

Systèmes et algorithmes répartis

Causalité et datation

Philippe Quéinnec, Gérard Padiou

Département Informatique et Mathématiques Appliquées
ENSEEIH

30 septembre 2018



plan

- 1 Problème de datation
 - Temps réel vs temps logique
 - Horloge de Lamport
 - Horloge vectorielle de Fidge-Mattern
- 2 Les protocoles de communication
 - Délivrance ordonnée
 - Protocoles ordonnés
 - Protocole causalement ordonné
 - Diffusion causalement ordonnée



Plan

- 1 Problème de datation
 - Temps réel vs temps logique
 - Horloge de Lamport
 - Horloge vectorielle de Fidge-Mattern
- 2 Les protocoles de communication
 - Délivrance ordonnée
 - Protocoles ordonnés
 - Protocole causalement ordonné
 - Diffusion causalement ordonnée



Problème de base et difficultés

Comment dater les événements d'une exécution répartie ?

- Pas d'horloge globale
- Tous les événements ne sont pas causalement liés
- Datation cohérente avec la relation causale :

$$\forall e, e' : e \prec e' \Rightarrow d_e < d_{e'}$$

Exemple

- Idée : \rightarrow Utiliser les horloges matérielles de chaque site
- **Risque** : Datation incohérente de l'événement de réception d'un message : la date de réception précède la date d'émission
- **Possible** si l'horloge du site de réception est en retard (suffisamment) sur celle du site de l'émetteur

Temps réel

Difficultés

- Cohérence avec la causalité
- Datation définissant un ordre total

Solutions

Nécessite une synchronisation des horloges locales :

$$\text{invariant } \max_{i=1..N} (h_i) - \min_{i=1..N} (h_i) < \epsilon$$

Protocole de synchronisation d'horloges possible mais dans des contextes réseaux assurant une certaine qualité de service ou par l'usage d'un signal diffusé (horloge atomique)



Temps logique

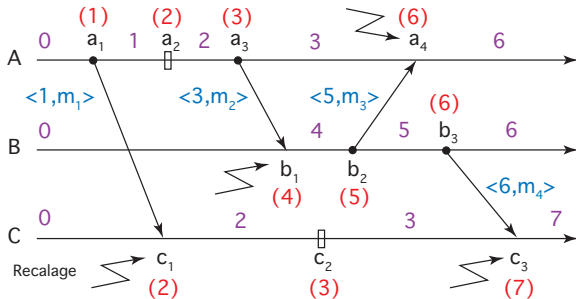
Principes de base

- Compter les événements au lieu du temps réel
- Associer à chaque site une horloge logique locale
- Surcharger les messages avec leur date d'émission
- **Recaler si nécessaire** l'horloge locale d'un site lors de chaque réception de message
- **Avantage** : vision plus abstraite d'un calcul réparti



Une tentative...

- Un compteur « horloge » sur chaque site
- Surcharge des messages et recalage de compteur



😊 $e \prec e' \Rightarrow d(e) < d(e')$

😊 Mêmes dates \Rightarrow pas causalement liés

😞 mais $d(e) < d(e') \not\Rightarrow e \prec e'$ (ex : $d(c_2) < d(b_3) \not\Rightarrow c_2 \prec b_3$)

Horloge de Lamport

Propriétés

- Introduit un ordre total entre événements
→ Dates distinctes pour tout couple d'événements
- Date = (numéro de site, compteur local)
⇒ ordre total sur les sites (par leur numéro)

```
struct Date { int s;    // numéro de site
              int cpt; // compteur d'événements
}
bool prec (Date d1, Date d2) {
    return (d1.cpt < d2.cpt)
        || ((d1.cpt == d2.cpt) && (d1.s < d2.s));
}
```

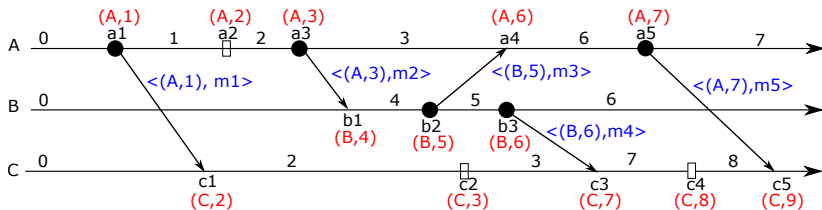
1. *Time, Clocks and the Ordering of Events in a Distributed System*, Leslie Lamport. Communications of the ACM, July 1978.



Actions associées aux événements

L'événement est daté avec le résultat de l'action.

Type d'événement sur un site s	Action sur le site s
Événement interne sur s	$H_s \leftarrow H_s + 1;$
Émission sur s de m	$H_s \leftarrow H_s + 1;$ envoi de $\langle H_s, m \rangle;$
Réception sur s de $\langle dm, m \rangle$	$H_s \leftarrow \max(H_s, dm) + 1;$



Handwritten signature

Horloge vectorielle de Fidge-Mattern (1988)

Propriétés

- datation isomorphe à l'ordre causal
- utilisation de vecteurs de dimension égale au nombre de sites
- coût plus élevé : surcharge des messages par un vecteur
- Pour un événement e , $HV(e)[i] =$ nombre d'événements du passé de e sur p_i (y compris e)

Expression des relations entre dates

$$\begin{aligned} D \leq D' &\triangleq \forall i : D[i] \leq D'[i] \\ D < D' &\triangleq D \leq D' \wedge \exists k : D[k] < D'[k] \\ D \parallel D' &\triangleq \neg(D < D') \wedge \neg(D' < D) \end{aligned}$$

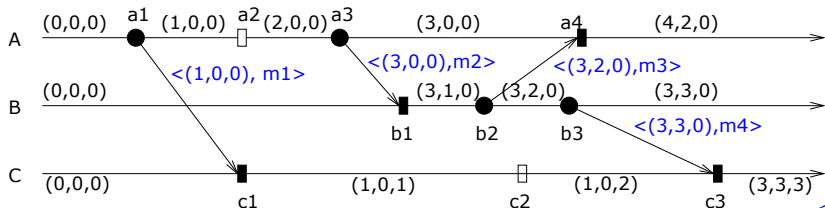
1. *Timestamps in Message-Passing Systems That Preserve the Partial Ordering*, Colin J. Fidge. 11th Australian Computer Science Conference, 1988.
2. *Virtual Time and Global State in Distributed Systems*, Friedemann Mattern. Int'l Workshop on Parallel and Distributed Algorithms, 1989.



Actions associées aux événements

L'événement est daté avec le résultat de l'action.

Type d'événement sur un site s	Action sur le site s
Événement interne sur s	$H_s[s] \leftarrow H_s[s] + 1$
Émission sur s de m	$H_s[s] \leftarrow H_s[s] + 1$ envoi de $\langle H_s, m \rangle$
Réception sur s de $\langle dm, m \rangle$	$H_s[s] \leftarrow H_s[s] + 1$ $H_s[s'] \leftarrow \max(H_s[s'], dm[s']), \forall s' \neq s$



Horloge vectorielle de Fidge-Mattern

Datation isomorphe à l'ordre causal

$$e \prec e' \Leftrightarrow D(e) \leq D(e') \quad \text{et} \quad e \parallel e' \Leftrightarrow D(e) \parallel D(e')$$

Coupure

- Date d'une coupure $C = (c_1, \dots, c_n)$:
$$HV(C) \triangleq \sup(HV(c_1), \dots, HV(c_n))$$
- $C_2 \subset C_1 \Leftrightarrow HV(C_2) < HV(C_1)$
- C cohérente $\Leftrightarrow HV(C) = \langle HV(c_1)[1], \dots, HV(c_n)[n] \rangle$

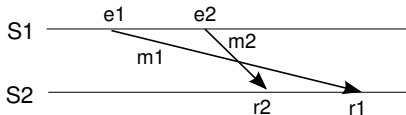
- Soit C cohérente. Alors $\forall i, j : HV(c_i)[i] \geq HV(c_j)[i]$.
En effet, l'incréméntation de $HV(c_i)[i]$ ne peut venir que d'un événement local ou résulter d'un message provenant du passé.
- Soit C non cohérente.
 \Rightarrow il existe un événement e_i hors coupe qui est dans le passé causal de C
 \Rightarrow Sur le site $i : HV(c_i)[i] < HV(e_i)[i]$ et $HV(e_i)[i] \leq HV(C)[i]$
 $\Rightarrow HV(C)[i] > HV(c_i)[i]$, donc $HV(C) \neq (HV(c_1)[1], \dots, HV(c_n)[n])$

Plan

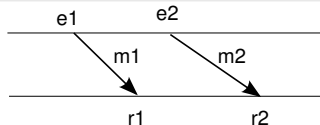
- 1 Problème de datation
 - Temps réel vs temps logique
 - Horloge de Lamport
 - Horloge vectorielle de Fidge-Mattern
- 2 Les protocoles de communication
 - Délivrance ordonnée
 - Protocoles ordonnés
 - Protocole causalement ordonné
 - Diffusion causalement ordonnée



Protocole FIFO

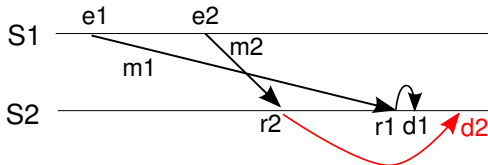


Non FIFO



FIFO

$$\forall m, m' : s_1 \xrightarrow{m} s_2 \wedge s_1 \xrightarrow{m'} s_2 \wedge e(m) \prec e(m') \Rightarrow r(m) \prec r(m')$$

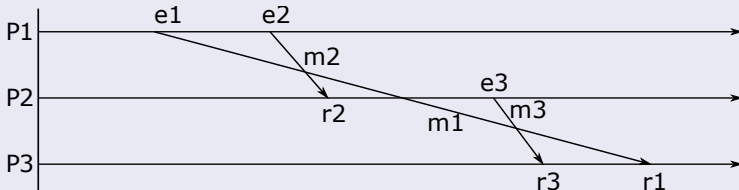


délivrance \neq réception

Protocole causalement ordonné

Objectif : Mettre de l'ordre

Réceptions incohérentes par rapport aux émissions



$r_3 \prec r_1$ alors que $e_1 \prec e_3$

\Rightarrow délivrance \neq réception

1. *Reliable communication in the presence of failures*, Kenneth P. Birman and Thomas A. Joseph. ACM Transactions on Computer Systems, January 1987.

Protocole FIFO

Objectif

Garantir la cohérence des réceptions sur un même site par rapport à leur éventuelle émission depuis un même site

⇒ réordonner les messages reçus sur un site

- Trois événements au lieu de deux par message :
 - l'émission e ,
 - la réception r ,
 - la délivrance d .
 - Causalité : $e \prec r \prec d$
- S'exprime par la propriété :

$$\forall s_1, s_2, m, m' : s_1 \xrightarrow{m} s_2 \wedge s_1 \xrightarrow{m'} s_2 \wedge e(m) \prec e(m') \\ \Rightarrow d(m) \prec d(m')$$

Protocole FIFO

Réalisation : il suffit de numéroter les messages pour **chaque canal**
(couple site d'émission, site de réception)

Récepteur pour **un canal** :

```
type Message = ⟨contenu, numéro⟩;
int prochain = 0;
SortedSet<Message> enAttente; // trié par numéro
while (true) {
    recevoir m;
    enAttente.add(m);
    while (enAttente.first().numéro == prochain) {
        m ← enAttente.removeFirst();
        délivrer m.contenu
        prochain++;
    }
}
```

Protocole causalement ordonné

Objectif

Garantir la cohérence des réceptions sur un même site par rapport à leur causalité éventuelle en émission

⇒ réordonner les messages reçus sur un site

- Trois événements au lieu de deux par message :
 - l'émission e ,
 - la réception r ,
 - la délivrance d .
 - Causalité : $e \prec r \prec d$
- S'exprime par la propriété :

$$\forall s, m, m' : \neg \xrightarrow{m} s \wedge \neg \xrightarrow{m'} s \wedge e(m) \prec e(m') \\ \Rightarrow d(m) \prec d(m')$$

Histoire causale

Histoire causale d'un message $H_c(m)$

L'histoire causale $H_c(m)$ d'un message m est l'ensemble des messages qui ont leurs événements d'émission précédant causalement l'émission de m :

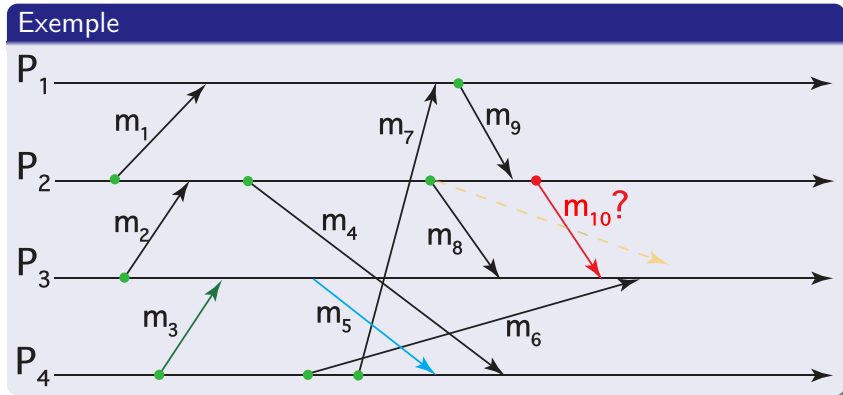
$$H_c(m) = \{m' : e(m') \prec e(m)\}$$

Critère de délivrance d'un message

Un message m est délivré sur un site s ssi tous les messages de son histoire causale **ayant aussi s comme site de destination** ont été déjà délivrés :

$$\forall s, m' \in H_c(m) : \neg \xrightarrow{m} s \wedge \neg \xrightarrow{m'} s \wedge \Rightarrow d(m') \prec d(m)$$

Histoire causale : exemple



$$H_c(m_{10}) = \{m_8, m_4, m_9, m_7, m_1, m_6, m_3, m_2\}$$

$$H_c(m_6) = \{m_3\}$$

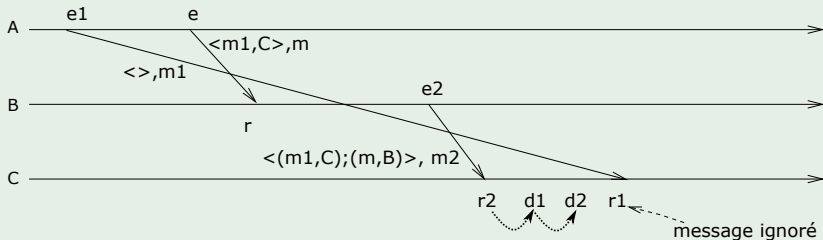
$$H_c(m_8) = \{m_4, m_1, m_2\}$$

Approche par surcharge (piggybacking)

Principe

- Surcharger chaque message avec l'histoire des messages qui le précèdent causalement
- Dans le contexte du courrier électronique : Approche similaire du « réexpédier » avec copie de ce que l'on a reçu

Exemple

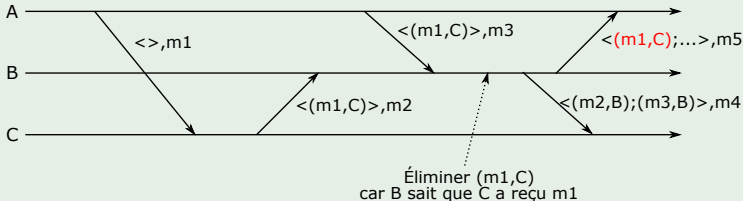


Approche par surcharge (piggybacking)

Mise en œuvre

- 😊 Simple et apport d'une certaine tolérance aux pertes de messages par redondance
- ☹ Messages de + en + longs
⇒ Quand, Comment réduire les histoires ?

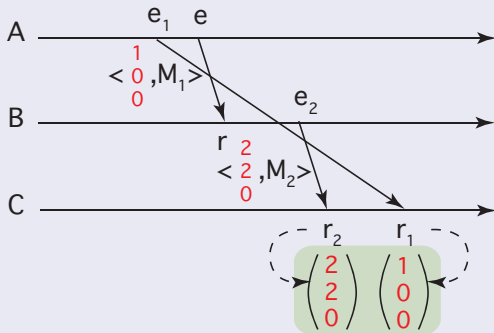
Exemple



Datation, premier essai...

Datation causale (horloge vectorielle)

Permet la détection des anomalies en réception MAIS pas leur prévention



Approche par compteurs

Structures de données

Représenter l'histoire causale de chaque message

Chaque site S_s gère :

- MP_s : une matrice de précédence causale
 $MP_s[i, j]$ = nombre de messages émis de S_i vers S_j ,
connu de S_s
- $Dernier_s$: un vecteur de compteurs des messages reçus de
chaque site
 $Dernier_s[i]$ = nombre de messages reçus du site S_i sur S_s
- Tout message est surchargée par une copie de la matrice MP
du site émetteur

1. *The Causal Ordering Abstraction and a Simple Way to Implement it*,
Michel Raynal, André Schiper and Sam Toueg. Information Processing Letters, 1991.



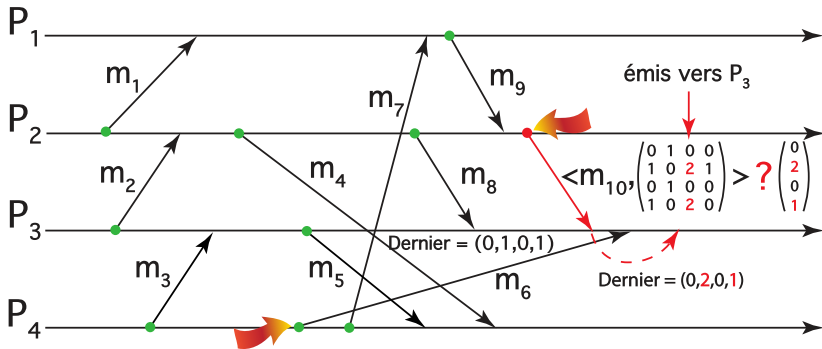
Actions associées aux événements

Type d'événement sur un site s	Action sur le site s
Émission sur s de m vers s'	$MP_s[s, s'] ++$ envoi de $\langle MP_s, M \rangle$
Réception sur s de $\langle MP, m \rangle$ issu de s'	$MP_s \leftarrow \max(MP, MP_s)$ $Dernier_s[s'] ++$
Délivrance sur s de $\langle MP, m \rangle$ issu de s'	Délivrable(m) \triangleq $Dernier_s[s'] = MP[s', s]$ $\wedge \forall i \neq s : Dernier_s[i] \geq MP[i, s]$

m délivrable \triangleq FIFO entre s' et s et il ne précède pas les messages dont l'émission le précède causalement.



Contrôle des délivrances



Horloges de plus en plus précises

Horloges de Lamport

Passé de l'ensemble du système, connu de s , réduit à la longueur de la plus longue chaîne causale aboutissant à l'événement

Horloges vectorielles

Connaissance de premier ordre : passé de s' que s connaît, connaissance par s que s' a eu un certain nombre d'événements

Horloges matricielles

Connaissance de second ordre : connaissance par s de la connaissance par s' du passé de s'' .

Par exemple, permet de savoir que *tous les sites* connaissent un événement donné

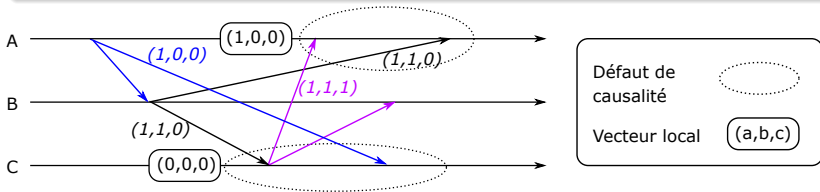


Diffusion causalement ordonnée

La **diffusion** ordonnée est plus simple que la communication point-à-point !

Approche par matrice causale

- Il suffit de gérer un **vecteur** d'émission au lieu d'une matrice
- Toutes les colonnes sont identiques : un processus envoie le même nombre de messages à tous



1. *Lightweight Causal and Atomic Group Multicast*, Kenneth P. Birman, André Schiper and Pat Stephenson. ACM Transactions on Computer Systems, 1991.

Conclusion

- Datation logique des événements
- Protocoles de communication ordonnés
- Distinction réception / délivrance

