Chapitre 2

Le temps logique dans les systèmes répartis

Chap 2 Le temps logique dans les systèmes répartis

- Déterminer l'ordre des événements :

  « Est-ce qu'un message m_1 en provenance du site 1 a été envoyé avant ou après l'envoi d'un message m_2 en provenance du site 2 ? »

- Exemple du « make » distribué sous Unix [Tanenbaum]

- Concepts d'ordre et de délivrance causale [Rifflet]

- Horloges et estampilles : [Lamport]
  - scalaires
  - vectorielles
  - matricielles

1. Ordre causal

- 1.1. Relation de précédence directe

Un événement e *précède directement* un événement e' :

$e \rightarrow e'$, si l'une des deux conditions suivantes est vraie :

1. les événements e et e' ont lieu dans le même processus, et e se produit exactement avant e' sur ce processus.

2. l'événement e correspond à l'envoi d'un message par un processus, et l'événement e' correspond à la réception du même message par un autre processus.

1.1. Ordre causal

- 1.2. Relation de précédence causale

  – Elle est définie comme la fermeture réflexive et transitive de la relation de précédence directe

  – Un événement e précède causalement un événement e' : $e \xrightarrow{\bullet} e'$, si et seulement si :

  1. ou bien e = e' (réflexivité)
  2. ou bien $\exists$ $e_1, e_2, \ldots, e_m$ tels que $e_1 = e$ et $e_m = e'$ et $\forall i, e_i \xrightarrow{\bullet} e_{i+1}$ (transitivité)

  • La relation de précédence causale définit un *ordre partiel* des événements.

1.2. Relation de précédence causale

- Si deux événements x et y se produisent dans des processus différents, il se peut qu'aucune des deux relations x $\xrightarrow{\bullet}$ y et x $\xrightarrow{\bullet}$ y ne soit vraie.

- De tels événements x et y non comparables par la relation de précédence causale, sont dits *concurrents* : on note x||y

- A un événement e on peut associer trois ensembles d'événements :

  - Passé(e) : ensemble des événements antérieurs à e dans l'ordre causal (e appartient à cet ensemble),

  - Futur(e) : ensemble des événements postérieurs à e dans l'ordre causal (e appartient à cet ensemble),

  - Concurrent(e) : ensemble des événements concurrents avec e dans l'ordre causal.

- Exemple : Cf. feuille d'exercices

2. Délivrance causale

- La délivrance d'un message m, notée del(m), est l'opération consistant à le rendre accessible aux applications utilisatrices

- La délivrance d'un message reçu pourra être retardée lors de sa réception pour garantir un ordre de délivrance souhaité

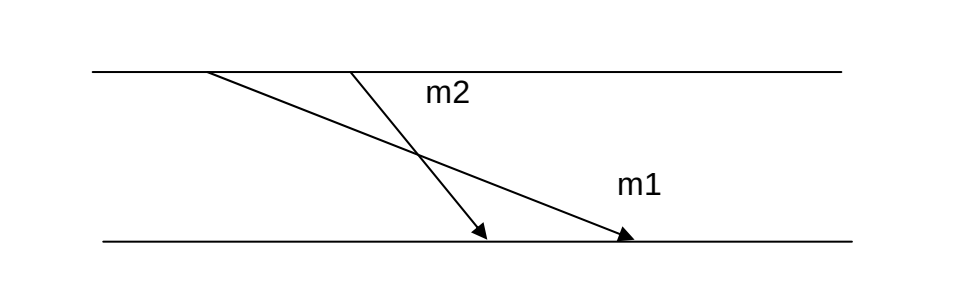
1. Ordre de délivrance FIFO

Si deux messages sont envoyés successivement depuis un même site S_i vers un même destinataire Sj, le premier sera délivré sur le site Sj avant le second, i. e :

$snd_i(m_1,j) \xrightarrow{\bullet} snd_i(m_2,j) \Rightarrow del_j(m_1) \xrightarrow{\bullet} del_j(m_2)$

2. Délivrance causale

Exemple : dans la figure suivante l'ordre FIFO n'est pas garanti



$\Rightarrow$ Pour respecter l'ordre FIFO la délivrance de m_2 doit être retardée jusqu'à ce que le message m_1 arrive et soit délivré

$\Rightarrow$ La couche de communication dispose d'un tampon ordonné permettant de mettre les messages en attente

2. Délivrance causale

2. Ordre de délivrance causale

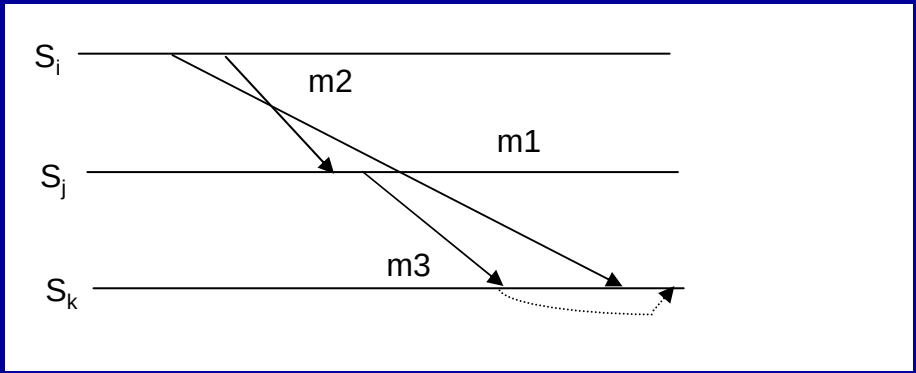
- Cette propriété étend l'ordre de délivrance FIFO à des communications à destination d'un même site en provenance de plusieurs autres.

- Si l'envoi d'un message m_1 par le site S_i à destination du site S_k précède causalement l'envoi du message m_2 par le site S_j à destination du site S_k, alors le message m_1 sera délivré avant le message m2 sur le site S_k :

$$snd_i(m_1,k) \dashrightarrow snd_j(m_2,k) \Rightarrow del_k(m_1) \dashrightarrow del_k(m_2)$$

2. Ordre de délivrance causale

Exemple : la figure suivante illustre un cas où la propriété de délivrance causale est violée si les messages sont délivrés dans l'ordre où ils sont reçus :



⇒ Pour respecter l'ordre de délivrance causale, la délivrance de m_3 doit être retardée jusqu'à l'arrivée et la délivrance du message m_1

3. Horloges et estampilles scalaires

- Les processus qui interagissent doivent se mettre d'accord sur l'ordre dans lequel les événements se produisent

3.1. Définition et principe des estampilles scalaires

- Si les sites datent les événements au moyen d'horloges HL_i (HL_i est l'horloge du site i) et si les horloges sont utilisées pour dater les événements (HL_e est la date de l'événement e), les horloges doivent pouvoir être comparées (ordre noté $\subseteq$) de telle manière que si :

$$e \xrightarrow{\bullet} e' \Rightarrow HL_e \subseteq HL_{e'}$$

3.1. Définition et principe des estampilles scalaires

- Principe :
  - Chaque site gère un compteur dont la valeur est un entier.
  - Sur chaque site ce compteur est initialisé à 0 au lancement du système.
  - La valeur de l'horloge logique d'un site est incrémentée chaque fois qu'un événement local s'y produit. Un tel événement est :
    - ⇒ soit une opération purement locale,
    - ⇒ soit l'envoi d'un message.

      Dans ce cas la valeur courante (après incrémentation) de l'horloge de l'émetteur est embarquée avec le message (« piggybacking ») et sert à l'estampiller.

3.1. Définition et principe des estampilles scalaires

- La réception d'un message permet de synchroniser l'horloge du récepteur avec celle de l'émetteur du message (qui est transportée par le message).

- Le principe consiste à attribuer à l'horloge du récepteur une valeur supérieure à la fois à la valeur courante de l'horloge du site et à celle de l'estampille du message reçu.

- Algorithme de Lamport :

  $\Rightarrow$ si un événement local se produit sur le site i, HL_i est incrémentée : HL_i ++

  $\Rightarrow$ si un événement correspondant à l'envoi d'un message se produit sur le site i, HL_i est incrémentée, et le message m est envoyé avec la nouvelle valeur de HL_i comme estampille : $EL_m = HL_i$

  $\Rightarrow$ si un événement correspondant à la réception d'un message m d'estampille EL_m se produit sur le site i : $HL_i = \max (HL_i , EL_m) + 1$

3.1. Définition et principe des estampilles scalaires

- Exemple [Tanenbaum] :

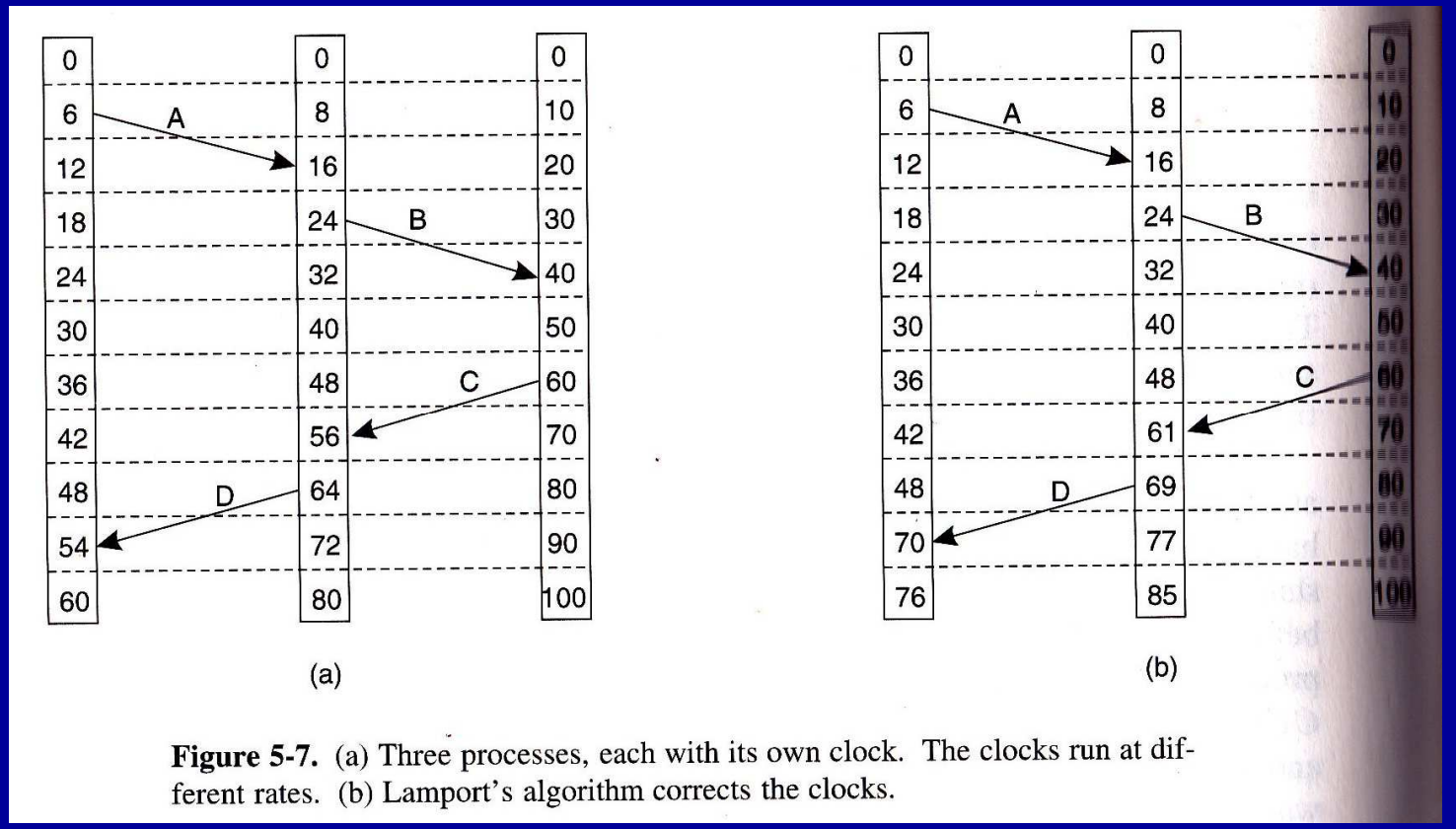


Figure 5-7. (a) Three processes, each with its own clock. The clocks run at different rates. (b) Lamport's algorithm corrects the clocks.

- Application : Cf. feuille d'exercices

3.2. Propriétés des estampilles scalaires

1. *l'ordre des événements n'est pas un ordre strict* : plusieurs événements peuvent porter la même valeur.

- Pour rendre cet ordre strict on adjoint à la valeur de l'horloge logique d'un site l'identification du site

- L'estampille logique d'un événement HL(e) d'un événement e du site i est un couple (HL_i , i).

- On a (HL_i , i) $\subset$ (HL_j , j) si et seulement si :
  - ou bien $HL_i < HL_j$
  - ou bien $HL_i = HL_j$ et $i < j$

- Exemple : dans l'exercice précédent, si on ordonne les sites par ordre alphabétique P, Q, R : alors e précède o qui précède x.

2. L'ordre ainsi défini est total : il induit une chaîne de tous les événements.

- Exercice : *d*onner la chaîne induite dans l'exercice précédent .

4. Horloges et estampilles vectorielles

4.1. Définition et principe des estampilles vectorielles

- Inconvénients des estampilles scalaires :
  - Ordonnent artificiellement les événements concurrents
  - Ne permettent pas de corriger la défaillance vis-à-vis de l'ordre FIFO
- Principe des estampilles vectorielles :
  - Chaque site gère une horloge vectorielle constituée de n entiers (le système comporte n sites).
  - L' horloge permet de dater les événements d'un site et est mise à jour lors de l'occurrence des événements.
  - Les messages envoyés par un site sont estampillés en utilisant la valeur courante de l'horloge vectorielle du site émetteur,
  - La réception d'un message permet au site récepteur de synchroniser son horloge vectorielle avec celle du site émetteur du message.

4.1. Définition et principe des estampilles vectorielles

- HV_i désigne l'horloge vectorielle du site i
- EV_m désigne l'estampille vectorielle attribuée au message m lors de son envoi :
  - si un événement local se produit sur le site i, $HV_i[i]$ est incrémentée : $HV_i[i]$ ++
  - si un événement correspondant à l'envoi d'un message se produit sur le site i, $HV_i[i]$ est incrémentée, et le message m est envoyé avec la nouvelle valeur de HV_i comme estampille : $EV_m = HV_i$
  - si un message m d'estampille EV_m est reçu sur le site i :
    - $HV_i[i]$ est incrémentée,
    - $\forall j \neq i$, $HV_i[j] = \max(HV_i[j], EV_m[j])$

Exemple : Cf. feuille d'exercices

4.2. Propriétés des estampilles vectorielles

1) Propriété fondamentale :

- EV_e est l'estampille vectorielle de e :

$\Rightarrow \forall i , EV_e [i] = Card (\{e' / e' \in S_i \text{ et } e' \xrightarrow{\bullet} e \})$

$\Rightarrow$ i.e. la valeur de la i-ème composante de EV_e correspond au nombre d'événements du site S_i qui appartiennent au passé de e.

- Exemple : dans l'exercice l'estampille de p est [4,7,5]

2) Relation d'ordre sur les estampilles vectorielles :

- EV_e est l'estampille vectorielle de e :

$\Rightarrow EV_e \subseteq Ev_{e'} \Leftrightarrow \forall i, EV_e [i] \leq Ev_{e'} [i]$

- Exemple : [4,7,5] est plus petite que [7,9,5], plus grande que [1,5,4] et incomparable avec [6,5,7].

4.2. Propriétés des estampilles vectorielles

- Cette relation d'ordre reflète **exactement la relation de précédence causale entre événements :**

  - **Si EV_e est l'estampille vectorielle de e :**
    - **$e \xrightarrow{\bullet} e' \Leftrightarrow EV_e \subseteq Ev_{e'}$**
    - **$e \parallel e' \Leftrightarrow EV_e \parallel Ev_{e'}$**

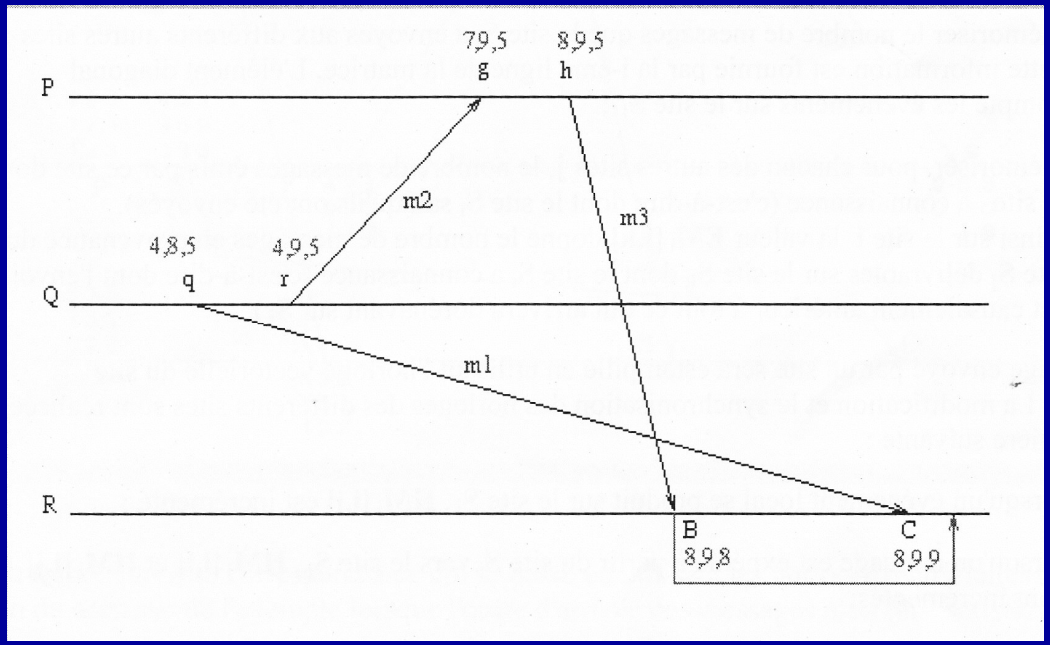
  - Exemple **: dans l'exercice précédent montrer des estampilles inférieure, supérieure et incomparable avec celle de p**

  - Preuve **: à faire en exercice [Charron-Bost]**

  - Exercice **: illustrer les différentes étapes de la preuve en considérant les événements incomparables e ([5,3,3]) et p ([4,7,5]) de l'exemple**

4.2. Propriétés des estampilles vectorielles

- Inconvénient des estampilles vectorielles **:**
  - ne permettent pas de garantir une délivrance causale des messages.



  - Dans l'exemple ci-dessus le message m3 est reçu trop tôt : pour respecter l'ordre causal de la délivrance il ne doit être délivré qu'après le message m1.
  - Les estampilles permettent de détecter **(a posteriori !)** la violation de l'ordre causal dans la réception des messages

5. Horloges et estampilles matricielles

5.1. Définition et principe des estampilles matricielles

- Inconvénients des estampilles vectorielles :

  $\Rightarrow$ Ne permettent pas de corriger la défaillance vis-à-vis de la délivrance causale des messages

- Principe des estampilles matricielles :

  - Dans un système de n sites, les horloges d'un site i et les estampilles des événements (et des messages) sont des matrices carrées d'ordre n.
  - HM_i désigne l'horloge matricielle du site S_i,
  - EM_m désigne l'estampille matricielle du message m,

5.1. Définition et principe des estampilles matricielles

- Sur le site S_i, la matrice HM_i va :
  - mémoriser le nombre de messages que le site S_i a envoyé aux différents autres sites : cette information est fournie par la i-ème ligne de la matrice.
  - L'élément diagonal représente la connaissance qu'a S_i du nombre d'événements locaux qui se sont déjà produits sur les différents sites S_j : correspond à l'estampille vectorielle.
  - mémoriser, pour chacun des autres sites j, le nombre de messages émis par ce site dont le site i a connaissance (i.e dont le site S_i sait qu'ils ont été envoyés).
  - Ainsi sur le site i, la valeur EM_i [j,k] donne le nombre de messages en provenance du site S_j délivrables sur le site S_k dont le site S_i a connaissance (i.e dont l'envoi est causalement antérieur à tout ce qui arrivera dorénavant sur S_i).

5.1. Définition et principe des estampilles matricielles

- La modification synchronisation des horloges des différents sites est réalisée de la manière suivante :
  - lorsqu'un événement local se produit sur le site S_i : HM_i [i,i] est incrémenté;
  - lorsqu'un message est expédié à partir du site S_i vers le site S_j : HM_i [i,i] et HM_i [i,j] sont incrémentés ;
  - lorsqu'un message m en provenance du site S_j est reçu sur le site S_i , il faut s'assurer que tous les messages envoyés antérieurement au site S_i y sont effectivement arrivés. Cela suppose donc que S_i ait reçu :
    - d'une part tous les messages précédents de S_j
    - d'autre part tous ceux envoyés plus tôt causalement depuis d'autres sites.
  - Cela correspond aux conditions suivantes (à vérifier dans l'ordre):
    1. HM_m [j,i] = HM_i [j,i] + 1 (ordre FIFO sur le canal (j,i))
    2. pour tout k ≠ i et j, HM_m [k,i] ≤ HM_i [k,i] (tous les messages en provenance des sites différents de S_j ont été reçus).

5.1. Définition et principe des estampilles matricielles

- Si toutes ces conditions sont vérifiées,le message est délivrable et l'horloge du site S_i est mise à jour :
  1. HM_i [i,i] ++ (incrémentation);
  2. HM_i [j,i] ++ (incrémentation);
  3. pour le reste de la matrice : HM_i [k,l] = max (HM_i [k,l], EM_m [k,l])

- *Si les conditions ne sont pas toutes vérifiées,* la délivrance du message est différée jusqu'à ce qu'elles le deviennent et l'horloge n'est pas mise à jour.

- La délivrance d'un message pourra ainsi provoquer celle des messages arrivés prématurément.

- Exemple : Cf. feuille d'exercices

Exemple : estampilles matricielles