Synchronisation Distribuée
Temps et horloges distribués

Laurent PHILIPPE

Master 2 Informatique
Ingénierie des Systèmes et Logiciels

2021/2022

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

femto-st SCIENCES & TECHNOLOGIES

Sommaire

Synchronisation d'horloges

Systèmes Centralisés

- Accès à la date courante par un appel système
- Une seule horloge
- Pas ambiguïté pour dater des objets ou des évènements

Système Distribué

- Chaque machine dispose d'une horloge indépendante
- Horloge à quartz peut dériver de plusieurs secondes par jour de manière aléatoire (fréquence, alimentation)
- Réglage initial différent

$\Rightarrow$ **Risque d'ambiguïté**

Problème en cas d'absence d'horloge globale : exemple

Programme `make` :

- code source des applications découpé en plusieurs fichiers sources
- une modification d'un fichiers nécessite uniquement la compilation de celui-ci, pas celle des autres
- `make` ne compile que les fichiers sources modifiés depuis la dernière compilation
- compare les dates de modification des fichiers sources et objets correspondants

Compilation de logiciels composés de nombreux fichiers peut-être effectuée en parallèle

Exemple `make`

Centralisé

- Fonctionnement de `make`
- Éditeur de programme fixe la date du fichier source
- Compilateur fixe la date du fichier objet
- Date fixée par la même horloge

Distribué

- Éditeur et compilateur peuvent s'exécuter sur des processus différents
  - `fichierA.o` généré sur le processus A à la date 110
  - `fichierA.c` puis modifié sur le processus B à la date 108

Synchronisation d'horloge

Question

Peut-on synchroniser toutes les horloges d'un système distribué pour obtenir une horloge non ambiguë distribuée en tout instant ?

Réponse

Non, ... à moins de connaître exactement le temps mis pour envoyer, transmettre et recevoir un message, ce qui est irréaliste.

Solutions

- Ne pas utiliser d'horloge ☺
- Synchroniser les horloges physiques
- Trouver une autre manière de dater les évènements

Synchronisation d'horloge

Question

Peut-on synchroniser toutes les horloges d'un système distribué pour obtenir une horloge non ambiguë distribuée en tout instant ?

Réponse

Non, ... à moins de connaître exactement le temps mis pour envoyer, transmettre et recevoir un message, ce qui est irréaliste.

Solutions

- Ne pas utiliser d'horloge ☺
- Synchroniser les horloges physiques
- Trouver une autre manière de dater les évènements

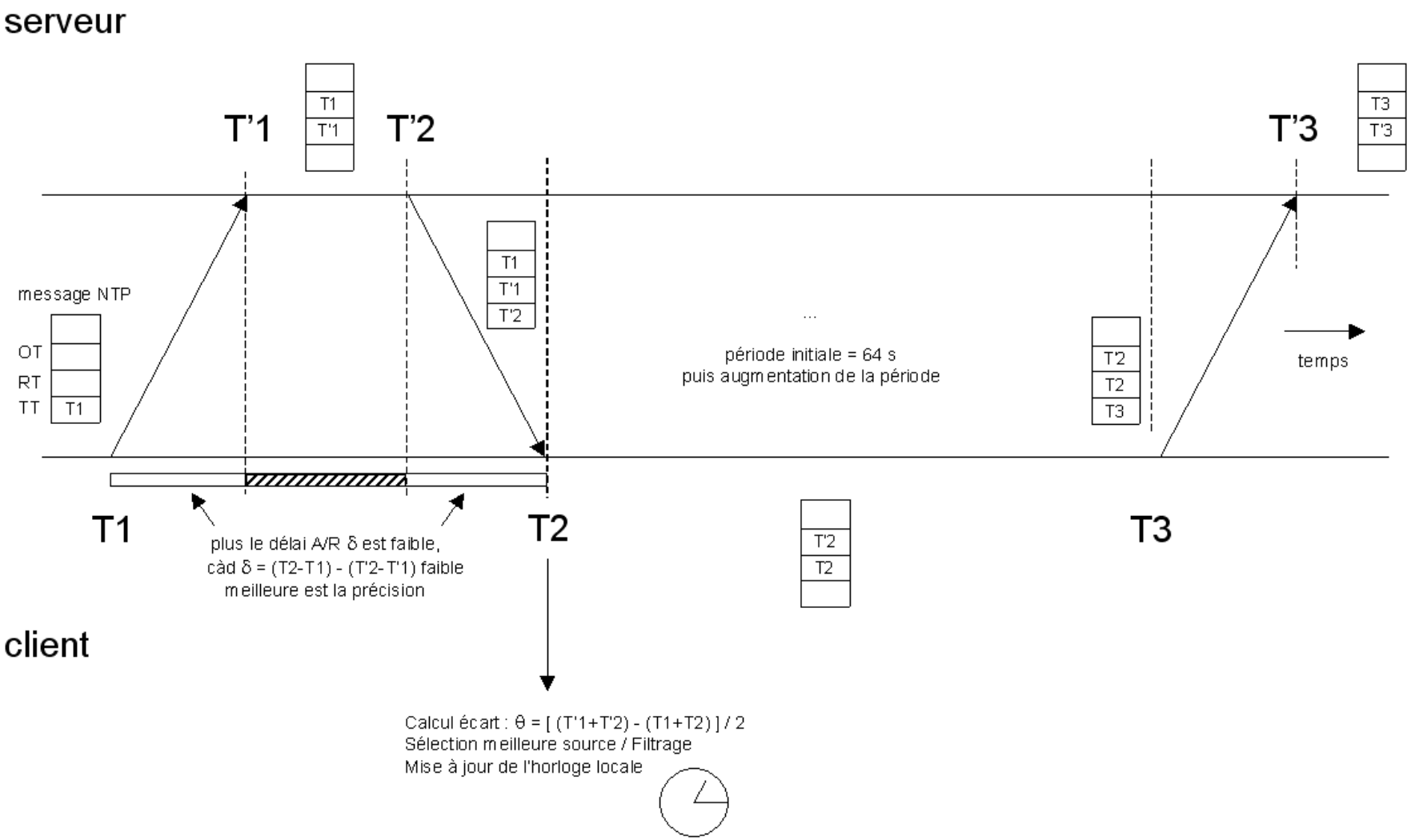
Sommaire

Horloges physiques

Synchronisation

- Synchroniser les horloges physiques sur une horloge fixe, UCT (Universal Coordinated Time)
- Les horloges peuvent avoir des fréquences différentes
- Protocole de gestion du temps : Network Time Protocole (NTP)
- Repose sur une hiérarchie :
  - Serveurs racines (primaires) qui se synchronisent sur UCT
  - Serveurs intermédiaires et sauvegarde des serveurs primaires
  - Sous-réseaux de clients

NTP



©wikipedia.org

Synchronisation physique

Limites

- Donne des horloges proches mais pas de garantie sur l'ordre des évènements, cas de retour arrière.
- Dérive due aux couches, plus la distance dans l'arbre est grande plus la dérive peut-être importante
- Nécessité d'être connecté à un serveur NTP

Sommaire

Horloges distribuées

Problématique

- Ne pas reposer sur l'horloge physique
- Solution alternative :
  - Quel sens a une date en distribué ?
  - La notion de date n'est-elle pas intrinsèquement centralisée ?
  - De quoi a-t-on besoin ?

Horloges distribuées

Référence

Lamport [a] montre que la synchronisation distribuée est possible et propose un algorithme qui permet de la réaliser

a. Lamport, L. (1978). "Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system". Communications of the ACM 21 (7) : pp 558-565

Proposition

La synchronisation ne doit pas forcément être ***absolue***

- Dans le cas où les processus n'ont aucune interaction, il n'est pas nécessaire que leurs horloges soient synchrones
- Le problème n'est pas que tous les processus aient la même date mais qu'ils soient d'accord sur l'ordre dans lequel les évènements se produisent : ***horloges logiques***

Horloges distribuées

Problématique

- Ordonner les évènements pour qu'à chaque évènement E soit associé une horloge H(E) sur laquelle tous les processus soient d'accord ?
- Cette horloge doit vérifier la propriété suivante :
  $$si\ E_1\ a\ lieu\ avant\ E_2\ alors\ H(E_1) < H(E_2)$$
- Relation de précédence

Sommaire

Relation de précédence

Définition

- Introduite par Lamport : "happens-before"
- Définie par les cas suivants où E_1 précède E_2 :
  - deux évènements E_1 et E_2 qui se suivent dans un même processus
  - émission d'un message E_1 par un processus et sa réception E_2 par un autre processus
- L'événement E_2 a potentiellement accès à toutes les informations de l'événement E_1

Notation

- La relation de précédence est notée : $\rightarrow$
- L'expression $E_1 \rightarrow E_2$, se lit l'événement E_1 précède l'événement E_2

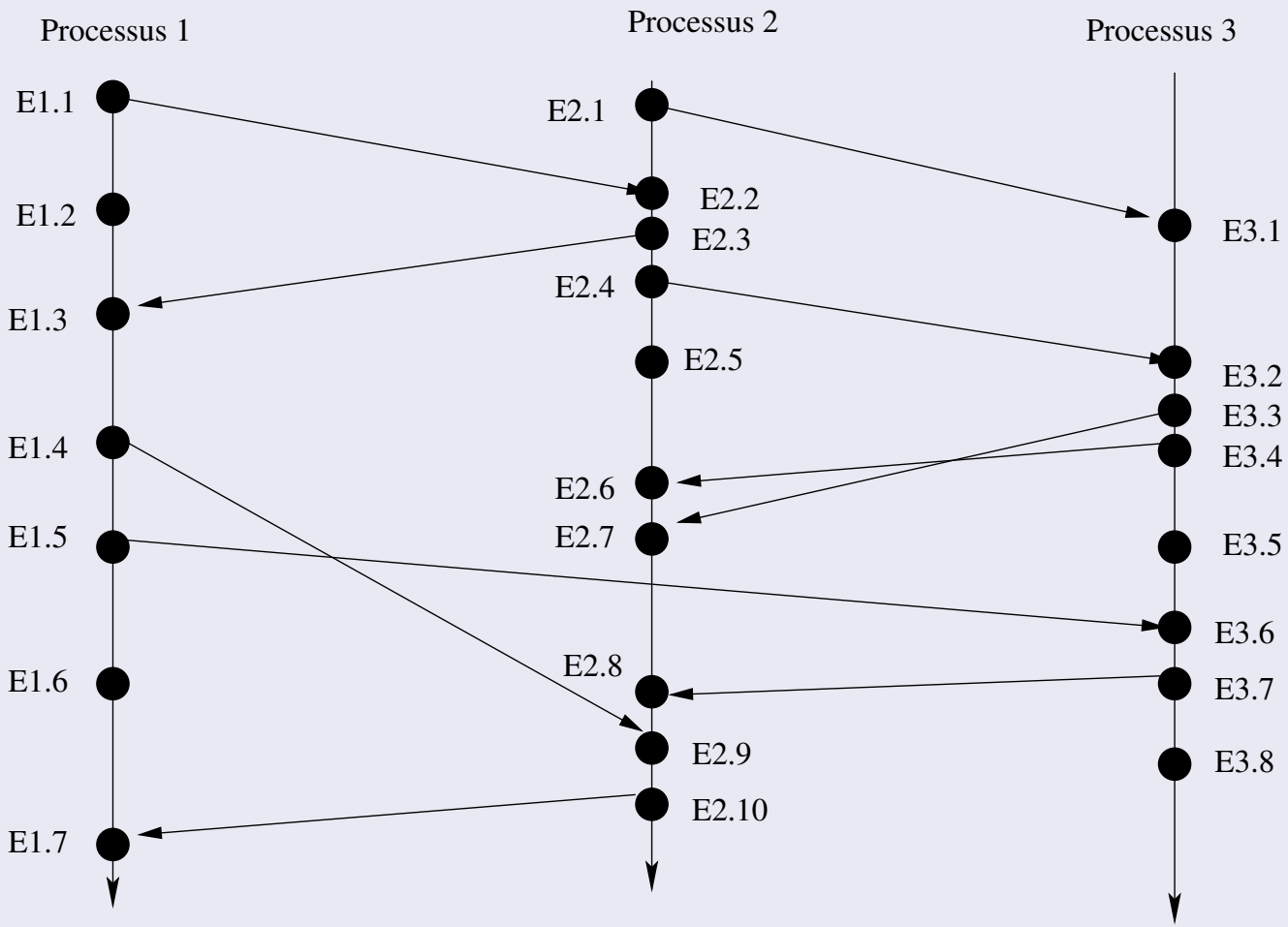
Propriétés de la relation de précédence

Relation d'ordre strict

La précédence définit une relation d'ordre strict car elle satisfait les propriétés suivantes :

- Transitivité :
  Si $E_1 \rightarrow E_2$ et $E_2 \rightarrow E_3$ alors $E_1 \rightarrow E_3$
- Irréflexibilité :
  on n'a pas $E_1 \rightarrow E_1$
- Antisymétrie :
  si $(E_1 \rightarrow E_2)$ alors $\neg(E_2 \rightarrow E_1)$

Exemple de relation de précédence



Exemple de relation de précédence

Précédence entre les événements

- Au sein de P_1, on a : $E_{1.1} \rightarrow E_{1.2} \rightarrow E_{1.3}$
- Au sein de P_2, on a : $E_{2.1} \rightarrow E_{2.2}$
- De manière transitive on a, au sein du processus P_3 : $E_{3.2} \rightarrow E_{3.4}$ et $E_{3.2} \rightarrow E_{3.5}$, ...
- Et de manière distribuée :
  - Entre deux processus P_1 et P_2 : $E_{1.1} \rightarrow E_{2.2}$ mais aussi, par transitivité $E_{1.1} \rightarrow E_{2.3}$
  - Et par rebond de transitivité entre P_1, P_2 et P_3 : $E_{1.1} \rightarrow E_{3.2}$, $E_{1.5} \rightarrow E_{3.8}$, $E_{3.3} \rightarrow E_{2.7}$
  - Retour en local : $E_{1.5} \rightarrow E_{3.6}$,$E_{3.6} \rightarrow E_{3.7}$, $E_{3.7} \rightarrow E_{2.6}$, $E_{2.6} \rightarrow E_{2.8}$, $E_{2.8} \rightarrow E_{1.7}$

Propriétés de la relation de précédence

Remarques

- La relation de précédence détermine un ordre partiel entre les évènements : il n'est pas toujours possible de mettre en relation de précédence deux évènements. Par exemple $\neg(E_{1.1} \rightarrow E_{2.1})$ et $\neg(E_{2.1} \rightarrow E_{1.1})$
- $E_1 \nrightarrow E_2$ signifie que les événements E_1 et E_2 de dépendent ni directement ni transitivement l'un de l'autre.
- Dans ce cas E_2 n'est pas affecté par E_1 ni aucun autre événement qui a lieu après E_1 dans le même processus
- Sur la figure : $E_{1.4} \nrightarrow E_{2.5}$
- On peut noter :
  - $\forall E_1, E_2 : E_1 \nrightarrow E_2 \nRightarrow E_2 \nrightarrow E_1$
  - $\forall E_1, E_2 : E_1 \rightarrow E_2 \Rightarrow E_2 \nrightarrow E_1$

Relation de concurrence

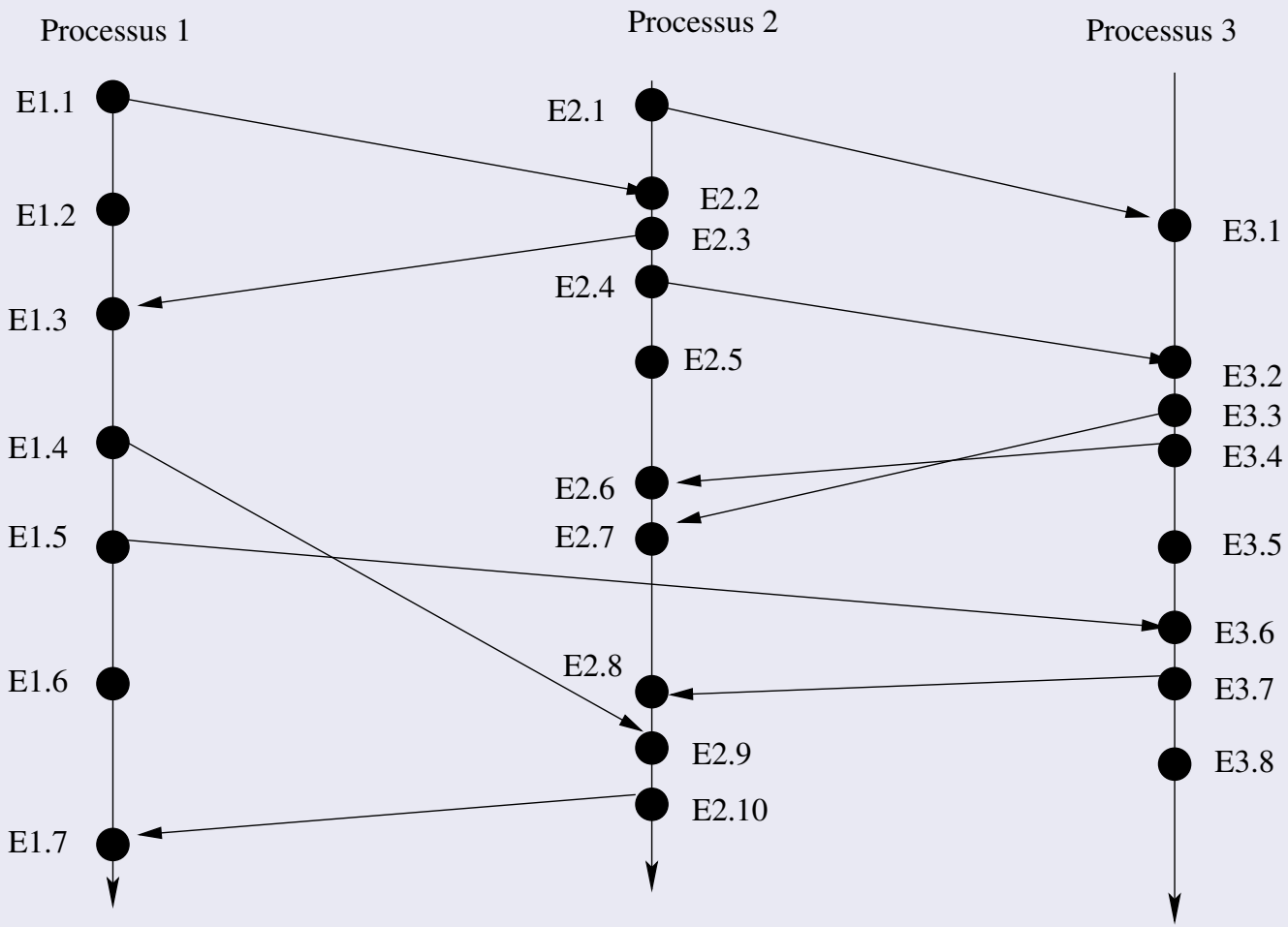
Définition

Deux évènements E_1 et E_2 sont concurrents si et seulement si, ils n'ont pas de relation de précédence : $\neg(E_1 \rightarrow E_2) \bigwedge \neg(E_2 \rightarrow E_1)$, ce qui est noté $E_1 \parallel E_2$

Remarques

- La relation n'est pas transitive $E_1 \parallel E_2$ et $E_2 \parallel E_3 \nRightarrow E_1 \parallel E_3$
- $\forall E_1, E_2$ nous avons $E_1 \rightarrow E_2$ ou $E_2 \rightarrow E_1$ ou $E_1 \parallel E_2$
- Des suites d'évènements avec précédence peuvent être concurrentes : $E_{13} \rightarrow E_{14} \rightarrow E_{15} \parallel E_{33} \rightarrow E_{34}$
- La concurrence "logique" ne signifie pas que les événements sont exécutés en même temps contrairement à la concurrence "physique"

Exemple de relation de concurrence



Exemple de relation de concurrence

Sur la figure

- Évènements concurrents : $E_{1.2} \parallel E_{2.3}$ et $E_{2.5} \parallel E_{3.2}$
- Suite d'exécutions concurrente :
  $E_{13} \rightarrow E_{14} \rightarrow E_{15} \parallel E_{33} \rightarrow E_{34}$

Sommaire

Sommaire

Proposition de Lamport

Proposition

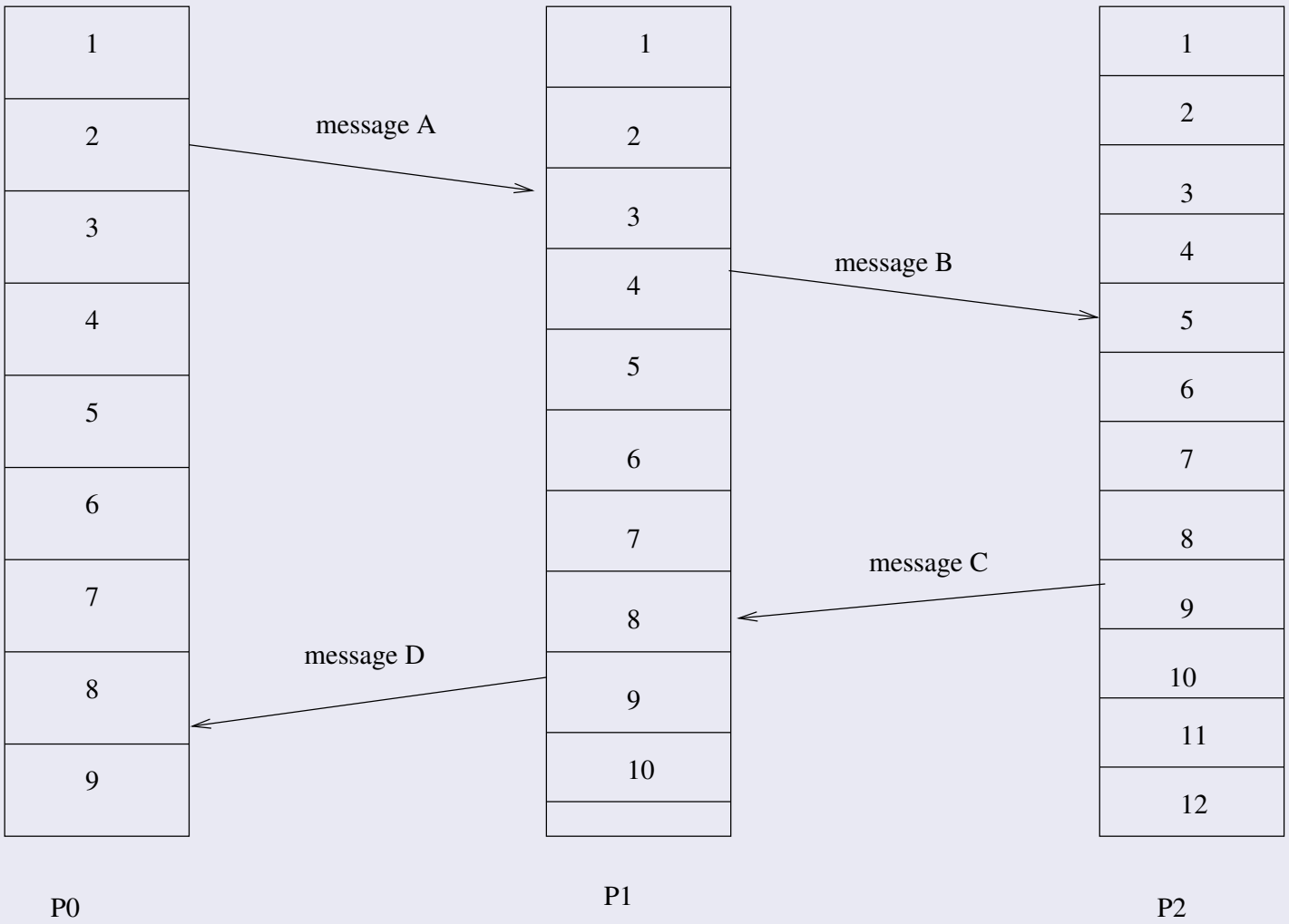
- Chaque processus gère une `horloge logique` ou `estampille` : valeur entière
- Suite à un évènement local, l'`estampille` est incrémentée de 1
- Suite à un envoi, l'`estampille` est incrémentée de 1
- Suite à une réception, l'`estampille` est fixée à : $Max(H_{locale}, H_{recue}) + 1$, ce qui permet de "synchroniser" les horloges

Comportement sans l'algorithme de Lamport

Exemple

- Processus s'exécutent sur des machines différentes
- Chaque machine `i` a :
  - sa propre horloge H_i
  - sa propre fréquence d'horloge
- La fréquence d'horloge de P_0 plus basse que celle de P_1, elle même plus basse que celle de P_2.

Comportement sans l'algorithme de Lamport

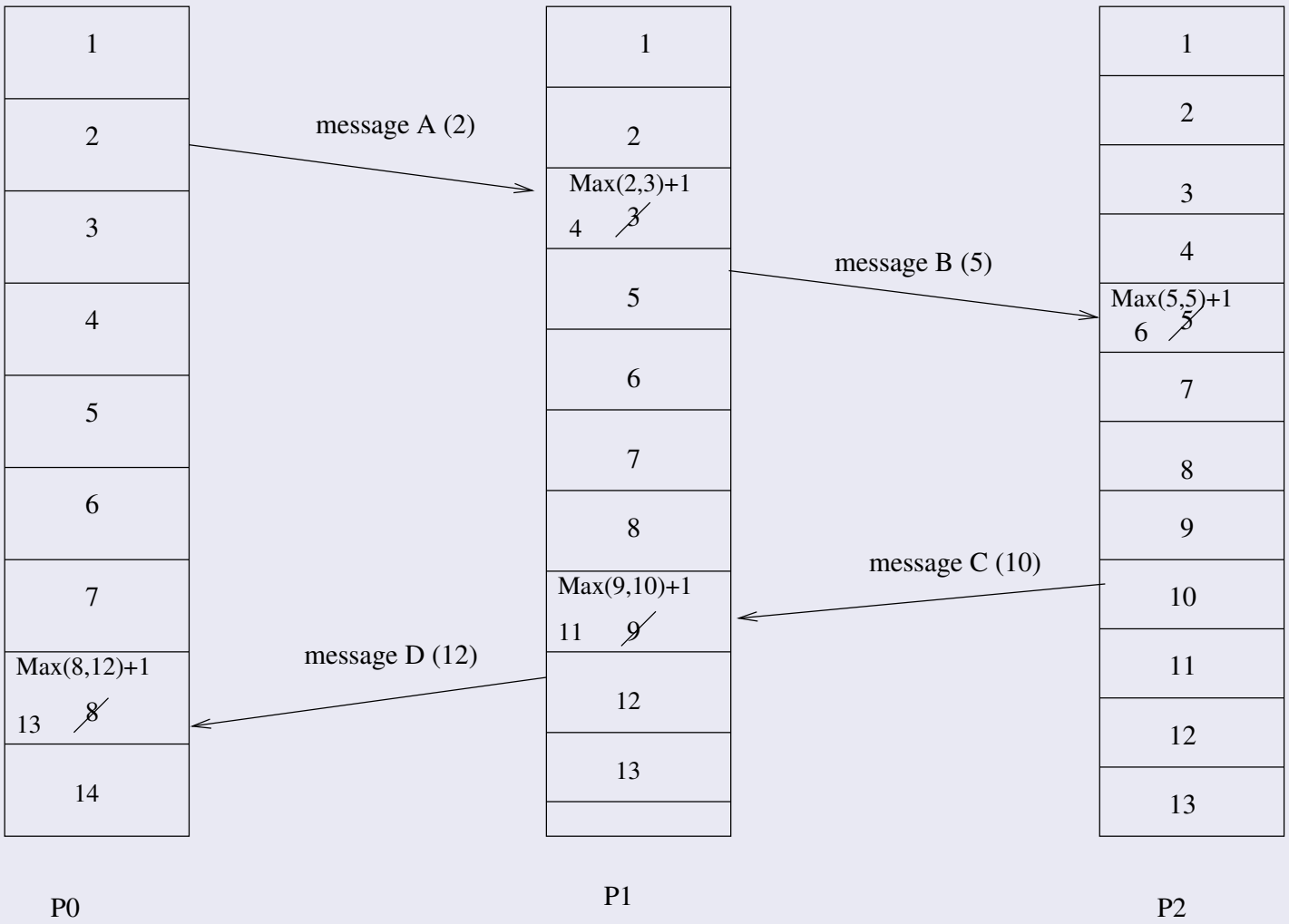


Proposition de Lamport

Exemple

- Comportement avec l'algorithme de Lamport
  - chaque message transporte l'estampille d'émission du point de vue de l'émetteur
  - à la réception d'un message, le récepteur synchronise son horloge (au moins horloge reçue + 1)

Exemple d'estampille de Lamport



Estampilles et ordre total

Rappel : ordre total

- Tous les événements peuvent être comparés deux à deux par la relation d'ordre R
- $\forall E_1, E_2 : E_1 R E_2 \vee E_2 R E_1$

Horloges à estampilles

- La comparaison entre horloge est possible s'il y a a une relation de précédence : $E_1 \rightarrow E_2$ alors $H(E_1) < H(E_2)$
- Deux, ou plus, événements concurrents peuvent avoir la même valeur d'horloge
- Ne peut servir de support à un problème de décision

Estampilles et ordre total

Ordre total pour horloges à estampilles

- Il est nécessaire d'avoir un mécanisme supplémentaire pour mettre en place un ordre total
- Chaque processus dispose d'un identificateur unique
- Les identificateurs de processus sont associés aux estampilles qui deviennent des couples : (H, P_i), H est l'horloge locale, P_i l'identificateur du processus
- En cas d'égalité d'estampille, l'horloge la plus petite est celle du processus ayant le plus petit identificateur.
- Pour deux événements E_1 et E_2, d'estampille H_1 et H_2 ayant lieu sur les processus P_i et P_j on a :
  $H(E_1) < H(E_2) \Leftrightarrow H_1 < H_2 \vee (H_1 = H_2 \wedge i < j)$

Proposition de Lamport

Conclusion

L'ordonnancement proposé par Lamport permet d'attribuer une ***horloge logique*** ou ***estampille*** à tous les évènements d'un système distribué.
Cette horloge logique est conforme aux conditions suivantes :

- Si un événement E_1 précède un événement E_2 dans le même processus, alors $H(E_1) < H(E_2)$.
- Si E_1 et E_2 représentent respectivement l'envoi et la réception d'un message, alors $H(E_1) < H(E_2)$.
- pour tous évènements, E_1 et E_2, $H(E_1)$ est différente de $H(E_2)$

Les horloges de Lamport permettent d'ordonner les événements d'un système distribué

Utilisation des estampilles

En algorithmique distribuée

- Algorithmes de mise en œuvre de files d'attente virtuelles réparties :
  - exclusion mutuelle répartie
  - mise à jour de copies cohérentes
  - diffusion cohérente
- Détermination de l'événement le plus récent dans un ensemble d'événements :
  - gestion de la cohérence de caches
  - mise en œuvre de la mémoire virtuelle partagée
  - datation des transactions réparties
- Génération de noms uniques
- Synchronisation d'horloges physiques

Points positifs des estampilles

Trois principaux points positifs :

- Première datation répartie introduite
- Économiques : la datation est réalisée par un seul nombre et non par un vecteur
- Précédence des messages est respectée par remise à l'heure du récepteur

Limitation de la datation par estampille

- $E_1 -> E_2$ implique $H(E_1) < H(E_2)$ est une condition faible car on ne peut rien affirmer si $H(E_1) < H(E_2)$
  - soit les évènements E_1 et E_2 sont concurrents
  - soit les évènements E_1 et E_2 sont ordonnés
- Quand deux évènements sont concurrents, on ne peut rien conclure quant à leurs horloges logiques respectives
- Seule certitude :
  Si $H(E_1) = H(E_2)$ Alors E_1 et E_2 sont concurrents.
- Les horloges logiques ne sont pas denses :
  soient E_1 et E_2 tels que $H(E_1) < H(E_2)$, on ne peut pas savoir s'il existe E_3 tel que $E_1 -> E_3$ et/ou $E_3 -> E_2$

Sommaire

Horloges vectorielles

Propriété de consistance

- Les estampilles ne conservent pas la trace des chemins de précédence
- Non denses = ne gardent pas trace de tous les évènements
- Nécessité de conserver l'état de chaque estampille pour déterminer localement la précédence entre deux événements
- Vecteur d'horloges

A voir plus tard

Sommaire

Horloges matricielles

Snapshot

- Les horloges vectorielles ne permettent que de valider les dépendances entre événements.
- L'ordre de réception des messages peut avoir une incidence sur de déroulement de l'algorithme du processus P_i
- Mémorisation dans une matrice :
  - Ligne (i, i) : état du processus i, c_p^i
  - Ligne (i, j) : nombre de messages échangés entre P_i et P_j

Horloges logiques vs. horloges physiques

Remarques

- Algorithme de Lamport propose une solution pour ordonner les évènements de façon non ambiguë
- Mais horloges logiques associées aux évènements ne correspondent pas forcément à la date réelle à laquelle ils se produisent
- Dans certains systèmes (trafic aérien, commerce, log, transactions) , le temps réel est important : un certain nombre d'algorithmes permettant de gérer ce problème existent (problématique non abordée dans ce cours)

Horloges logiques

Exercice

Utiliser les horloges logiques pour gérer l'accès au parking