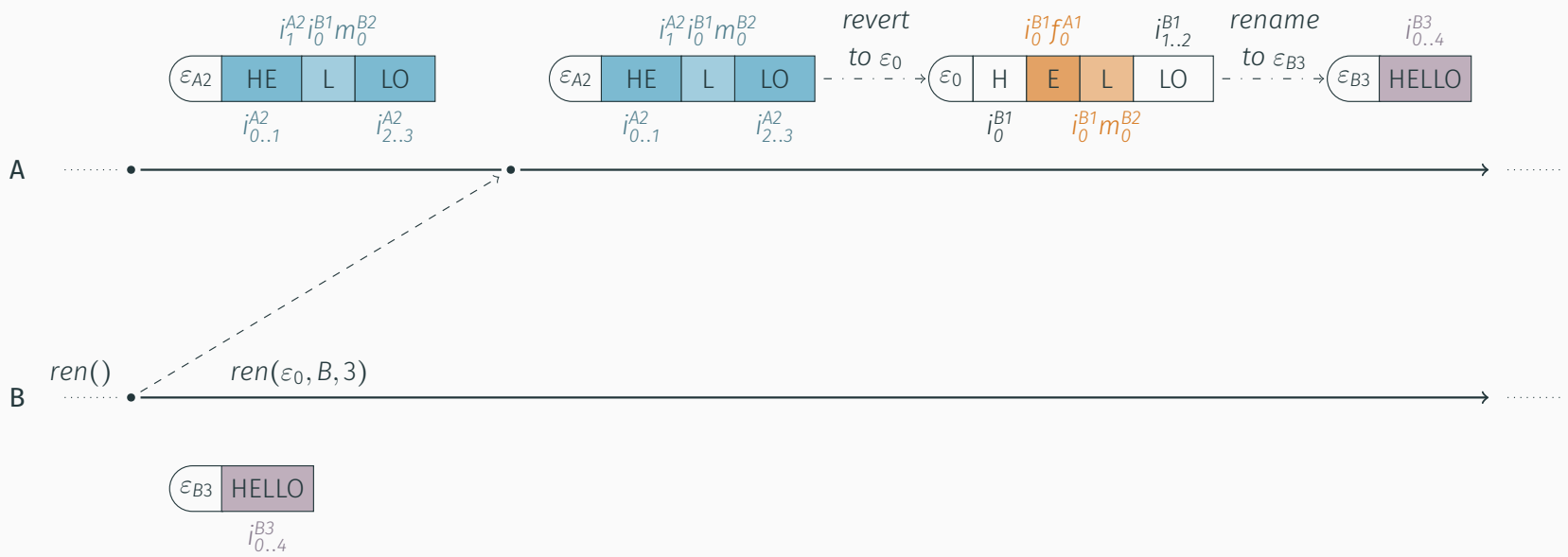


Étapes

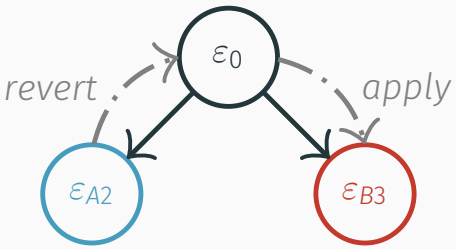
- Époque courante : ε_{A2}
- Époque cible : ε_{B3}
- Plus Proche Ancêtre Commun : ε_0

Doit annuler ε_{A2}

Exemple - Calculs des transformations à effectuer



Arbre des époques de A



Étapes

- Époque courante : ε_{A2}
- Époque cible : ε_{B3}
- Plus Proche Ancêtre Commun : ε_0

Doit annuler ε_{A2} puis appliquer ε_{B3}

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues
2. Choisir entre époque courante et nouvelle époque l'époque cible
3. Si changement d'époque cible
   - 3.1 Calculer chemin entre époque courante et époque cible, et notamment leur Plus Proche Ancêtre Commun (PPAC)
   - 3.2 Annuler l'effet des opérations *rename* de l'époque courante au PPAC
   - 3.3 Appliquer l'effet des opérations *rename* du PPAC à l'époque cible

Algorithme d'intégration d'une opération *rename*

Intuition

1. Ajouter l'époque créée par l'opération *rename* à l'ensemble des époques connues
2. Choisir entre époque courante et nouvelle époque l'époque cible
3. Si changement d'époque cible
   - 3.1 Calculer chemin entre époque courante et époque cible, et notamment leur Plus Proche Ancêtre Commun (PPAC)
   - 3.2 Annuler l'effet des opérations *rename* de l'époque courante au PPAC
   - 3.3 Appliquer l'effet des opérations *rename* du PPAC à l'époque cible

Annuler l’effet d’une opération *rename*

Ajout d’un nouveau mécanisme de transformation

Annuler l’effet d’une opération *rename*

Ajout d’un nouveau mécanisme de transformation

- Prend la forme de l’algorithme *revertRenameId*

Annuler l'effet d'une opération *rename*

Ajout d'un nouveau mécanisme de transformation

- Prend la forme de l'algorithme *revertRenameId*
- Exclure l'effet de l'opération *rename*

Annuler l'effet d'une opération *rename*

Ajout d'un nouveau mécanisme de transformation

- Prend la forme de l'algorithme *revertRenameId*
- Exclure l'effet de l'opération *rename*

Intuition

Annuler l'effet d'une opération *rename*

Ajout d'un nouveau mécanisme de transformation

- Prend la forme de l'algorithme *revertRenameId*
- Exclure l'effet de l'opération *rename*

Intuition

1. *id* fait partie des identifiants renommés : doit retourner son ancienne valeur

Annuler l'effet d'une opération *rename*

Ajout d'un nouveau mécanisme de transformation

- Prend la forme de l'algorithme *revertRenameId*
- Exclure l'effet de l'opération *rename*

Intuition

1. *id* fait partie des identifiants renommés : doit retourner son ancienne valeur
2. *id* a (potentiellement) été inséré en concurrence : doit restaurer sa (potentielle) ancienne valeur

Annuler l'effet d'une opération *rename*

Ajout d'un nouveau mécanisme de transformation

- Prend la forme de l'algorithme *revertRenameId*
- Exclure l'effet de l'opération *rename*

Intuition

1. *id* fait partie des identifiants renommés : doit retourner son ancienne valeur
2. *id* a (potentiellement) été inséré en concurrence : doit restaurer sa (potentielle) ancienne valeur
3. *id* a été inséré après le renommage : doit retourner une valeur qui préserve l'ordre

Annuler l'effet d'une opération *rename*

Ajout d'un nouveau mécanisme de transformation

- Prend la forme de l'algorithme *revertRenameId*
- Exclure l'effet de l'opération *rename*

Intuition

1. *id* fait partie des identifiants renommés : doit retourner son ancienne valeur
2. *id* a (potentiellement) été inséré en concurrence : doit restaurer sa (potentielle) ancienne valeur
3. *id* a été inséré après le renommage : doit retourner une valeur qui préserve l'ordre

Distingue cas par filtrage par motif

Annuler l'effet d'une opération *rename*

Ajout d'un nouveau mécanisme de transformation

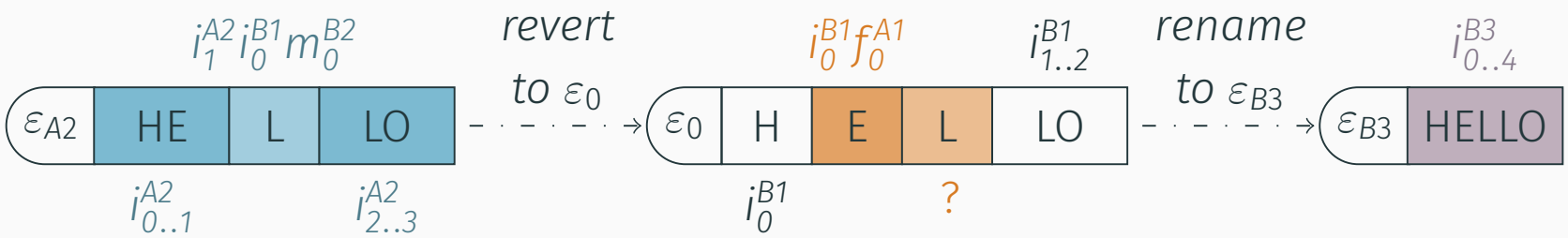
- Prend la forme de l'algorithme *revertRenameId*
- Exclure l'effet de l'opération *rename*

Intuition

1. *id* fait partie des identifiants renommés : doit retourner son ancienne valeur
2. *id* a (potentiellement) été inséré en concurrence : doit restaurer sa (potentielle) ancienne valeur
3. *id* a été inséré après le renommage : doit retourner une valeur qui préserve l'ordre

Distingue cas par filtrage par motif

Exemple de `revertRenameId`

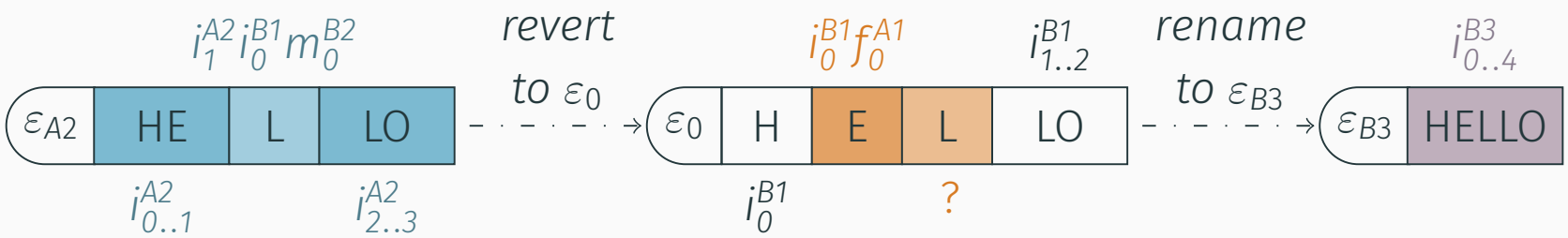


Rappel :

$$renIds_{A2} = [i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$$

Exemple avec $i_1^{A2}\, i_0^{B1}\, m_0^{B2}$

Exemple de `revertRenameId`



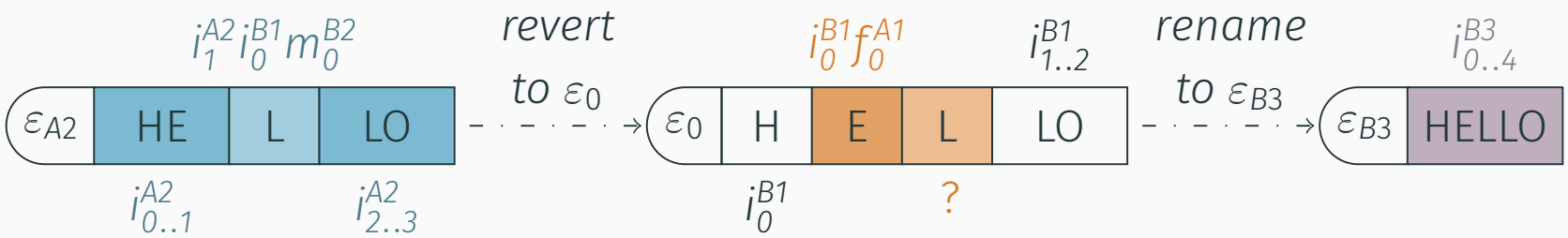
Rappel :

$$renIds_{A2} = [i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$$

Exemple avec $i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2}$

- Est de la forme i_1^{A2} concaténé à $i_0^{B1} m_0^{B2}$: cas 2 ou 3

Exemple de `revertRenameId`



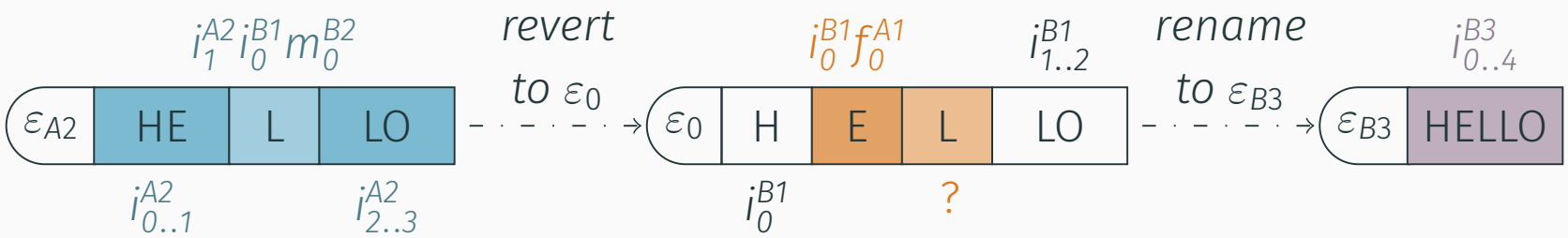
Rappel :

$$renIds_{A2} = [i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$$

Exemple avec $i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2}$

- Est de la forme i_1^{A2} concaténé à $i_0^{B1} m_0^{B2}$: cas 2 ou 3
- Trouver l'équivalent de i_1^{A2} dans $renIds_{A2}$: $i_0^{B1} f_0^{A1}$

Exemple de `revertRenameId`



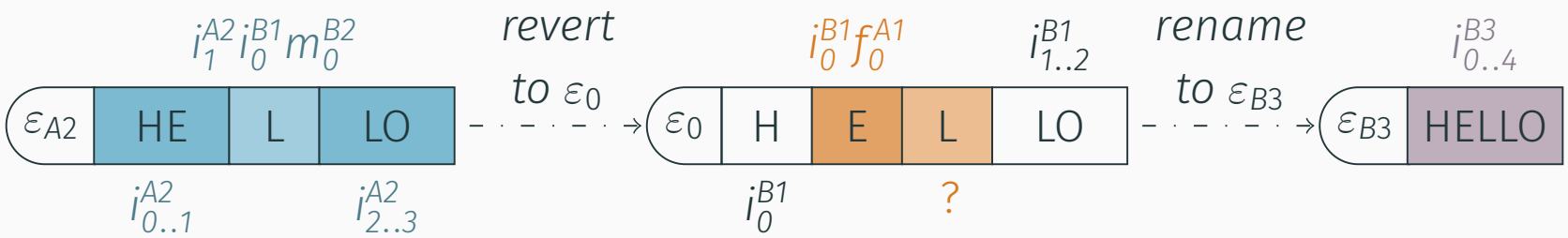
Rappel :

$$renIds_{A2} = [i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$$

Exemple avec $i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2}$

- Est de la forme i_1^{A2} concaténé à $i_0^{B1} m_0^{B2}$: cas 2 ou 3
- Trouver l'équivalent de i_1^{A2} dans $renIds_{A2}$: $i_0^{B1} f_0^{A1}$
- Trouver l'équivalent de i_2^{A2} dans $renIds_{A2}$: i_1^{B1}

Exemple de `revertRenameId`



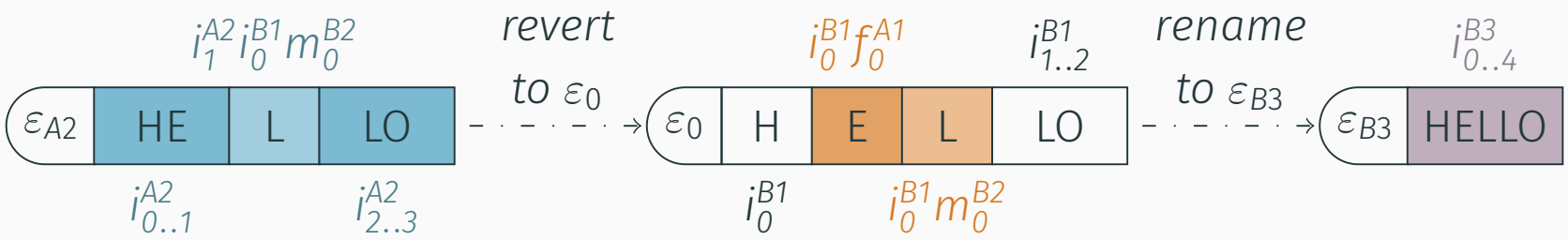
Rappel :

$$renIds_{A2} = [i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$$

Exemple avec $i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2}$

- Est de la forme i_1^{A2} concaténé à $i_0^{B1} m_0^{B2}$: cas 2 ou 3
- Trouver l'équivalent de i_1^{A2} dans $renIds_{A2}$: $i_0^{B1} f_0^{A1}$
- Trouver l'équivalent de i_2^{A2} dans $renIds_{A2}$: i_1^{B1}
- Comparer $i_0^{B1} m_0^{B2}$ avec ces derniers : $i_0^{B1} f_0^{A1} <_{id} i_0^{B1} m_0^{B2} <_{id} i_1^{B1}$

Exemple de `revertRenameId`



Rappel :

$$renIds_{A2} = [i_0^{B1}, i_0^{B1} f_0^{A1}, i_1^{B1}, i_2^{B1}]$$

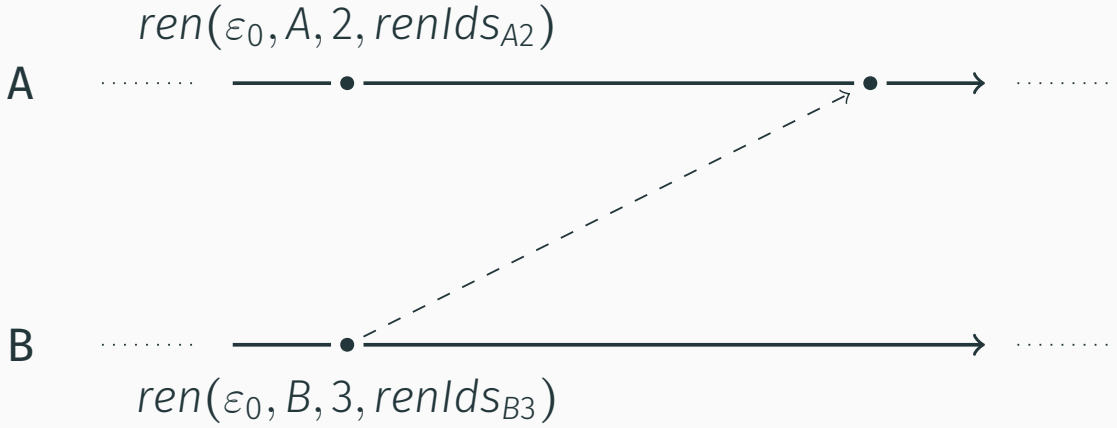
Exemple avec $i_1^{A2} i_0^{B1} m_0^{B2}$

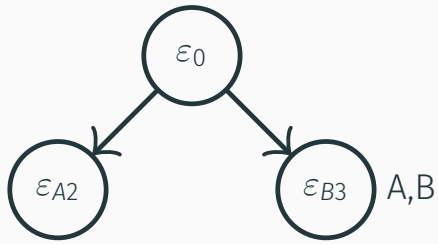
- Est de la forme i_1^{A2} concaténé à $i_0^{B1} m_0^{B2}$: cas 2 ou 3
- Trouver l'équivalent de i_1^{A2} dans $renIds_{A2}$: $i_0^{B1} f_0^{A1}$
- Trouver l'équivalent de i_2^{A2} dans $renIds_{A2}$: i_1^{B1}
- Comparer $i_0^{B1} m_0^{B2}$ avec ces derniers : $i_0^{B1} f_0^{A1} <_{id} i_0^{B1} m_0^{B2} <_{id} i_1^{B1}$
- Retourner $i_0^{B1} m_0^{B2}$

Mais ça sert à quoi de renommer ?

Puisqu'on doit conserver les *renIds* pour gérer les opérations concurrentes...

Suppression des *renIds*

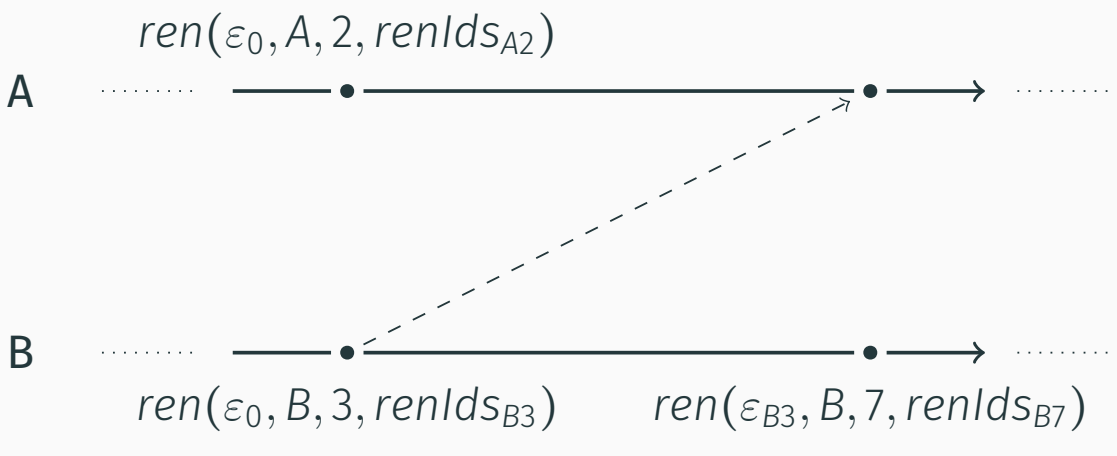


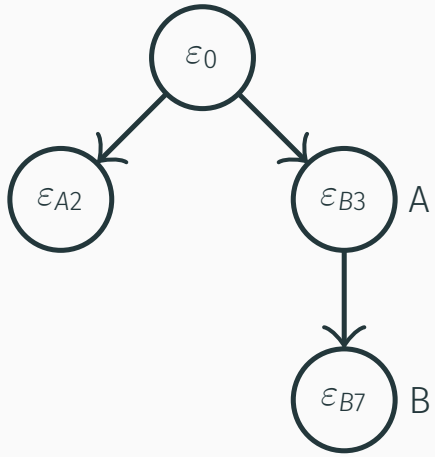


- Besoin de garder *renIds* pour transformer opérations

[6]. Baquero et al., « Making Operation-Based CRDTs Operation-Based ».

Suppression des *renIds*

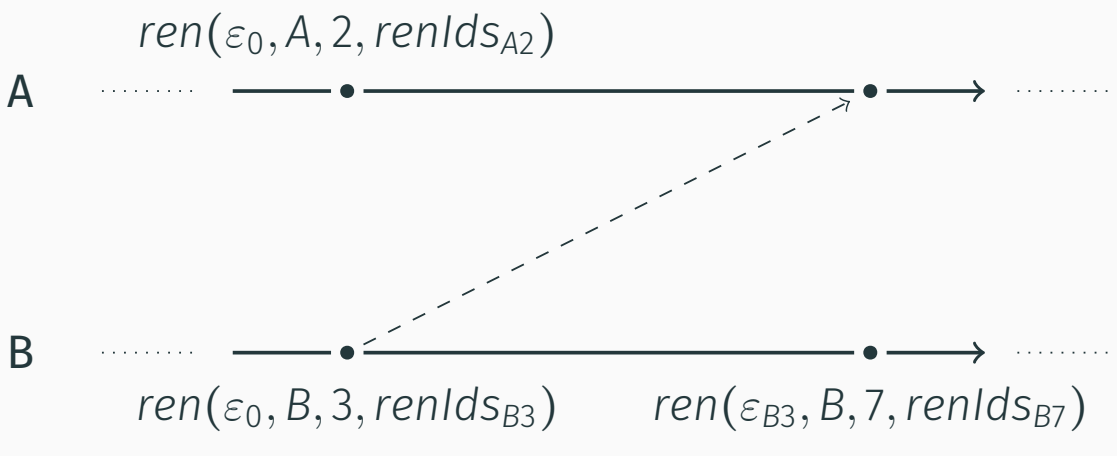


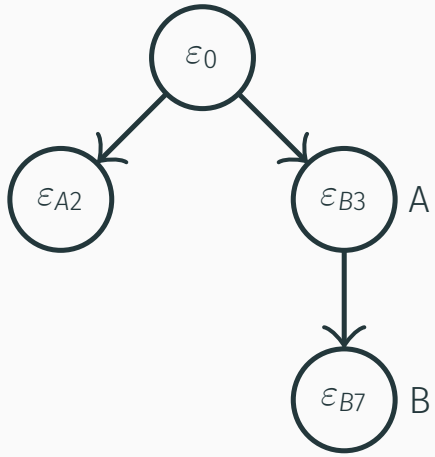


- Besoin de garder *renIds* pour transformer opérations

[6]. Baquero et al., « Making Operation-Based CRDTs Operation-Based ».

Suppression des *renIds*

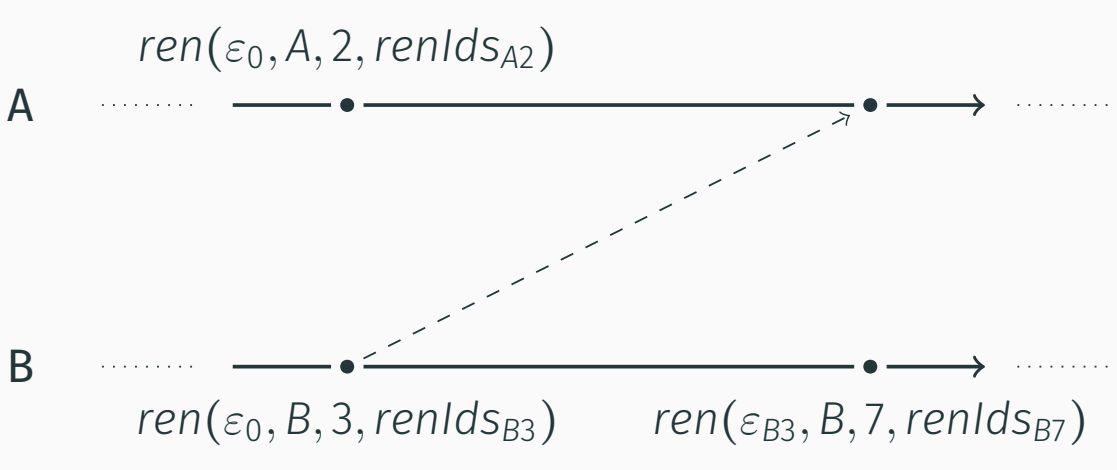


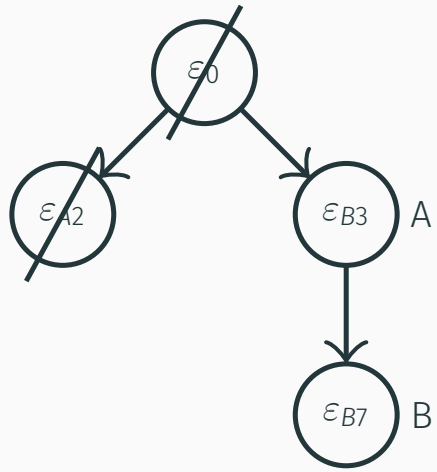


- Besoin de garder *renIds* pour transformer opérations
- Si plus d'opérations nécessitant transformations vers époque donnée…

[6]. Baquero et al., « Making Operation-Based CRDTs Operation-Based ».

Suppression des *renIds*

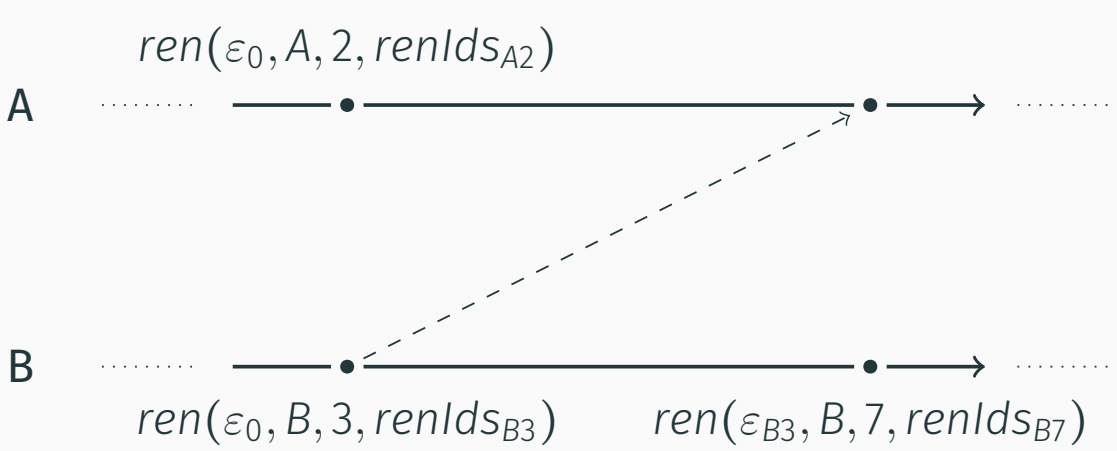


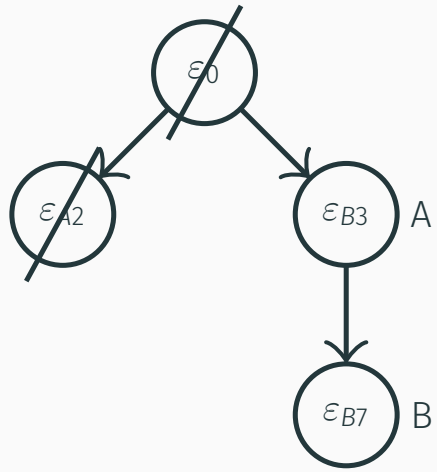


- Besoin de garder *renIds* pour transformer opérations
- Si plus d'opérations nécessitant transformations vers époque donnée…
- …alors époque et *renIds* correspondant obsolètes

[6]. Baquero et al., « Making Operation-Based CRDTs Operation-Based ».

Suppression des *renIds*





- Besoin de garder *renIds* pour transformer opérations
- Si plus d'opérations nécessitant transformations vers époque donnée…
- …alors époque et *renIds* correspondant obsolètes

Besoins

- Détecter stabilité causale [6] des opérations *rename*
- Connaître noeuds appartenant au groupe

[6]. Baquero et al., « Making Operation-Based CRDTs Operation-Based ».

RenamableLogootSplit

Validation

Objectifs

- Montrer convergence des noeuds
- Montrer que mécanisme de renommage améliore performances de la séquence répliquée (mémoire, calculs, bande-passante)

Objectifs

- Montrer convergence des noeuds
- Montrer que mécanisme de renommage améliore performances de la séquence répliquée (mémoire, calculs, bande-passante)

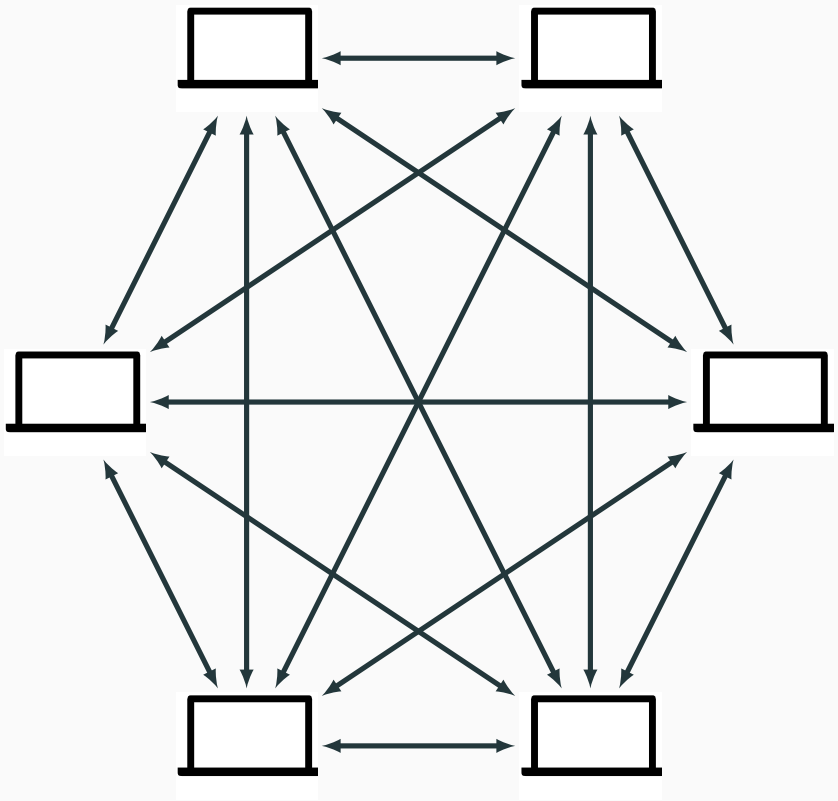
Conduite d'une évaluation expérimentale

Absence d’un jeu de données de sessions d’édition collaborative

Absence d’un jeu de données de sessions d’édition collaborative

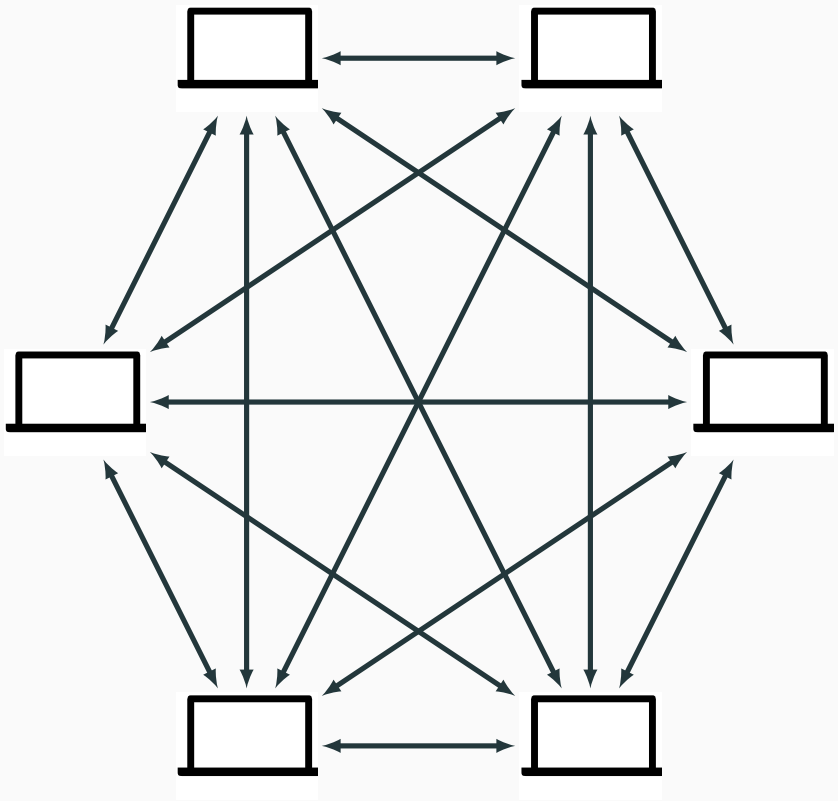
Mise en place de simulations pour générer un jeu de données

Simulations - Architecture



- 10 noeuds éditent collaborativement un document
- Utilisent soit LogootSplit (LS), soit RenamableLogootSplit (RLS)

Simulations - Architecture



- 10 noeuds éditent collaborativement un document
- Utilisent soit LogootSplit (LS), soit RenamableLogootSplit (RLS)
- Topologie réseau entièrement maillée
- Ne considère pas pannes ou pertes de message

Simulations - Modifications

- Phase 1 (génération du contenu) : Beaucoup d'insertions, quelques suppressions (80/20%)
- Phase 2 (édition) : Équilibre insertions/suppressions (50/50%)
- Noeuds passent à la phase 2 quand document atteint taille donnée (15 pages - 60k caractères)

Simulations - Modifications

- Phase 1 (génération du contenu) : Beaucoup d'insertions, quelques suppressions (80/20%)
- Phase 2 (édition) : Équilibre insertions/suppressions (50/50%)
- Noeuds passent à la phase 2 quand document atteint taille donnée (15 pages - 60k caractères)

- Noeuds terminent quand ensemble des noeuds a effectué nombre donné de modifications (10k)...
- ...et intégré celles des autres (150k au total)

Simulations - Mécanisme de renommage

- Noeuds désignés comme *noeuds de renommage* (1 à 4)
- Noeuds de renommage effectue un renommage à toutes les 7.5k/30k opérations qu'ils intègrent (5/20 opérations *rename* par noeud de renommage)
- Opérations *rename* générées à un point donné sont concurrentes

Simulations - Sorties

- Instantané de l'état de chaque noeud à différents points de la simulation (2.5k/10k opérations et état final)
- Journal des opérations de chaque noeud

*. Code des simulations et benchmarks :
`https://github.com/coast-team/mute-bot-random`

Simulations - Sorties

- Instantané de l'état de chaque noeud à différents points de la simulation (2.5k/10k opérations et état final)
- Journal des opérations de chaque noeud

Permet de conduire évaluations sur ces données *

*. Code des simulations et benchmarks :
`https://github.com/coast-team/mute-bot-random`

RenamableLogootSplit

Résultats

Convergence

Intuition

Comparer l'état final des différents noeuds d'une session pour confirmer l'absence de divergence

Convergence

Intuition

Comparer l'état final des différents noeuds d'une session pour confirmer l'absence de divergence

- Ensemble des noeuds convergent

Convergence

Intuition

Comparer l'état final des différents noeuds d'une session pour confirmer l'absence de divergence

- Ensemble des noeuds convergent
- Un résultat empirique, pas une preuve...
- ...mais un premier pas vers la validation de RLS

Surcoût en métadonnées - 1 noeud de renommage

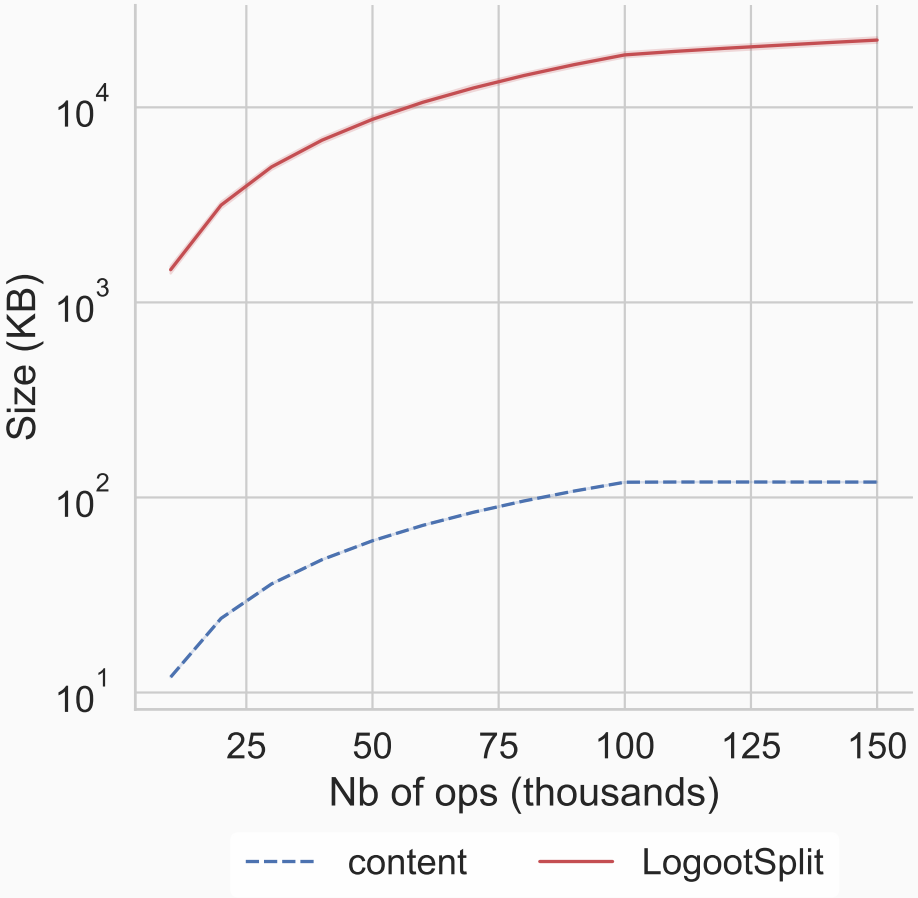
Intuition

Mesurer évolution de la taille de la structure de données à partir des instantanés des sessions avec 1 seul noeud de renommage

Surcoût en métadonnées - 1 noeud de renommage

Intuition

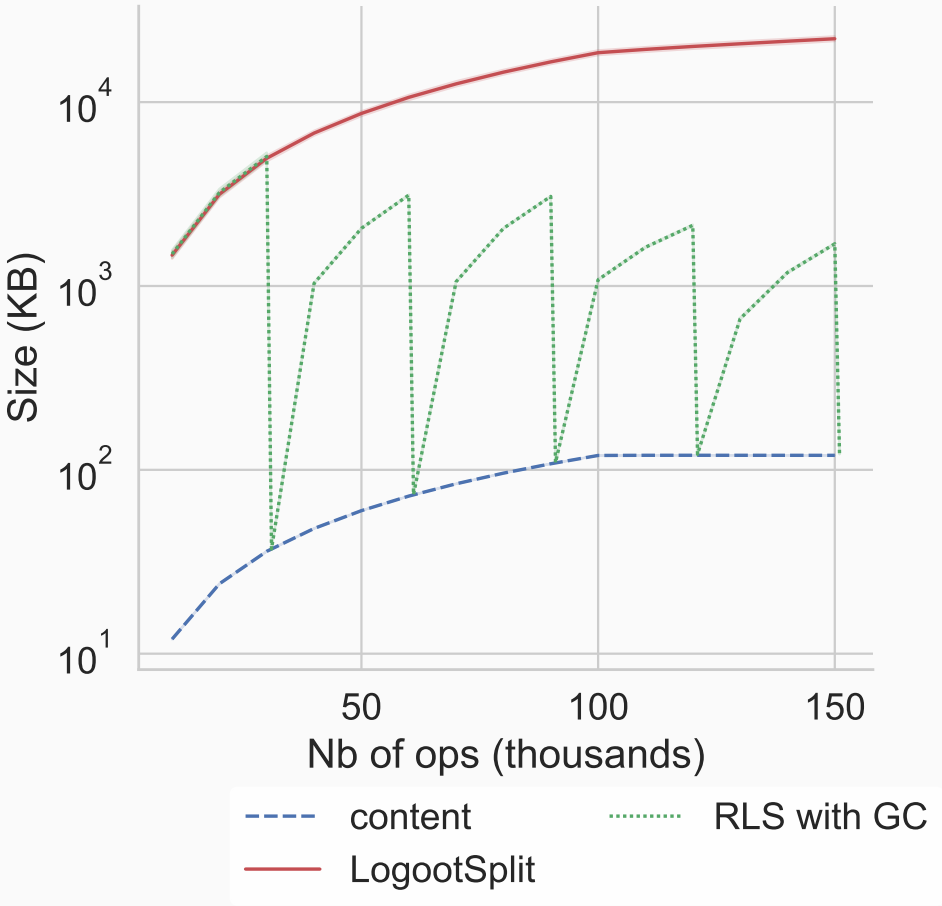
Mesurer évolution de la taille de la structure de données à partir des instantanés des sessions avec 1 seul noeud de renommage



Surcoût en métadonnées - 1 noeud de renommage

Intuition

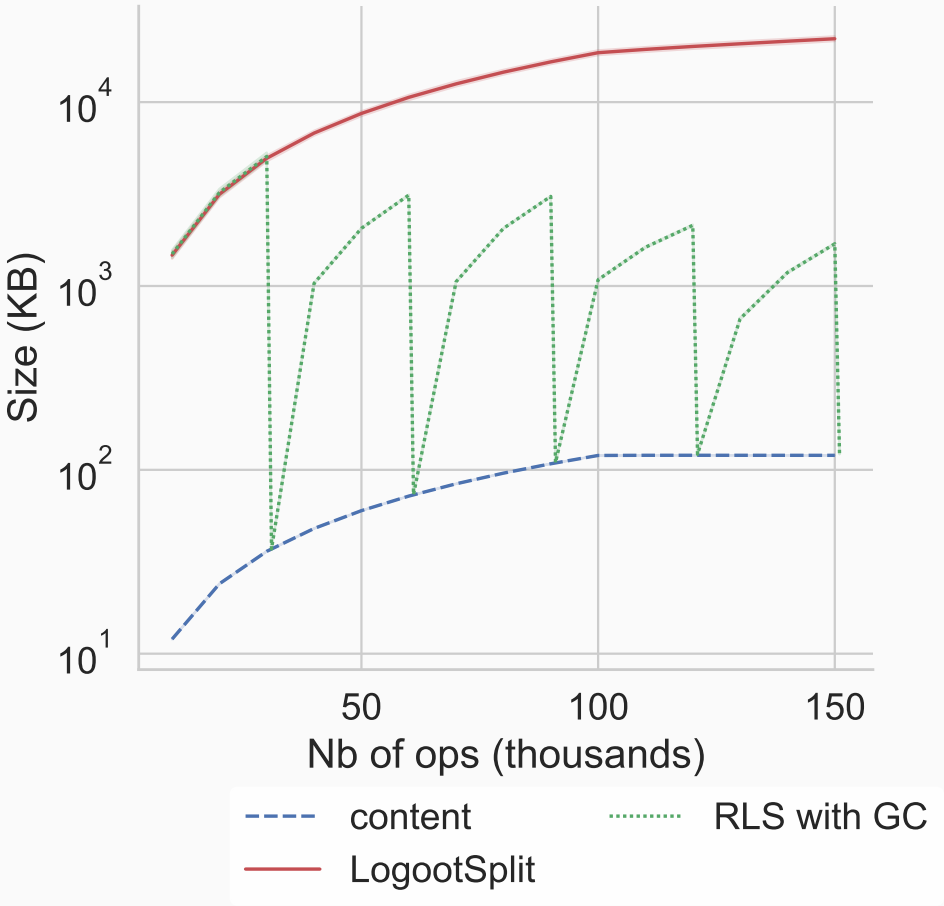
Mesurer évolution de la taille de la structure de données à partir des instantanés des sessions avec 1 seul noeud de renommage



Surcoût en métadonnées - 1 noeud de renommage

Intuition

Mesurer évolution de la taille de la structure de données à partir des instantanés des sessions avec 1 seul noeud de renommage

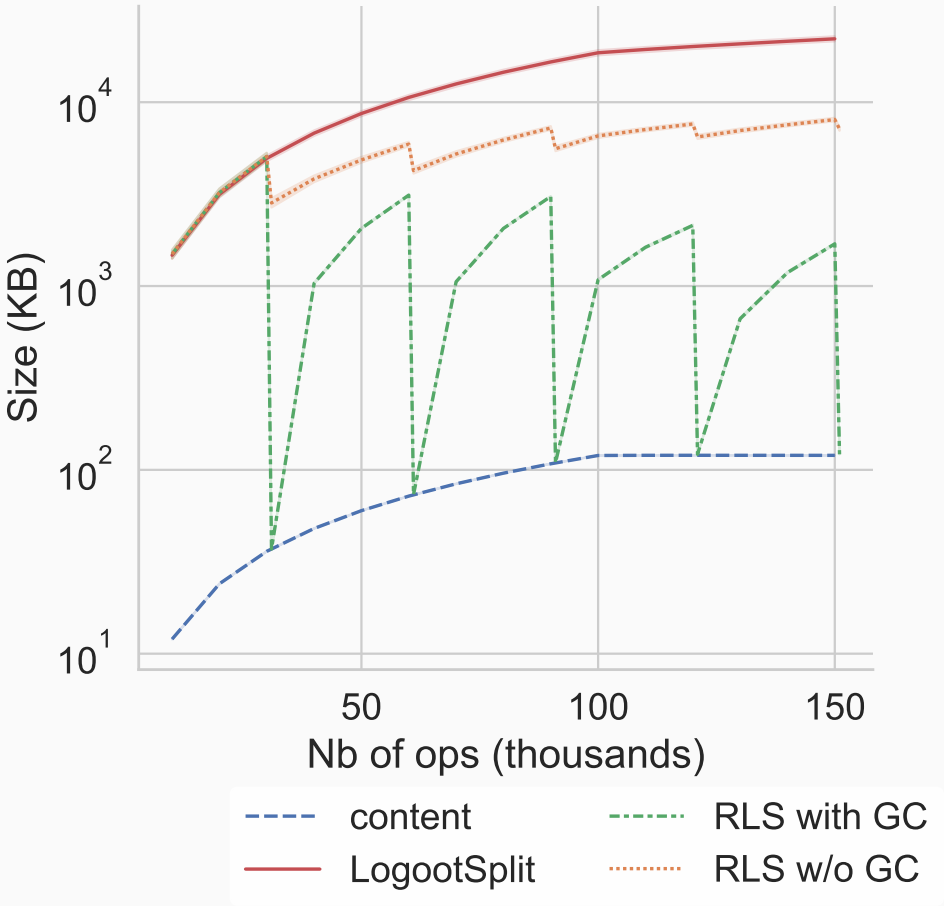


- Opération *rename* réinitialise surcoût du CRDT, si GC de l'entièreté des métadonnées du mécanisme de renommage

Surcoût en métadonnées - 1 noeud de renommage

Intuition

Mesurer évolution de la taille de la structure de données à partir des instantanés des sessions avec 1 seul noeud de renommage

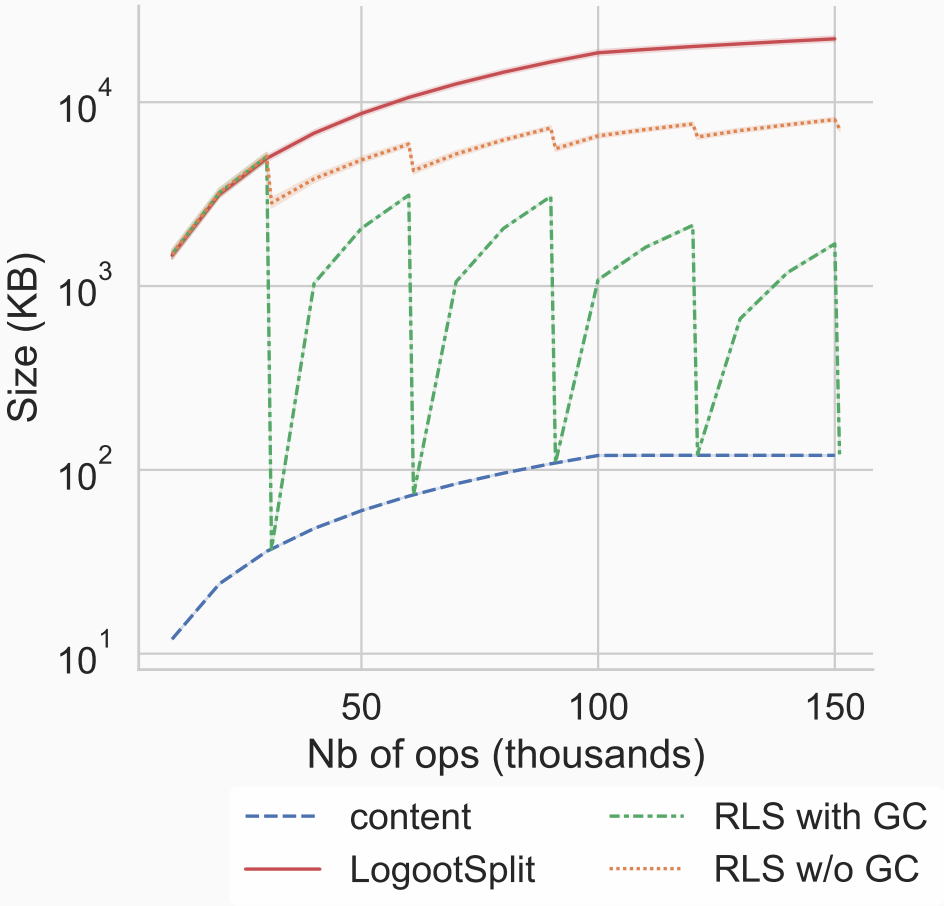


- Opération *rename* réinitialise surcoût du CRDT, si GC de l'entièreté des métadonnées du mécanisme de renommage

Surcoût en métadonnées - 1 noeud de renommage

Intuition

Mesurer évolution de la taille de la structure de données à partir des instantanés des sessions avec 1 seul noeud de renommage

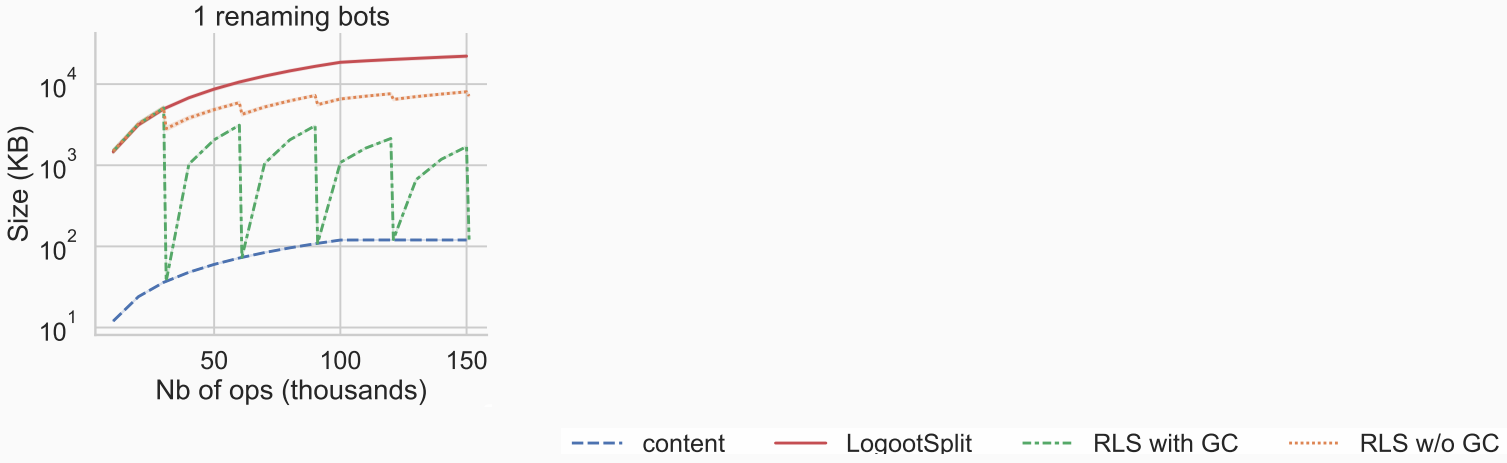


- Opération *rename* réinitialise surcoût du CRDT, si GC de l'entièreté des métadonnées du mécanisme de renommage
- Opération *rename* réduit de 66% surcoût du CRDT sinon

Surcoût en métadonnées - 1 à 4 noeuds de renommage

Intuition

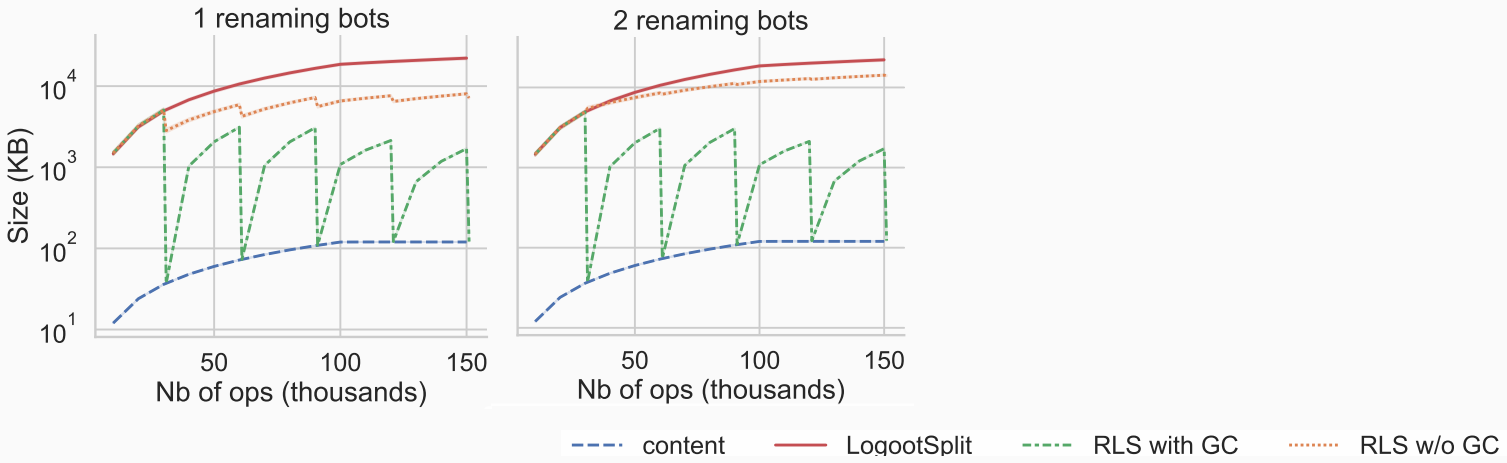
Mesurer évolution de la taille de la structure de données en fonction du nombre de noeuds de renommage



Surcoût en métadonnées - 1 à 4 noeuds de renommage

Intuition

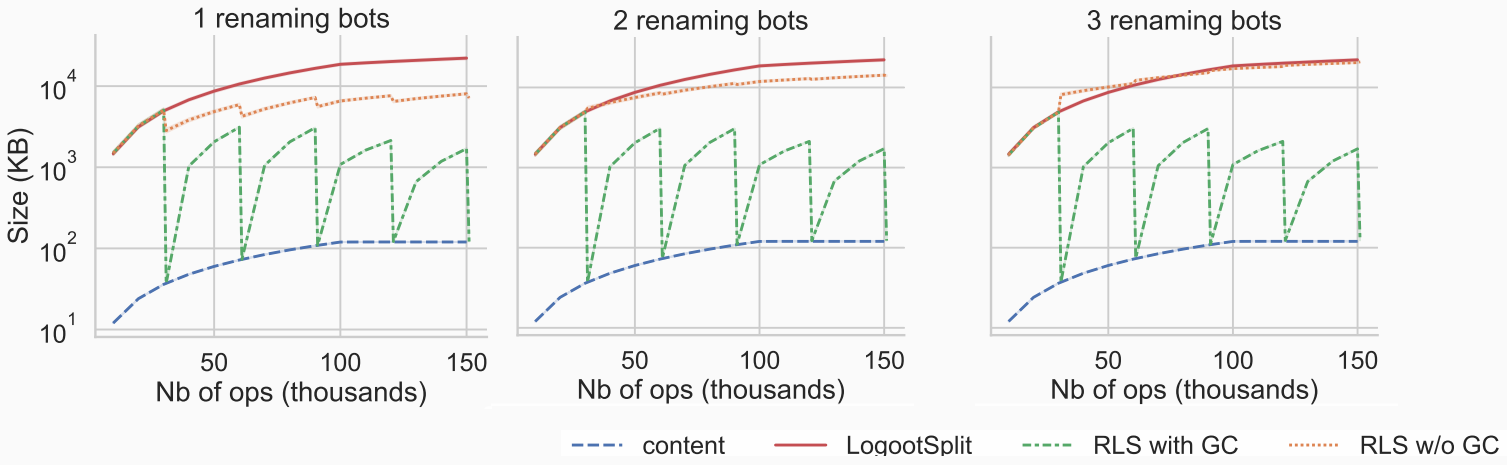
Mesurer évolution de la taille de la structure de données en fonction du nombre de noeuds de renommage



Surcoût en métadonnées - 1 à 4 noeuds de renommage

Intuition

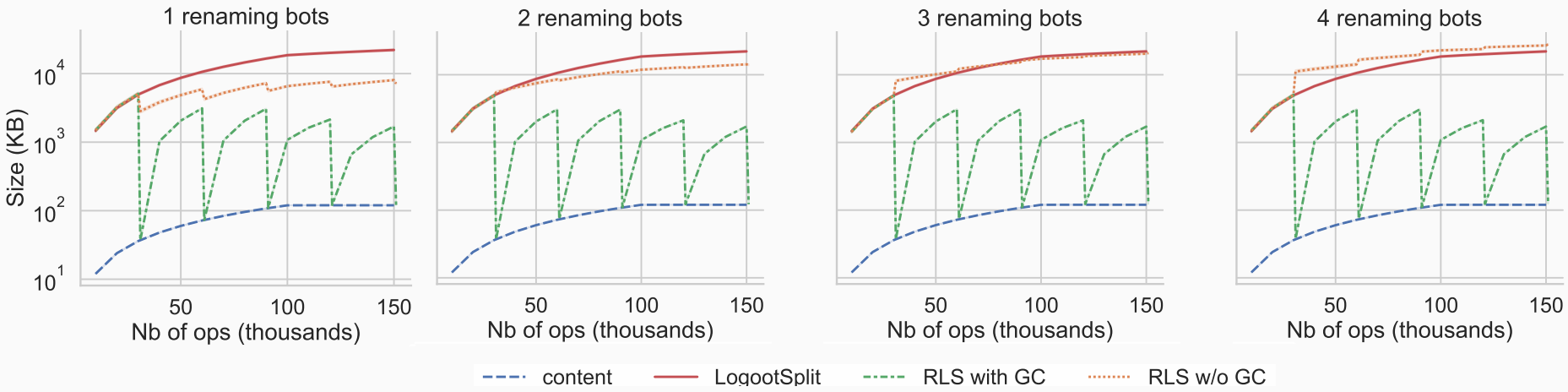
Mesurer évolution de la taille de la structure de données en fonction du nombre de noeuds de renommage



Surcoût en métadonnées - 1 à 4 noeuds de renommage

Intuition

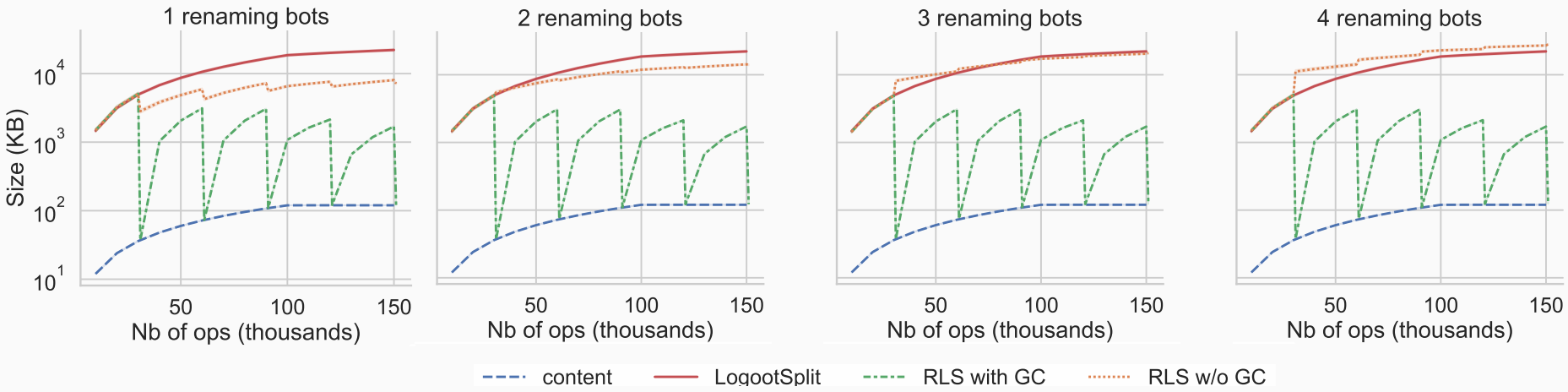
Mesurer évolution de la taille de la structure de données en fonction du nombre de noeuds de renommage



Surcoût en métadonnées - 1 à 4 noeuds de renommage

Intuition

Mesurer évolution de la taille de la structure de données en fonction du nombre de noeuds de renommage



- Aucun impact si GC
- Surcoût de chaque opération *rename* s'additionne sinon

Surcoût en calculs - Opérations *insert* et *remove*

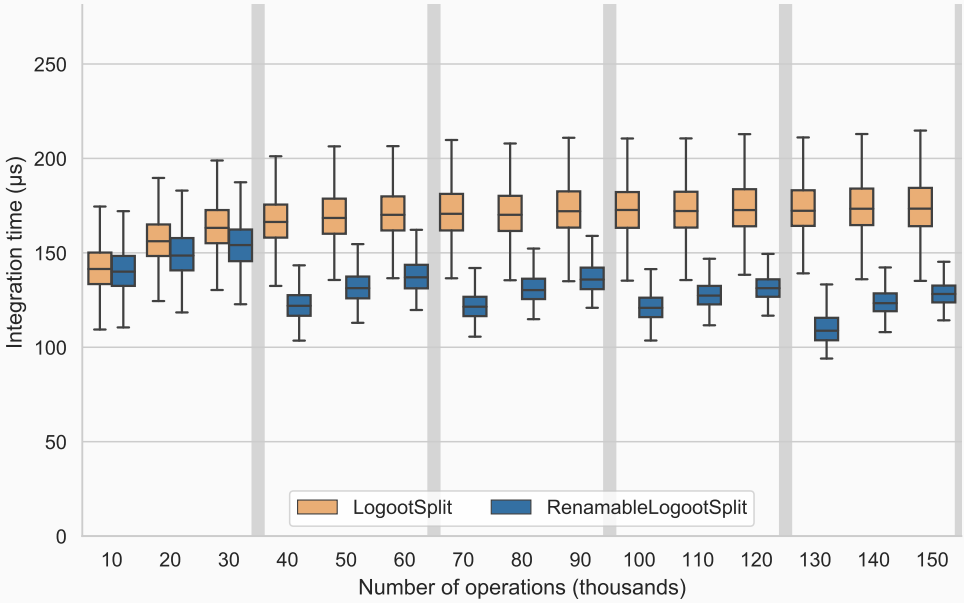
Intuition

Mesurer temps d'intégration local et distant d'opérations *insert* à différents stades de la collaboration

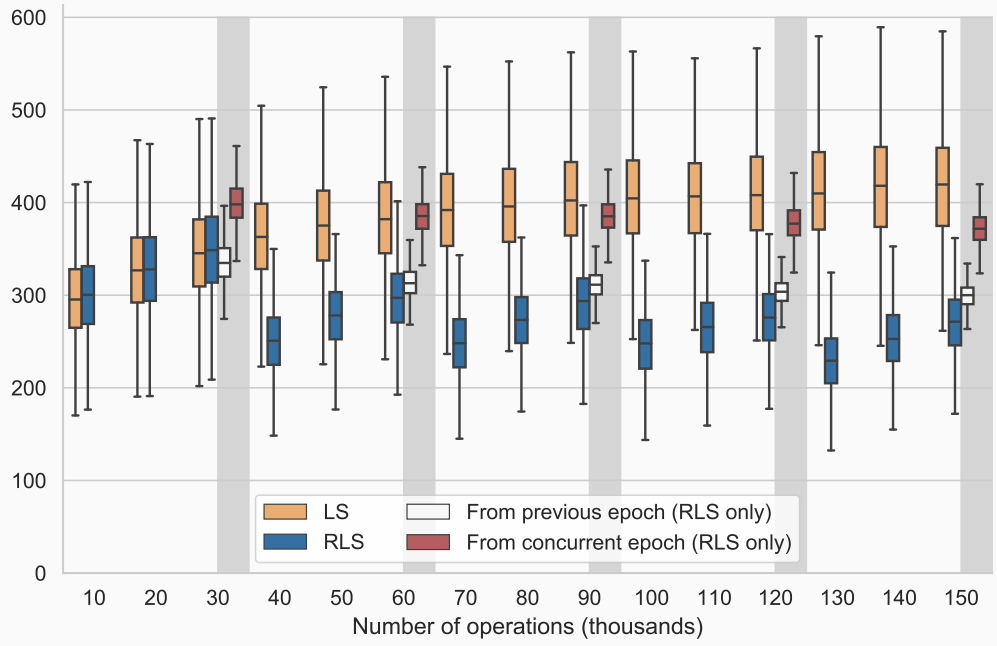
Surcoût en calculs - Opérations *insert* et *remove*

Intuition

Mesurer temps d'intégration local et distant d'opérations *insert* à différents stades de la collaboration



(a) Temps intégration modifs locales

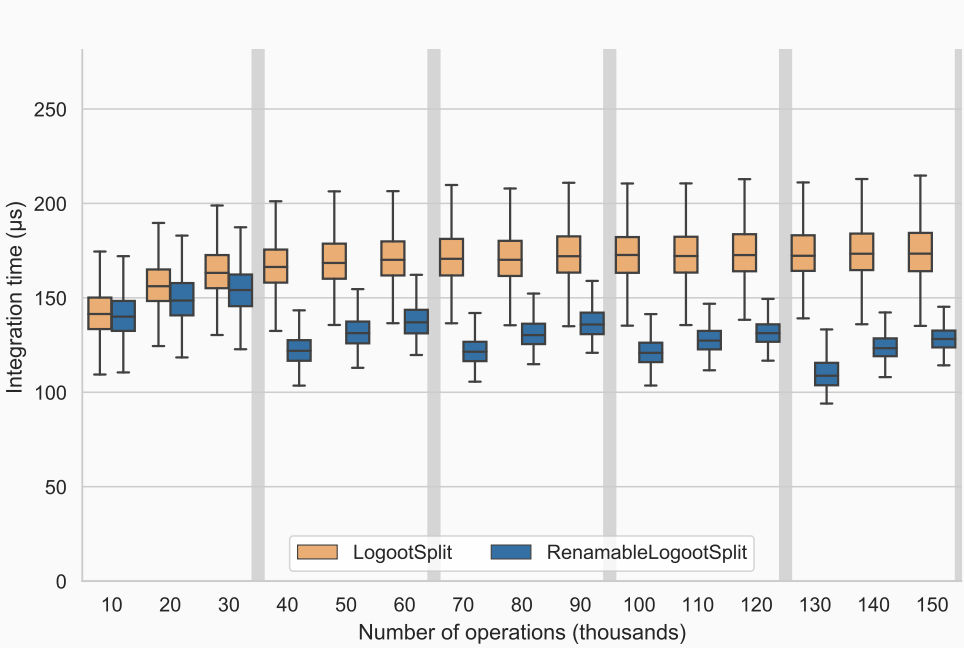


(b) Temps intégration modifs distantes

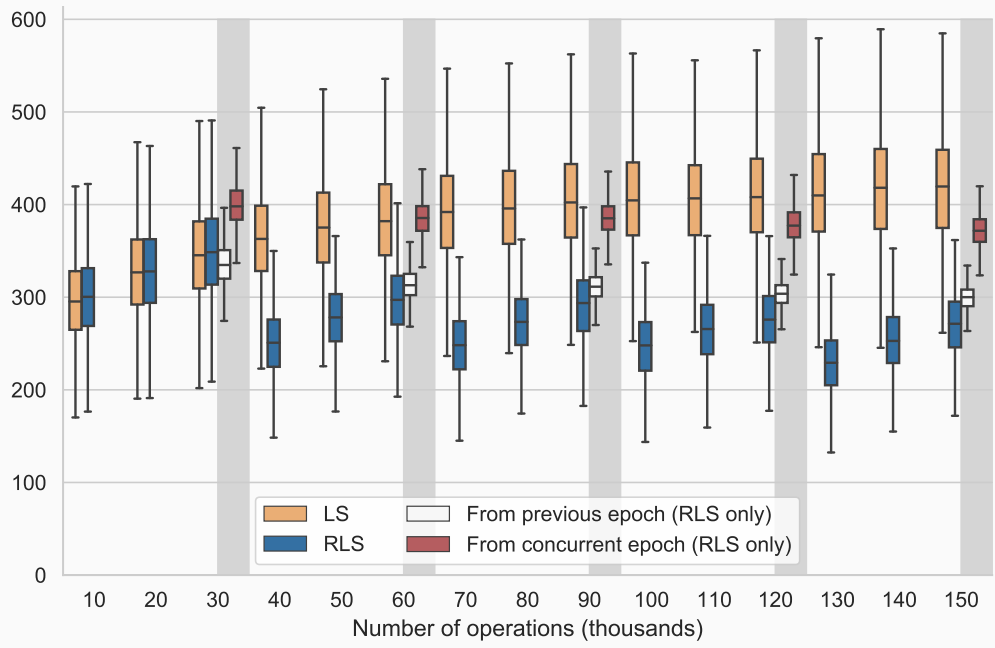
Surcoût en calculs - Opérations *insert* et *remove*

Intuition

Mesurer temps d'intégration local et distant d'opérations *insert* à différents stades de la collaboration



(a) Temps intégration modifs locales



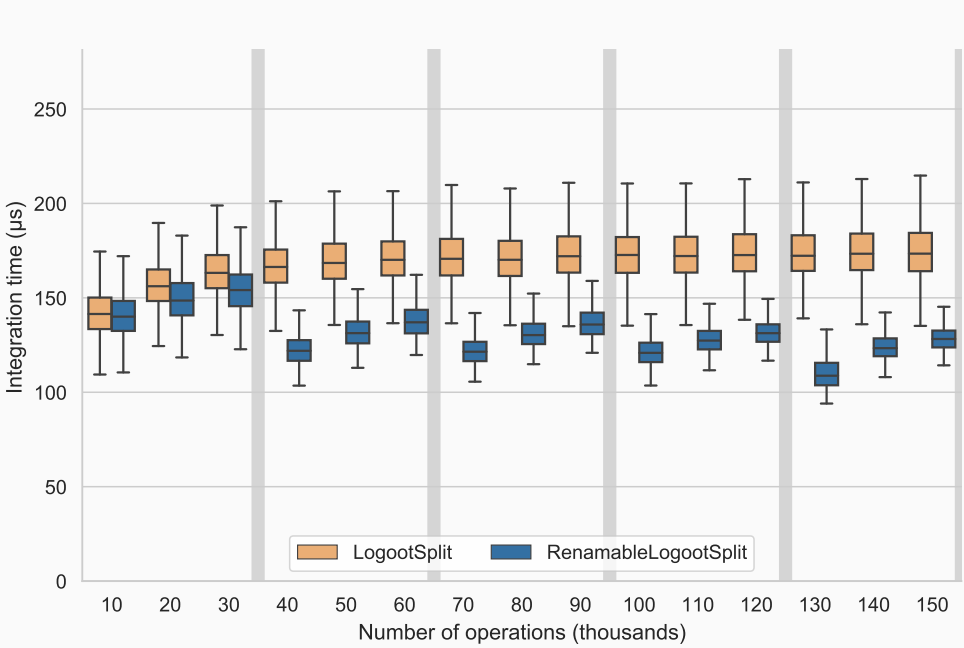
(b) Temps intégration modifs distantes

- Opérations *rename* réduisent temps intégration

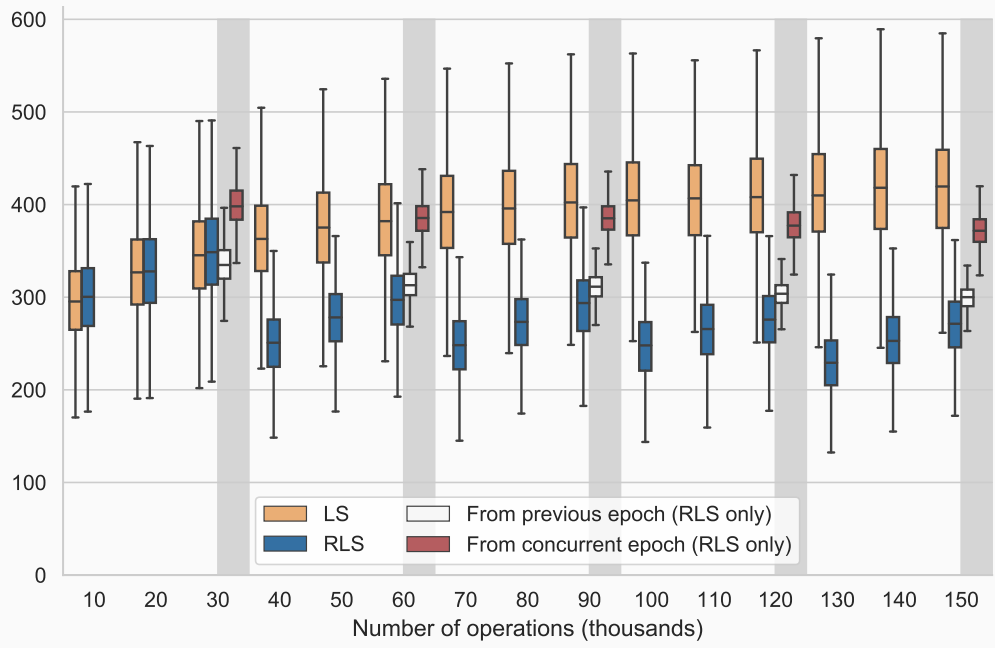
Surcoût en calculs - Opérations *insert* et *remove*

Intuition

Mesurer temps d'intégration local et distant d'opérations *insert* à différents stades de la collaboration



(a) Temps intégration modifs locales



(b) Temps intégration modifs distantes

- Opérations *rename* réduisent temps intégration
- Réduction état contrebalance surcoût transformation

Surcoûts en calculs - Opérations *rename*

Intuition

Mesurer temps d'intégration local et distant d'opérations *rename* à différents stades de la collaboration

Surcoûts en calculs - Opérations *rename*

Intuition

Mesurer temps d'intégration local et distant d'opérations *rename* à différents stades de la collaboration

Paramètres		Temps d'intégration (ms)		
Type	Nb Ops (k)	Médiane	1er Percent.	99ème Percent.
Locale	30	38.7	37.3	71.7
	90	119	116	124
	150	158	153	164
Opération *rename* distante même époque	30	477	454	537
	90	1482	1396	1658
	150	1676	1591	1853
Opération *rename* distante plus prioritaire	30	644	620	683
	90	1994	1906	2112
	150	2234	2139	2351

Surcoûts en calculs - Opérations *rename*

Intuition

Mesurer temps d'intégration local et distant d'opérations *rename* à différents stades de la collaboration

Paramètres		Temps d'intégration (ms)		
Type	Nb Ops (k)	Médiane	1er Percent.	99ème Percent.
Locale	30	38.7	37.3	71.7
	90	119	116	124
	150	158	153	164
Opération *rename* distante même époque	30	477	454	537
	90	1482	1396	1658
	150	1676	1591	1853
Opération *rename* distante plus prioritaire	30	644	620	683
	90	1994	1906	2112
	150	2234	2139	2351

- Ressentie par utilisateur-rices
- Nécessaire d'améliorer temps d'intégration distant

Surcoût en calculs - Vue globale

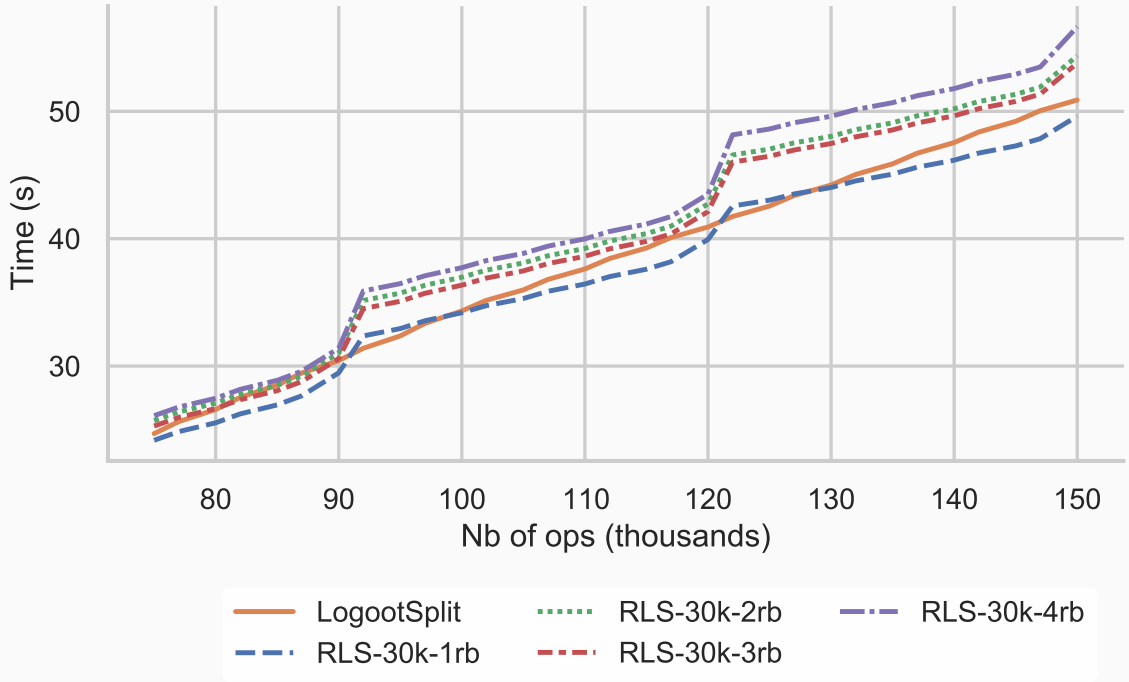
Intuition

Mesurer temps pour intégrer l'entièreté du journal d'opérations d'une collaboration en fonction du nombre de noeuds de renommage

Surcoût en calculs - Vue globale

Intuition

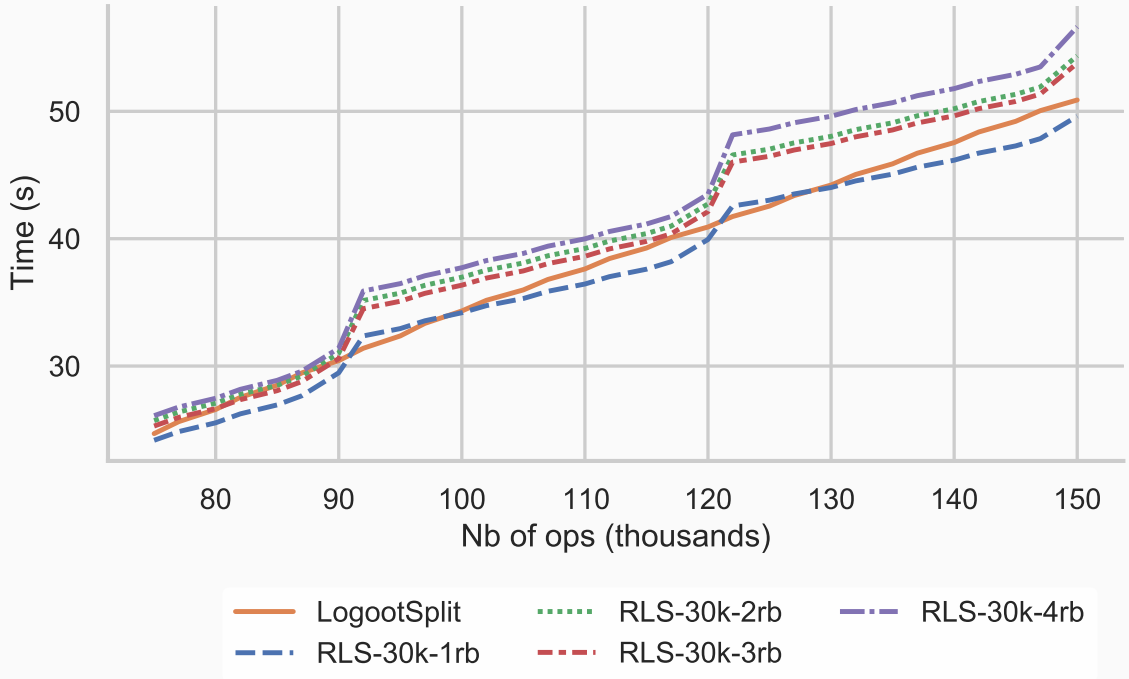
Mesurer temps pour intégrer l'entièreté du journal d'opérations d'une collaboration en fonction du nombre de noeuds de renommage



Surcoût en calculs - Vue globale

Intuition

Mesurer temps pour intégrer l'entièreté du journal d'opérations d'une collaboration en fonction du nombre de noeuds de renommage



- Initialement, gains sur opérations *insert* et *remove* contrebalancent coût des opérations *rename* ...
- ...mais coût des opérations *rename* augmente surcoût total *in fine*

Conclusion générale & Perspectives

Conclusion

Contributions

- Conception d'un mécanisme de renommage pour CRDTs pour le type Séquence à identifiants densément ordonnés
  - Implémentation et instrumentation de RenamableLogootSplit et de ses dépendances (protocole d'appartenance au réseau, couche de livraison)

Conclusion

Contributions

- Conception d'un mécanisme de renommage pour CRDTs pour le type Séquence à identifiants densément ordonnés
  - Implémentation et instrumentation de RenamableLogootSplit et de ses dépendances (protocole d'appartenance au réseau, couche de livraison)
- Comparaison des différents modèles de synchronisation pour CRDTs...
- ...et des différentes approches pour CRDTs pour le type Séquence

Limites & perspectives

Limites de RenamableLogootSplit

- Surcoût fonction du nombre d'opérations *rename* concurrentes
- Stabilité causale requise pour supprimer les métadonnées

Perspectives autour de RenamableLogootSplit

- Comment définir une relation *priority* $<_\varepsilon$ réduisant calculs à échelle du système ?
- Est-ce que RenamableLogootSplit est correct ?

Limites & perspectives

Limites de RenamableLogootSplit

- Surcoût fonction du nombre d'opérations *rename* concurrentes
- Stabilité causale requise pour supprimer les métadonnées

Perspectives autour de RenamableLogootSplit

- Comment définir une relation *priority* $<_\varepsilon$ réduisant calculs à échelle du système ?
- Est-ce que RenamableLogootSplit est correct ?

Perspectives autour des CRDTs

- Doit-on encore concevoir CRDTs synchronisés par états ou opérations ?
- Peut-on proposer un framework pour conception de CRDTs synchronisés par opérations ?

Merci de votre attention, avez-vous des questions ?

Publications

- **Article de position** à Middleware 2018 - 19th ACM/IFIP International Middleware Conference (Doctoral Symposium), Dec 2018, Rennes, France.
- **Article d'atelier** avec Gérald Oster et Olivier Perrin à PaPoC 2020 - 7th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data, Apr 2020, Heraklion / Virtual, Greece.
- **Article de revue** avec Gérald Oster et Olivier Perrin dans IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022, 33 (12), pp.3870-3885.

Benchmarks

- Node.js, version 13.1.0, avec option `jitless`
- Machiné équipée d'un Intel Xeon CPU E5-1620 (10MB Cache, 3.50 GHz), de 16GB de RAM et utilisant Fedora 31
- Taille des documents obtenus en utilisant notre fork de *object-sizeof*[*]
- Mesures de temps avec `process.hrtime.bigint()`

*. `https://www.npmjs.com/package/object-sizeof`

Doit-on encore concevoir CRDTs synchronisés par états ou opérations ?

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

- Synchronisation par différences offre meilleur des mondes…
- …y a-t-il encore un intérêt aux autres modèles, e.g. pour composition ou sécurité ?