

Cours ASPD

Temps et datation dans les systèmes répartis

Protocoles de groupe et protocoles d'exclusion mutuelle

Telecom Nancy 2A IL

Dominique Méry
Telecom Nancy
Université de Lorraine

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

Section Courante

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

]

Raisonneur sur un système réparti

- Définir un état du système réparti : état local, état des communications, ...
- Ordonner les différentes actions ou événements du système réparti mais maintenir la cohérence des données.
- Tenir compte des niveaux d'abstraction et des couches

Raisonneur sur un système réparti

- Définir un état du système réparti : état local, état des communications, ...
- Ordonner les différentes actions ou événements du système réparti mais maintenir la cohérence des données.
- Tenir compte des niveaux d'abstraction et des couches

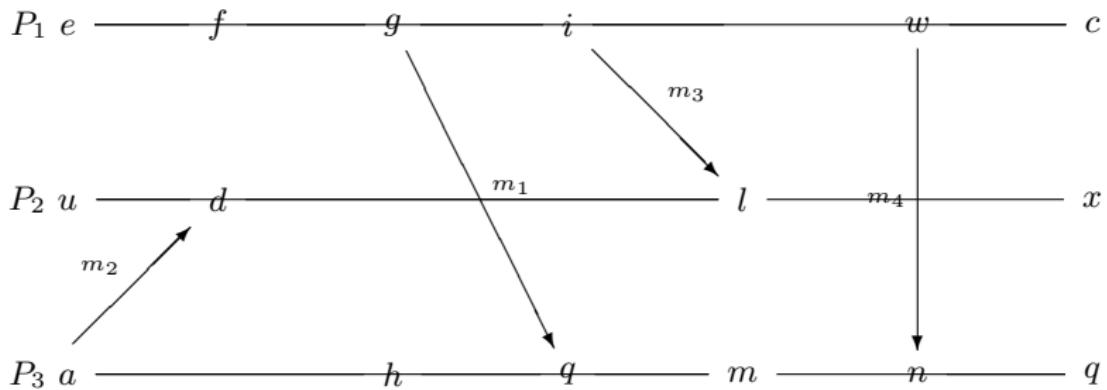
Motivation principale

Les mécanismes de communication point à point sont généralisés à des communication de groupe :

- un processus p envoie un message m à un groupe de processus D : protocole de diffusion
- propriétés attendues de ce type de protocole
 - ▶ validité : toute diffusion d'un message m par un processus p non-fautif à un groupe D conduit fatalement à la délivrance du message par tous les membres non-fautifs du groupe.
 - ▶ accord : si un processus non-fautif délivre le message m, alors tous les membres non-fautifs délivrent m.
 - ▶ intégrité : un message m est délivré au plus une fois à tout processus non-fautif, et seulement s'il a été diffusé par un processus.

Datation des événements

- Datation induite par l'horloge locale :
 - ▶ ordre des événements = ordre de la suite des instructions
 - ▶ e arrive avant f : e est exécuté sur le site S avant f .
 - ▶ $e \sim f$ signifie $e; f$
- Datation sur des sites différents : comment définir un ordre sur les événements ?

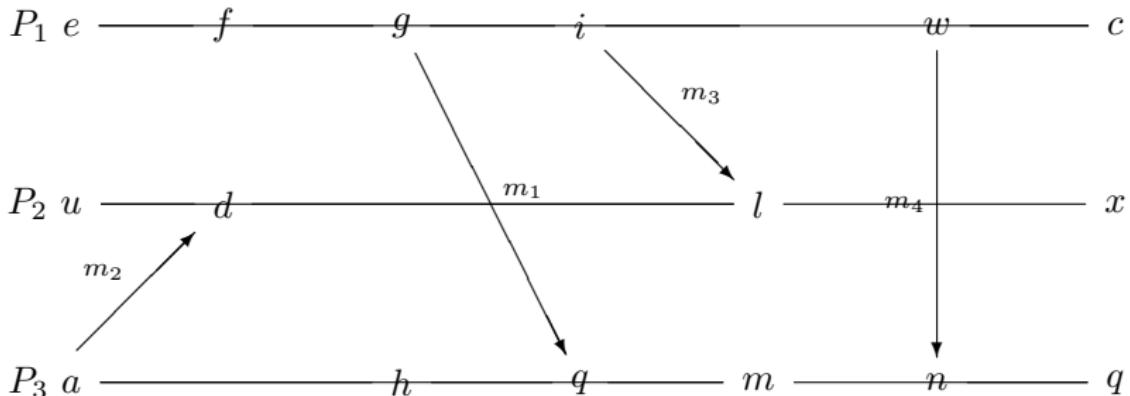




- Construire un ordre sur les événements conservant les ordres :
 - ▶ l'ordre sur les processeurs
 - ▶ l'ordre sur les opérations d'envoi de message
- Solution de Lamport en 1978 : causalité
- $e \rightsquigarrow f$: e précède f ou e arrive avant f

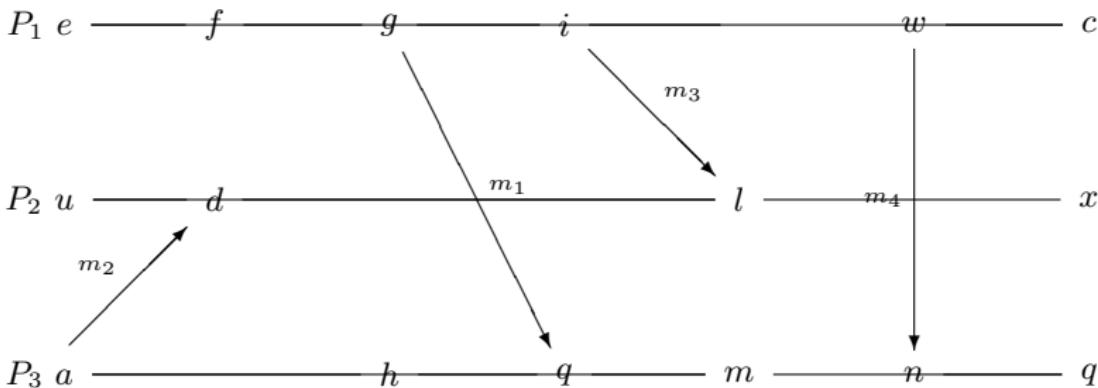
Règles de construction de la relation \rightsquigarrow

- **Règle 1** : Si deux événements a et b d'un même processus et si le temps d'occurrence de a est antérieur à b, alors $a \rightsquigarrow b$.
- **Règle 2** : Si a est un événement d'envoi d'un message par un processus P à un processus Q et si b est l'événement de réception du même message, alors $a \rightsquigarrow b$:
- **Règle 3** : Si $a \rightsquigarrow b$ et $b \rightsquigarrow c$, alors $a \rightsquigarrow c$.

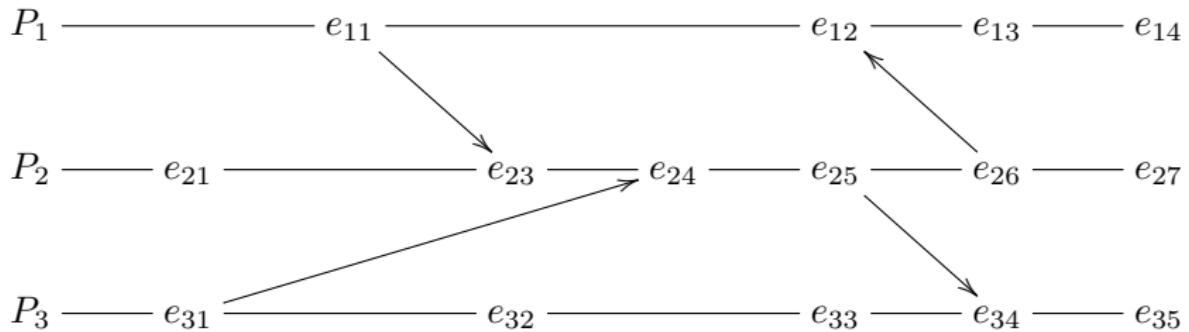


Ordre causal

- Pour chaque événement $e \in E$, on définit :
 - ▶ $Past(e) = \{e' \in E | e' \sim e\}$: passé de l'événement e .
 - ▶ $Future(e) = \{e' \in E | e \sim e'\}$: futur de l'événement e .
 - ▶ $Concurrent(e) = (E - \{e\}) - (Future(e) \cup Past(e))$: événements indépendants de e
 - ▶ $e \parallel f$ ou $e \# f$: $e' \in Concurrent(e)$ ou $e \in Concurrent(e')$
 - ▶ Propriété : $e \in Concurrent(e')$ si, et seulement si,
 $e \in Concurrent(e')$



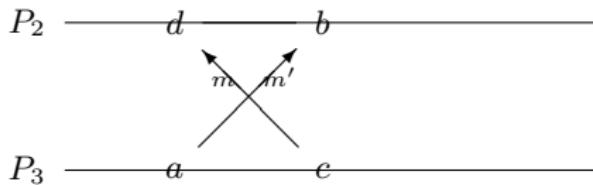
Exemple de datation



Événements d'un système

- e : événement local à un processus donné
- $Emission_i(m, j)$: émission d'un message m par le processus i .
- $Send_i(m, j)$: événement d'envoi dans le processus i d'un message m à un autre processus.
- $Receive_i(m, j)$: événement de réception par le processus i d'un message m provenant d'un autre processus.
- $Deliver_i(m, j)$: événement marquant la livraison effective du message m par le processus i .

P_1 —————



- ① a envoie un message à b
- ② c envoie un message à d
- ③ Anomalie : l'ordre d'envoi n'est pas respecté par la réception.

Réception FIFO

Si un message m est envoyé par un processus P avant un message m' , alors le message m est reçu par le processus Q avant de recevoir le message m' ou encore

Si $Send_i(m, j) \rightsquigarrow Send_i(m', j)$, alors $Receive_j(m, i) \rightsquigarrow Receive_j(m', i)$

anomalie FIFO

P_1 —————

P_2 ————— d ————— b —————

P_3 ————— a ————— e —————

- ① a envoie un message à b
- ② c envoie un message à d
- ③ Anomalie : l'ordre d'envoi n'est pas respecté par la réception.

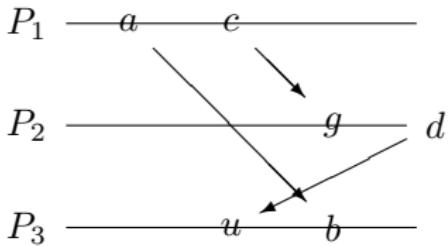
Livraison CAUSALE

Si un message m est envoyé par un processus P avant un message m' envoyé après pour l'ordre causal, alors le message m est reçu par le processus Q avant de recevoir le message m' ou encore :

Si $Send_i(m, j) \sim Send_k(m', j)$, alors

$Deliver_j(m, i) \sim Deliver_j(m', k)$

anomalie CAUSALE



- ① c envoie un message à g
- ② d envoie un message à u
- ③ g précède d
- ④ Anomalie : a précède c et u précède b .

- LC désigne une horloge logique (**Logical Clock**)
- LC est une fonction associant à tout événement une valeur entière.
- Toute occurrence d'un événement interne à un processus conduit à l'incrément de 1 de l'horloge locale.
- Quand on envoie un message, on ajoute la valeur de LC au message envoyé.
- Quand on reçoit un message, la valeur de LC est positionnée au maximum de l'horloge locale et de la valeur du message plus 1.
- **Propriété des horloges logiques** : Si $a \rightsquigarrow b$, alors $LC(a) < LC(b)$.

Gestion des horloges logiques

- Définition

- ▶ Chaque site i dispose d'une horloge locale noté $LC_i : LC_i \in E_i \rightarrow \mathbb{N}$
- ▶ Une fonction d'estampillage est définie et notée TS et associe à tout message une valeur : $TS \in M \rightarrow \mathbb{N}$
- ▶ Pour tout événement local e à un processus $i : e \in \text{dom}(LC_i)$.
- ▶ Tout message m envoyé est estampillé par une valeur définie par une fonction d'estampillage : $m \in \text{dom}(TS)$.
- ▶ Pour chaque événement e , on notera $P(e)$ le processus d'exécution de e .

- Opérations

- ▶ Initialement, les horloges sont définies par 0 pour le premier événement qui existe toujours et qui correspond à l'initialisation en $i : start_i \in P(i)$ et $start(i) \in \text{dom}(LC_i)$ et $LC_i(start(i)) = 0$
- ▶ Si un événement e est local à i , alors $LC_i(e) := \text{Max}(\text{ran}(LC_i)) + 1$.
- ▶ Si un événement e est l'envoi d'un message m , alors $LC_i(e) := \text{Max}(\text{ran}(LC_i)) + 1$ et $TS(m) := LC_i(e)$
- ▶ Si un événement e est la réception d'un message m , lors on met à jour l'horloge locale : $LC_i(e) := \text{Max}(TS(m), \text{Max}(\text{ran}(LC_i))) + 1$.

Exemple de datation

- Chaque événement est affecté d'un entier

Exemple de datation

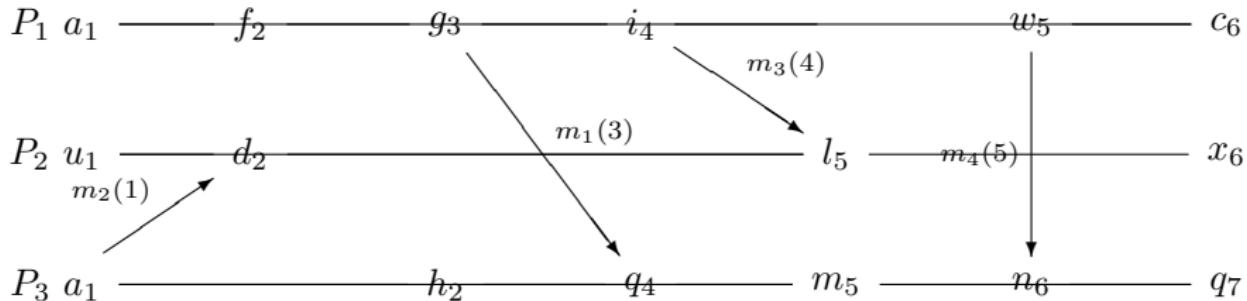
- Chaque événement est affecté d'un entier
- Deux événements peuvent avoir la même valeur

Exemple de datation

- Chaque événement est affecté d'un entier
- Deux événements peuvent avoir la même valeur

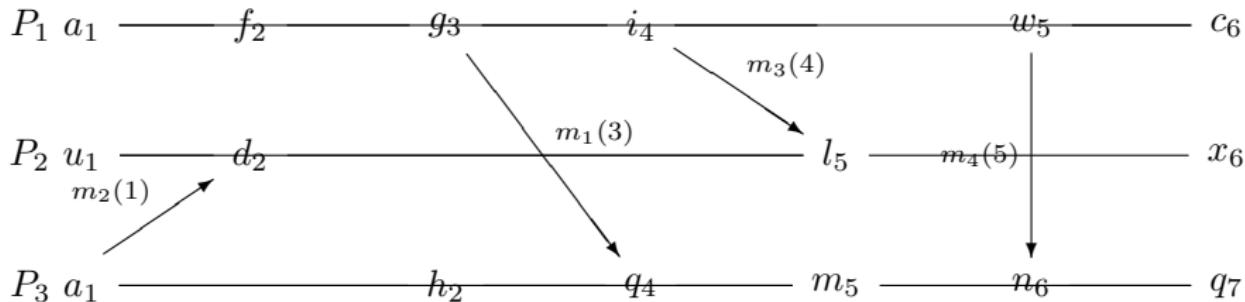
Exemple de datation

- Chaque événement est affecté d'un entier
- Deux événements peuvent avoir la même valeur



Exemple de datation

- Chaque événement est affecté d'un entier
- Deux événements peuvent avoir la même valeur



- f₂ et d₂ sont deux événements non-comparables avec le même numéro. et constituent un contre-exemple à la réciproque de la propriété : $f_2 \# d_2$
- g₃ et d₂ sont deux événements non-comparables avec des numéros comparables et constituent un contre-exemple à la réciproque de la propriété : $g_3 \# d_2$

Définition d'un ordre strict

- L'estampille d'un événement e est définie par la paire $(LC_{P(e)}(e), P(e))$.
- On définit un ordre strict sur les estampilles par $LC(e) = (LC_{P(e)}(e), P(e))$.
 - ▶ $LC(e) \prec LC(f)$ ou $(LC_{P(e)}(e), P(e)) \prec (LC_{P(f)}(f), P(f))$:
$$\left\{ \begin{array}{l} LC_{P(e)}(e) < LC_{P(f)}(f) \\ \text{ou} \quad (LC_{P(e)}(e) = LC_{P(f)}(f)) \text{ et } (P(e) < P(f)) \end{array} \right.$$
- \prec est transitive
- **Propriété** : Si $e \rightsquigarrow f$, alors $LC(e) \prec LC(f)$.

Démonstration de la propriété

Propriété

Si $e \rightsquigarrow f$, alors $LC(e) \prec LC(f)$.

Démonstration Récurrence sur la longueur de la suite $e \rightsquigarrow f$.

- $e \rightsquigarrow f$ est de longueur 1 : deux cas sont envisagés

► e et f sont deux événements locaux et se suivent :

$$LC(f) = LC(e)+1$$



► e est un envoi de m et f est la réception de m :

$$LC(f) = \text{Max}(TS(m), \text{Max}(\text{ran}(LC_i)))+1 \text{ et}$$

$$TS(m) = LC_{P(e)}(e). \text{ On en déduit que } LC(e) \prec LC(f).$$



- $e \rightsquigarrow f$ est de longueur strictement plus grande que 1 : Dans ce cas, on a une suite de longueur n telle que

$$e = e_0 \dots e_i \dots e_n = f \text{ d'événements liés par la relation } \rightsquigarrow (\forall i \in \{0 \dots n-1\}. e_i \prec e_{i+1})$$

► Par hypothèse de récurrence et par construction de \rightsquigarrow , on déduit que $e \rightsquigarrow e_{n-1}$ et $LC(e) \prec LC(e_{n-1})$.

► Puisque $e_{n-1} \prec e_n$, on analyse les deux cas comme pour le pas de récurrence initiale pour établir que $LC(e_{n-1}) \prec LC(e_n)$

► Par transitivité de la relation \prec , on établit que $LC(e) \prec LC(f)$. □

Section Courante

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

]

Estampillage de Lamport

- e est local à $i : l(e) \stackrel{\text{def}}{=} e \wedge clock' = clock[i] - > clock[i] + 1]$
 - e est un envoi de i à $j : l(e) \stackrel{\text{def}}{=} clock' = clock[i] - > clock[i] + 1 \wedge e \wedge file' = file[i, j] - > < m, clock[i] + 1 >$
 - e est une réception par i de $j :$
$$l(e) \stackrel{\text{def}}{=} < m, c > = file[i, j] \wedge e \wedge file' = file[i, j] - > <> \\] \wedge clock' = clock[i] - > Max(clock[i], c) + 1]$$
-
- Superposer une nouvelle variable $clock$ pour enregistrer le temps local.
 - Appliquer une progression des variables locales selon l'occurrence des événements.

Estampillage de Lamport

- Une estampille (timestamp) est une couple formé d'une valeur entière positive et d'un entier naturel.
- Les estampilles sont comparables par la relation d'ordre totale suivante :

$$\langle c, i \rangle < \langle d, j \rangle \stackrel{\text{def}}{=} (c < d) \vee (c = d \wedge i < j)$$

Préservation des propriétés

- Si un système réparti satisfait une propriété d'invariance I , alors le système transformé satisfait I .
- Si un système réparti satisfait une propriété de sûreté S , alors le système transformé satisfait S .
- Tout système transformé est un raffinement du système transformé.

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

]

- **Propriété des horloges logiques** : Si $a \rightsquigarrow b$, alors $LC(a) \prec LC(b)$.
- L'ordre \prec ne permet pas, en comparant les valeurs des horloges, de déduire une causalité entre 2 événements.
- Pour y remédier on va associer aux événements un vecteur d'horloges qui permettra de décider, s'il y a une relation de causalité entre 2 événements :

Objectif des horloges vectorielles

$a \rightsquigarrow b$ si, et seulement si, $VC(a) \prec_v VC(b)$.

Illustration 1

$LC(e) = 1$ et $LC(g) = 2$, e et g ne sont pas comparables pour \prec .

Example

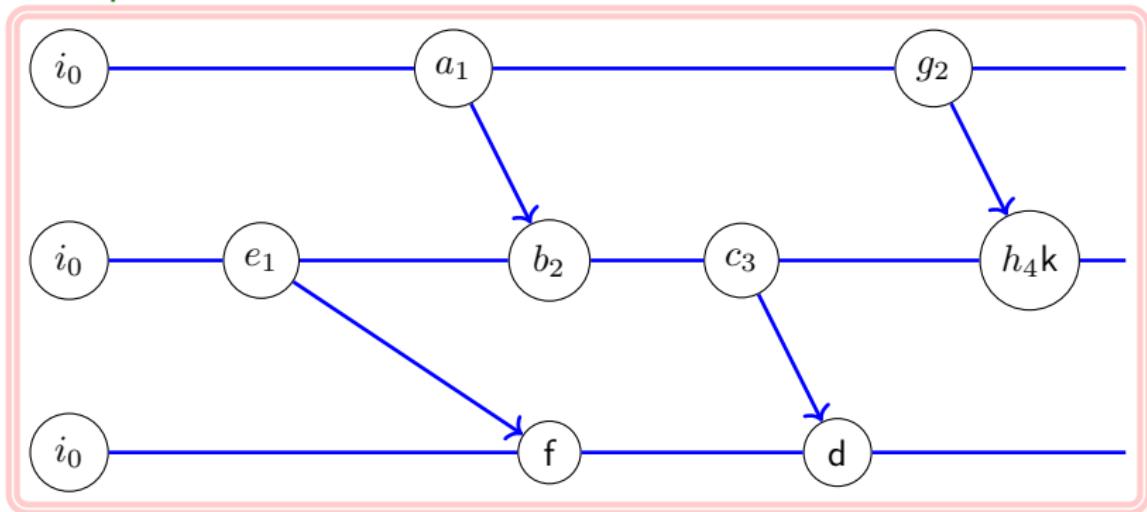


Illustration des vecteurs d'horloge

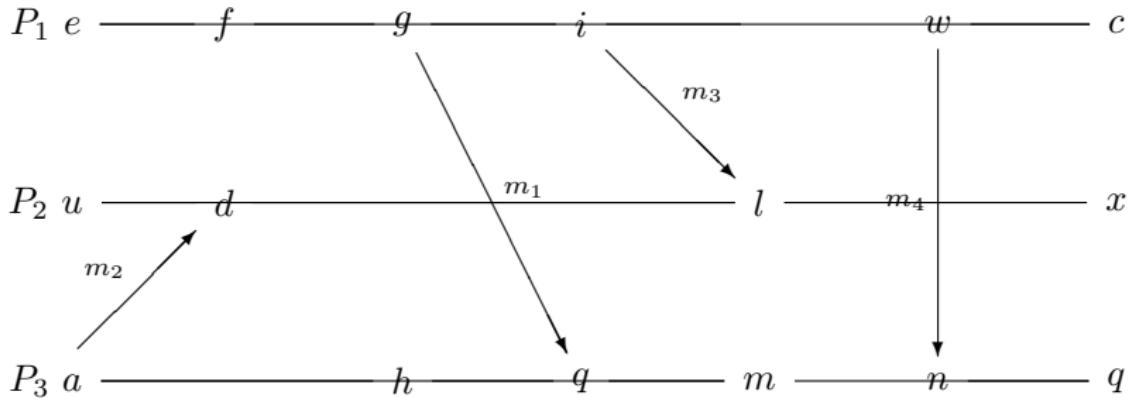


Illustration des vecteurs d'horloge

Illustration des vecteurs d'horloge

devient décoré comme suit

Illustration des vecteurs d'horloge

devient décoré comme suit

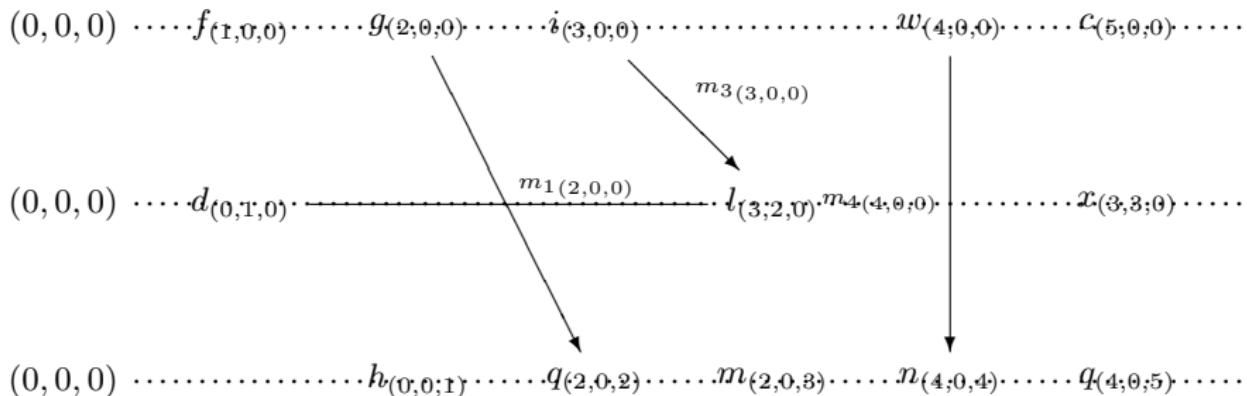
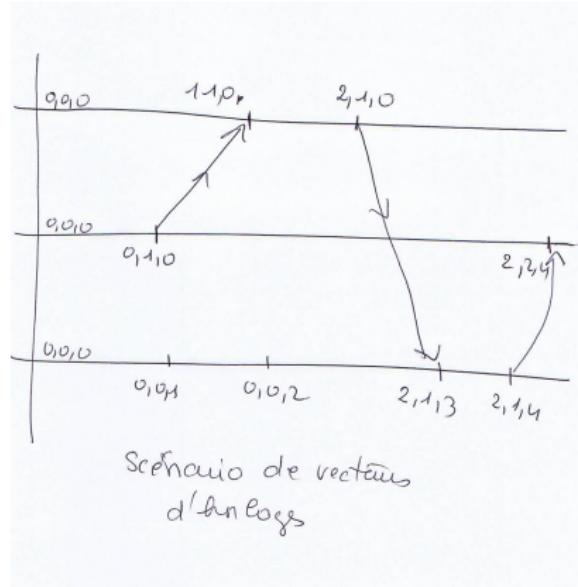


Illustration 2



Contexte

- Chaque site $i \in \{1 \dots n\}$ dispose d'un vecteur local noté VC_i :
 $VC_i \in E_i \rightarrow \mathbb{N}^n$
- Une fonction d'estampillage est définie et notée MC et associe à tout message une valeur : $MC \in M \rightarrow \mathbb{N}^n$
- Pour tout événement local e à un processus i : $e \in dom(VC_i)$.
- Tout message m envoyé est estampillé par une valeur définie par une fonction d'estampillage : $m \in dom(MC)$.
- Pour chaque événement e , on notera $P(e)$ le processus d'exécution de e .

Opérations sur les n-uplets d'entiers

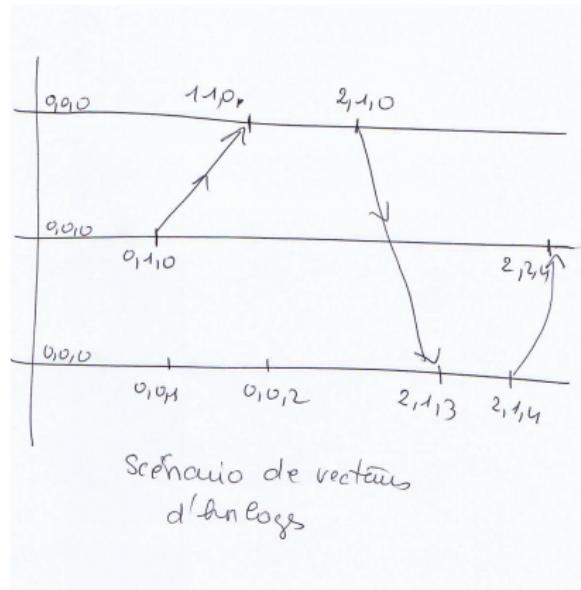
- $v \in 1..n \rightarrow \mathbb{N}$ et $w \in 1..n \rightarrow \mathbb{N}$
- $1_i \in 1..n \rightarrow \mathbb{N}$:
 - ▶ $1_i(i) = 1$
 - ▶ $\forall j. j \in \{1..n\} \wedge j \neq i \Rightarrow 1_i(j) = 0$
- $v \oplus 1_i \in 1..n \rightarrow \mathbb{N}$:
 - ▶ $(v \oplus 1_i)(i) = v(i) + 1$
 - ▶ $\forall j. j \in \{1..n\} \wedge j \neq i \Rightarrow (v \oplus 1_i)(j) = v(j)$
- $v \leq_{uple} w : \forall j. j \in \{1..n\} \Rightarrow v(j) \leq w(j)$
- $Max \in POW(1..n \rightarrow \mathbb{N}) \leftrightarrow 1..n \rightarrow \mathbb{N}$:
 - ▶ $dom(Max) \subseteq POW(1..n \rightarrow \mathbb{N}) - \{\emptyset\}$
 - ▶ Max renvoie la valeur maximale (selon l'ordre \leq_{uple}) d'un ensemble fini de n-uplets, si elle existe.
 - ▶ $Max(\{(0, 1, 0), (3, 4, 0), (7, 0, 9)\})$ n'existe pas.
 - ▶ $Max(\{(0, 1, 0), (3, 4, 0), (7, 6, 9)\}) = (7, 6, 9).$
- Pour tout n-uplet u ($\in 1..n \rightarrow \mathbb{N}$), on définit la j -ième projection par la notation $u(j)$.
 - ▶ $(0, 6, 5)(2) = 6, (0, 6, 5)(1) = 0, (0, 6, 5)(3) = 5$

Vecteur d'horloges (II)

Mécanisme

- Initialement, les horloges sont définies par $(0, 0, 0)$ pour le premier événement qui existe toujours et qui correspond à l'initialisation en $i : start_i \in P(i)$ et $start(i) \in \text{dom}(VC_i)$ et $VC_i(start(i)) = (0, 0, 0)$
- Si un événement e est local à i , alors $VC_i(e) := \text{Max}(\text{ran}(VC_i)) \oplus 1_i$.
- Si un événement e est l'envoi d'un message m , alors $VC_i(e) := \text{Max}(\text{ran}(VC_i)) \oplus 1_{P(e)}$ et $MC(m) := VC_i(e)$.
- Si un événement e est la réception d'un message m , alors
 - ❶ on met à jour le vecteur local :
 $VC_i(e)(i) := \text{Max}(\text{ran}(VC_i), MC(m)) + 1$
 - ❷ et $\forall j. j \in 1..n \wedge j \neq i \Rightarrow VC_i(e)(j) := \text{Max}(\text{Max}(\text{ran}(VC_i)), MC(m))(j)$.

Illustration 2



Propriétés de la datation vectorielle

Date d'un événement e et sens de $VC_{P(e)}(e)$

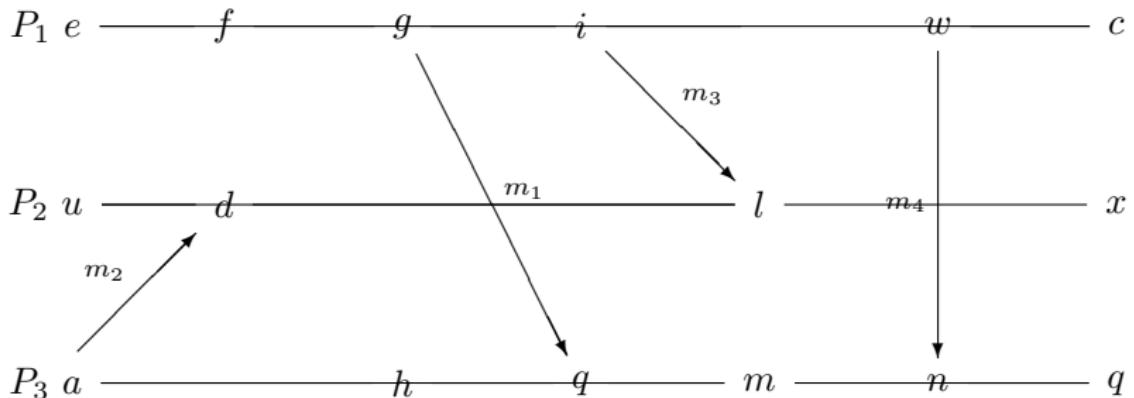
La valeur de la i ème composante de $VC_{P(e)}(e)$ correspond au nombre d'événements dans le passé de e pour le site i ou que e connaît.

Propriétés

Soit un événement $e \in E$ tel que $e \in \text{dom}(VC_{P(e)})$ (signifiant que e a une date ou encore qu'il a eu une occurrence).

- Si $i \neq P(e)$, alors $VC_{P(e)}(e)(i) = \text{Card}(\{e' | e' \in E_i \wedge e' \sim e\})$
- Si $i = P(e)$, alors $VC_{P(e)}(e)(i) = \text{Card}(\{e' | e' \in E_i \wedge e' \sim e\})$

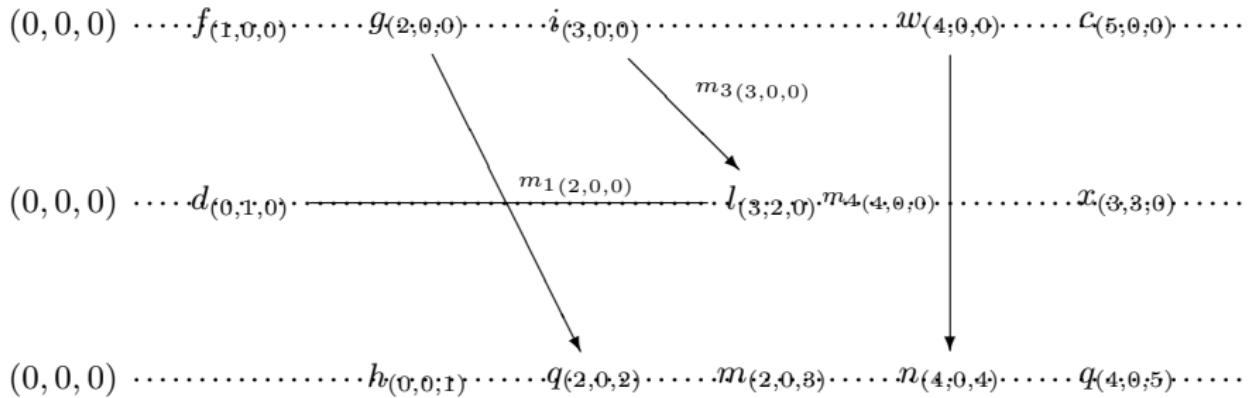
Illustration des vecteurs d'horloge



$(0, 0, 0) \dots f_{(1;0,0)} \dots g_{(2;0,0)} \dots i_{(3;0,0)} \dots \dots \dots w_{(4;0,0)} \dots c_{(5;0,0)} \dots \dots$

$(0, 0, 0) \dots d_{(0;1,0)} \dots \dots \dots m_1(2,0,0) \dots \dots \dots l_{(3;2,0)} \dots m_4(4;0,0) \dots \dots \dots x_{(3;3,0)} \dots \dots$

Illustration des vecteurs d'horloge



Propriétés

I

Soient e_1 et e_2 2 événements se produisant dans le réseau.

Pour tous les événements e et f de E ,

$$e \rightsquigarrow f \text{ si, et seulement si, } VC_{P(e)}(e) \leq_{uple} VC_{P(f)}(f)$$

II

Soient e_1 et e_2 2 événements se produisant dans le réseau.

Pour tous les événements e et f de E ,

$e \# f$ si, et seulement si, $VC_{P(e)}(e)$ et $VC_{P(f)}(f)$ ne sont pas comparables par \leq_{uple} .

Justification (I)

$e \rightsquigarrow f$: $Past(e) \subseteq Past(f)$ et $\forall i. i \in 1..n \Rightarrow VC_{P(e)}(i) \leq VC_{P(f)}(i)$

$\vee C_{P(f)}(f)$:

Justification (II)

$e \# f$

par \leq_{upl} .

Propriété des horloges vectorielles

densité

Soient deux événements e_i de P_i et e_j de P_j .

Si $VC(e_i)(k) < VC(e_j)(k)$, alors il existe un événement e tel que
 $\neg(e \rightarrow e_i)$ et $e \rightarrow e_j$.

Il existe un événement e qui a permis l'incrément de la composante k de l'horloge vectorielle. e n'est pas la cause de e_i .

Section Courante

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

]

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

Problèmes d'exclusion mutuelle

PROBLÈME : un ensemble d'agents communicants souhaitent partager une ressource commune et

- avoir accès au bout d'un temps fini après une requête
- avoir un accès exclusif
- être considéré de manière équitable

Problème de l'Exclusion mutuelle

- Assurer le partage de ressources communes
- Garantir une répartition équitable de ces ressources partagées
- Environnement centralisé solutions logicielles : algorithmes de Dekker, de Dijkstra, de Peterson,
- Environnement centralisé solutions matérielles : sémaphores, test and sets ...

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

Solutions en système centralisé

- Utilisation de verrous : lock, unlock
- Utilisation de sémaphores :
- Variables de priorités Bakery

- Un sémaphore est une structure constituée d'une variable s et d'une file d'attente q et cette structure est gérée par deux opérations :
 - ▶ $P(s)$: demande du sémaphore
 - ▶ $V(s)$: libération du sémaphore
- PROPRIÉTÉ 1 : le nombre de processus distincts utilisant le sémaphore est d'au plus sa valeur initiale.
- PROPRIÉTÉ 2 : tout processus demandant le sémaphore pourra l'obtenir à condition qu'au moins un des processus le possédant le rende.

CONTEXT *sem0*

SETS

PROCESSES

CONSTANTS

smax

AXIOMS

axm1 : PROCESSES $\neq \emptyset$

axm2 : smax $\in \mathbb{N}$

axm3 : smax $\neq 0$

END

MACHINE *sem1*

SEES *sem0*

VARIABLES

s, f, r, get

INVARIANTS

inv1 : s ∈ ℕ

inv2 : r ∈ ℕ

inv3 : f ∈ 1 .. r ↪ PROCESSES

inv4 : get ⊆ PROCESSES

inv5 : s ≤ smax

inv6 : ran(f) ∩ get = ∅

inv7 : dom(f) = 1 .. r

inv8 : finite(get)

inv9 : s + card(get) = smax

inv10 : r ≠ 0 ⇒ s = 0

inv11 : s ≠ 0 ⇒ r = 0

inv12 : s ≠ 0 ⇒ dom(f) = ∅

EVENT INITIALISATION

BEGIN

act1 : s := smax
act2 : r := 0
act3 : get := Ø
act4 : f := Ø

END

EVENT RequestSemFree

ANY

p

WHERE

grd1 : p ∈ PROCESSES
grd2 : p ∉ get
grd3 : s ≠ 0

THEN

act1s := s - 1
act2get := get ∪ {p}

END

EVENT RequestSemWaiting

ANY

p

WHERE

$grd1 : p \in PROCESSES$

$grd2 : s = 0$

$grd3 : p \notin get$

THEN

$act1 : f(r+1) := p$

$act2 : r := r+1$

END

EVENT ReleaseSemFree

ANY

p

WHERE

$grd1 : p \in PROCESSES$

$grd2 : p \in get$

$grd3 : r = 0$

THEN

$act1 : get := get \setminus \{p\}$

$act2 : s := s+1$

END

EVENT ReleaseSemWaiting

ANY

p, q

WHERE

$grd1 : p \in get$

$grd2 : q \in ran(f)$

$grd3 : q = f(1)$

THEN

$act1 : get := (get \setminus \{p\}) \cup \{q\}$

$act2 : r := r - 1$

$act3 : f : |(f' \in 1 .. (r-1) \rightarrow PROCESSES \wedge (\forall i \cdot i \in 1 .. (r-1) \Rightarrow f'(i))$

END

Algorithmes classiques d'exclusion mutuelle

- Garantir l'exclusion mutuelle par des variables de priorités
- Plusieurs solutions existent comme Dekker, Dijkstra, ...
- Algorithme *bakery* de Lamport : rôle des variables y_1 et y_2 .

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

Problèmes posés par la répartition

- Hypothèse 1 : le réseau est supposé complet ou encore que les sites communiquent entre eux via un protocole fiable.
- Hypothèse 2 : chaque site a sa propre horloge.
- Problème : Les sites partagent une ressource commune et la demande de ressource conduit à un service exclusif, effectif et équitable.

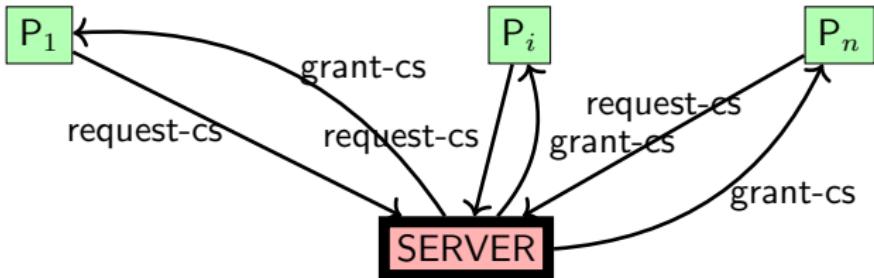
Problèmes posés par la répartition

- Hypothèse 1 : le réseau est supposé complet ou encore que les sites communiquent entre eux via un protocole fiable.
- Hypothèse 2 : chaque site a sa propre horloge.
- Problème : Les sites partagent une ressource commune et la demande de ressource conduit à un service exclusif, effectif et équitable.

Idées de solution

- Assurer l'exclusion mutuelle à l'aide d'une file d'attente qui gère les requêtes.
- Deux solutions pour la file d'attente
 - ▶ Un site joue le rôle de serveur de la file d'attente
 - ▶ La file est implicite au niveau du protocole et est gérée par tous les processus ;

Client Serveur



- SERVER gère une file d'attente et sert les demandes selon cette file d'attente.
- Les communications sont fiables ou pas

Décomposition en phases

- Phase de demande
- Phase d'attente
- Phase d'utilisation
- Phase de remise
- Phase de fin
- Chaque phase est propre à un processus séquentiel
- Chaque phase du processus P est concrente au processus Q où P et Q sont distincts

Questions liées à la répartition

- Un ensemble de processus $Proc$ partagent une ressource commune R
- Tout processus est connecté à tout processus autre du réseau
- La question est de trouver un moyen d'ordonner totalement les requêtes de section critique sont totalement ordonnables.
- Trouver un ordre total : les estampilles de Lamport

Principes des algorithmes d'exclusion mutuelle

Les algorithmes d'exclusion mutuelle fonctionnent sur le modèle suivant :

- Phase de demande
- Phase d'attente
- Phase d'utilisation
- Phase de remise
- Phase de fin

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

Principes de l'algorithme d'exclusion mutuelle

- Phase de requête : p demande la section critique et envoie à tous les autres sites son estampille : $n-1$ messages sont envoyés
- Phase d'attente : p attend de recevoir un message de chaque site lui permettant d'entrer en section critique : $n-1$ messages sont reçus
- Phase de section critique : p utilise la section critique et il la rendra au bout d'un temps fini.
- Phase de relâche : le processus p sort de section critique et renvoie un message à tous les sites : $n-1$ messages sont envoyés
- Total des message : $3 \cdot n - 3$ messages sont nécessaires.

- Problème à résoudre : trouver un mécanisme équitable pour ordonnancer les demandes.
- Solution : mettre en œuvre une file d'attente de manière répartie qui permette de positionner les sites demandeurs les uns par rapport aux autres.
- Mécanisme des estampilles :
 - ▶ chaque site a un numéro propre
 - ▶ chaque site maintient un numéro de demande qui est mis à jour en fonction des demandes
 - ▶ $(p, n) < (q, m)$ si et seulement si $p < q \vee p = q \wedge n < m$

Algorithme de Lamport

- Phase de requête : p demande la section critique et envoie à tous les autres sites son estampille (diffusion aux $n-1$ sites).
- Phase d'attente : p attend de recevoir un message de chaque site lui permettant d'entrer en section critique (attente de $n-1$ réponses de site).
- Phase de section critique.
- Phase de relâche : le processus p sort de section critique et renvoie un message à tous les sites pour préciser qu'il sort et il donne une information sur son estampille aux autres processus. (diffusion aux $n-1$ sites).
- $3 \cdot (n-1)$ messages sont nécessaires

Algorithme de Ricart et Agrawala

- Phase de requête : p demande la section critique et envoie à tous les autres sites son estampille, .
- Phase d'attente : p attend de recevoir un message de chaque site lui permettant d'entrer en section critique.
- Phase de section critique.
- Phase de relâche : le processus p sort de section critique et renvoie un message à tous les sites qui sont en attente de son accord ; cela signifie que l'autorisation du processus p est attendue par certains sites.
qui ont été différenciés pour préciser qu'il sort et il donne une information sur son estampille aux autres processus.
- $2 \cdot n - 2$ messages sont nécessaires.

Algorithme de Carvalho et Roucairol

- Même idée que Ricart et Agrawala mais avec une amélioration : un site ne demande pas aux sites qui ne lui ont pas demandé l'autorisation, sauf la première fois.
- Phase de requête : p demande la section critique et envoie à tous les autres sites son estampille mais la seconde fois n'envoie pas aux sites qui ne lui ont pas demandé.
- Phase d'attente : p attend de recevoir un message de chaque site lui permettant d'entrer en section critique.
- Phase de section critique.
- Phase de relâche : le processus p sort de section critique et renvoie un message à tous les sites qui sont en attente de son accord ; cela signifie que l'autorisation du processus p est attendue par certains sites.
qui ont été différés pour préciser qu'il sort et il donne une information sur son estampille aux autres processus.
- $2 \cdot n - 2$ messages sont nécessaires mais au plus.

- A \sqrt{N} Algorithm for Mutual Exclusion in Decentralized Systems
MAMORU MAEKAWA University of Tokyo

- A \sqrt{N} Algorithm for Mutual Exclusion in Decentralized Systems
MAMORU MAEKAWA University of Tokyo
- Partition de l'espace des sites
- Chaque élément de la partition gère les sites de sa classe
- Demande aux représentants de classe

Conclusion et Questions

- Mécanisme de priorité
- Gestion d'une file d'attente répartie
- Mécanisme d'estampillage
- Hypothèses fortes :
 - ▶ graphe complet
 - ▶ communications fiables

Section Courante

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion
- ⑥ Conclusion

]

Une diffusion est fiable, si

- elle est valide : quand un processus diffuse, tous les processus membres du groupe de diffusion reçoivent.
- elle satisfait la propriété d'accord : si un processus reçoit, alors tous les autres membres du groupe reçoivent.
- elle est intégrée : chaque message n'arrive qu'une et une seule fois.

Les mécanismes de diffusion fiable sont de type

- **FIFO** : les messages sont délivrés selon l'ordre d'envoi (FBCAST)
- **causalité** : les messages sont délivrés selon un ordre respectant la causalité (CBCAST)
- **Atomique** : les messages sont tous délivrés dans le même ordre (ABCAST)

Conventions et notations

- $\text{receive}_P(m)$: événement de réception d'un message m par le processus P.
- $\text{delivery}_P(m)$: événement de délivrance du message m au processus P.

Conventions et notations

- $\text{receive}_P(m)$: événement de réception d'un message m par le processus P.
- $\text{delivery}_P(m)$: événement de délivrance du message m au processus P.
- Observation : $\text{receive}_P(m)$ précède $\text{delivery}_P(m)$
- Idée : différer la délivrance d'un message quand il est reçu.

Principe

Si un processus diffuse un message m_1 puis un message m_2 , alors aucun processus du groupe ne livre le message m_2 à moins que m_1 ait été livré.

- Si $\text{send}_P(m_1) \rightsquigarrow \text{send}_P(m_2)$, alors pour tout processus Q du groupe de diffusion D, $\text{delivery}_Q(m_1) \rightsquigarrow \text{cdelivery}_Q(m_2)$.
- Idée de l'algorithme : à la réception des messages, on les stocke et on compare les estampilles des messages pour la composante d'envoi P.

Principe

Si

- un processus envoie un message m1
- la délivrance de m1 est suivi causalement de l'envoi de m2

alors tous les processus délivrent le message m2 après le message m1.

- Si $\text{delivery}_Q(m1) \rightsquigarrow \text{send}_P(m2)$, alors pour tout processus Q du groupe de diffusion D, $\text{delivery}_Q(m1) \rightsquigarrow \text{cdelivery}_Q(m2)$.
- Idée de l'algorithme : à la réception des messages, on les stocke et on compare les estampilles des messages pour la composante d'envoi P.

Principe

Les processus d'un groupe livre les messages dans le même ordre.

- Si $\text{delivery}_P(m1) \sim \text{send}_P(m2)$, alors pour tout processus Q du groupe de diffusion D, $\text{delivery}_Q(m1) \sim \text{cdelivery}_Q(m2)$.
- Idée de l'algorithme : à la réception des messages, on les stocke et on compare les estampilles des messages pour la composante d'envoi P.

Protocole de diffusion CBCAST

Initialisation

Pour chaque site $i \in 1..n$, positionner les valeurs des vecteurs VC_i à 0.

Diffusion de m sur le site i

$$\left\{ \begin{array}{l} VC_i(i) := VC_i(i) + 1 \\ \textbf{Pour tout site j de } 1..n : Send_i(m, VC_i(i), j) \end{array} \right.$$

Réception

$$\left\{ \begin{array}{l} Receive_i(m, VC_m, j) \\ Wait(VC_m = VC_i(j) + 1) \\ Wait(\forall j. j \in 1..n \wedge j \neq VC_m \leq VC_i(j)) \\ Deliver_i(m) \\ VC_i(j) = VC_i(j) + 1 \end{array} \right.$$

Conclusion

- Rôle des estampilles pour les algorithmes d'exclusion mutuelle
- Rôle de horloges vectorielles dans la diffusion des messages et la propriété de causalité

- ① Causalité et datation des événements
- ② Estampillage en action
- ③ Vecteurs d'horloge ou horloges vectorielles
- ④ Application 1 : protocoles d'exclusion mutuelle
 - Problème de l'exclusion mutuelle
 - Cas d'un système centralisé
 - Protocoles d'exclusion mutuelle
 - Algorithmes
- ⑤ Application 2 : protocoles de diffusion

⑥ Conclusion

]

- Mécanisme simple et correct mais incomplet pour ordonner les différents processus répartis avec les estampilles.
- Complétude des horloges vectorielles pour exprimer la causalité entre les événements.
- Algorithmes de diffusion
- Algorithmes d'exclusion mutuelle.