

# Systèmes et algorithmes répartis

## Modèle standard et principes algorithmiques

Philippe Quéinnec, Gérard Padiou

ENSEEIH  
Département Sciences du Numérique

3 juillet 2020



# Plan

- 1 Le modèle standard
  - Approche événementielle
  - Causalité
  - Abstraction d'un calcul
- 2 Clichés (snapshots)
  - Prise de cliché
  - Utilisation des clichés
- 3 Description des algorithmes
  - Description du comportement des processus
  - Exemple : l'élection



# Modéliser un calcul réparti

## Objectifs

- Description statique et description comportementale
- Abstraction pour faciliter l'analyse
- Validation de propriétés (sûreté et vivacité)

## Les éléments de modélisation

- Les activités, processus, sites, etc  $\Rightarrow$  site logique
- La communication : liens, liaisons, canaux, protocoles (point à point, diffusion) . . .
- Les connaissances globales de chaque site logique

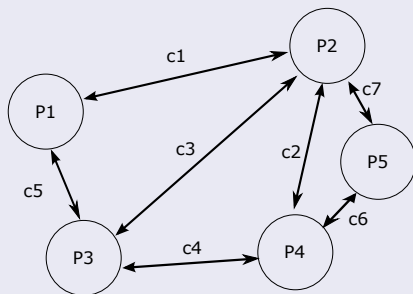
[ Précis 2.2.1 pp.29–30 ]



# Vision statique : Graphe de processus

## Graphe structurel (statique)

- Sommets  $\equiv$  processus / sites
- Arcs  $\equiv$  liaisons de communication / canaux



# Propriétés

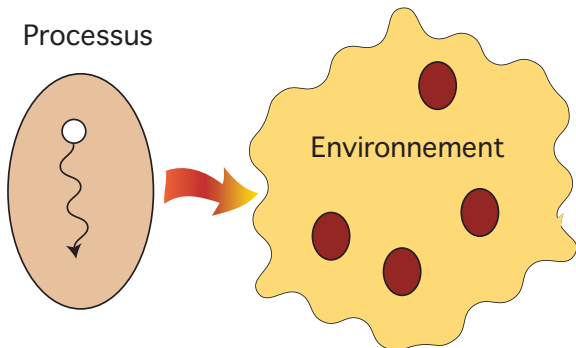
## Propriétés des processus / sites

- Un processus possède une identité unique
- Un processus possède un état rémanent
- Un processus exécute un code séquentiellement
- Un processus n'a qu'une connaissance partielle des autres
- Un processus peut communiquer avec un voisinage
- Défaillance : pause, arrêt définitif, comportement byzantin

## Propriétés du réseau

- Multiples paramètres : point à point ou diffusion, (a)synchrone, fiable, délais bornés, etc
- Messages : perte, duplication, modification du contenu

## Connaissances d'un processus



- Nombre de processus ?
- Voisinage de communication ?
- Structure du réseau : maillé, anneau, statique/dynamique, etc

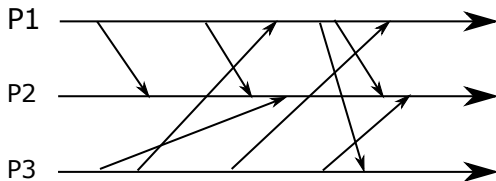


# Système asynchrone



## Modèle asynchrone

- Pas de temps externe commun
- Progression de chaque processus à son rythme
- Délai de transmission arbitraire



Modèle réaliste, faibles hypothèses, plus complexe pour développer et raisonner

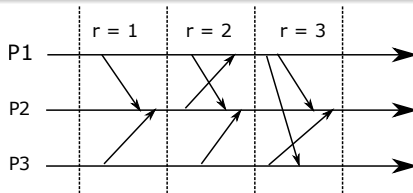


# Système synchrone



## Modèle synchrone

- Borne connue de délai de communication et de pas de calcul
- Pas de calcul (*round*) globaux
- Un message émis dans un pas est reçu au pas suivant / dans le même pas (selon le modèle)
- Cas particulier : rendez-vous = échange synchrone



Modèle peu réaliste, puissant.

Modèle mixte : sûreté si asynchrone, sûreté + vivacité si synchrone.

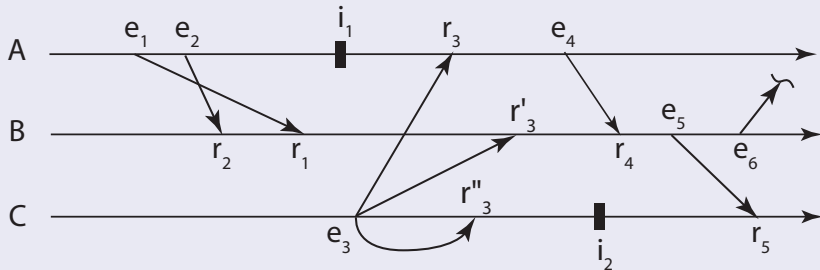


# Vision dynamique : Chronogramme



## Représentation événementielle

- Description globale, dans un repère temporel global
- Trois types d'événements : émission, réception, interne
- Modélisation de la communication : diffusion, perte, délais, etc
- **Causalité** entre événements



[ Précis 2.2.2, 2.2.3 pp.30-31 ]

## Relation de causalité (Lamport 1978)



### Ordre partiel strict entre événements $\prec$

- Les événements d'un processus sont totalement ordonnés :  
 $e$  et  $e'$  sur le même site, et  $e$  précède  $e'$ , alors  $e \prec e'$ .
- L'émission d'un message précède causalement sa réception :  
Si  $e = \text{émission}(m)$  et  $e' = \text{réception}(m)$ , alors  $e \prec e'$ .
- Transitivité :  $\forall e, e', e'' : e \prec e' \prec e'' \Rightarrow e \prec e''$
- La relation  $\prec$  est un **ordre partiel** :  $e \parallel e' \triangleq e \not\prec e' \wedge e' \not\prec e$
- Indépendant du temps physique mais consistant avec :  
 $e \prec e' \Rightarrow e$  est survenu avant  $e'$  dans le temps absolu

[ Précis 2.2.4 p.31 ]

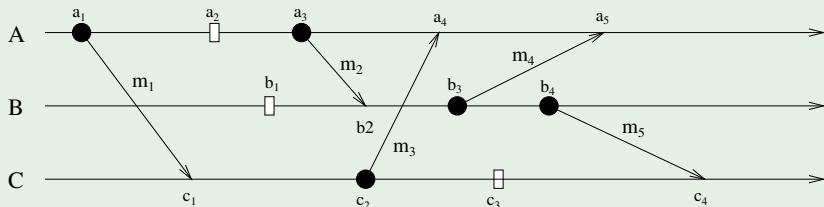
1. *Time, Clocks and the Ordering of Events in a Distributed System*, Leslie Lamport. Communications of the ACM, July 1978.



# Relation de causalité



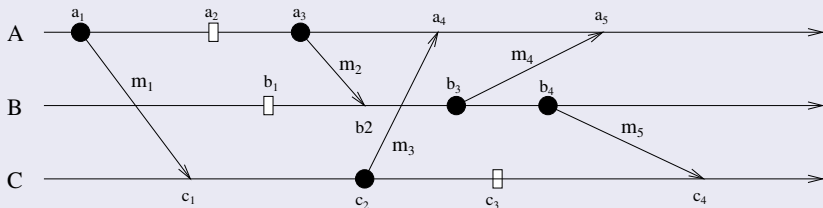
## Exemple



$$\begin{aligned} a_1 &\prec a_2 \prec a_3 \prec a_4 \prec \dots \\ a_1 &\prec c_1, c_2 \prec a_4, b_4 \prec c_4 \\ a_1 &\prec c_3 \text{ (car } a_1 \prec c_1 \prec c_2 \prec c_3) \\ a_2 &\prec c_4 \\ a_3 &\parallel c_2 \end{aligned}$$

# Abstraction d'un calcul réparti

## Exécutions causalement équivalentes



- Ensemble d'événements + relation causale  
→ ensemble d'exécutions réelles équivalentes

$$a_1; b_1; c_1; a_2; \dots \equiv a_1; a_2; c_1; b_1; \dots$$

$$a_1; c_1; a_2; \dots \not\equiv c_1; a_1; a_2; \dots \text{ car } a_1 \prec c_1$$

- Le choix des événements fixe un niveau d'observation

# Passé / futur causal

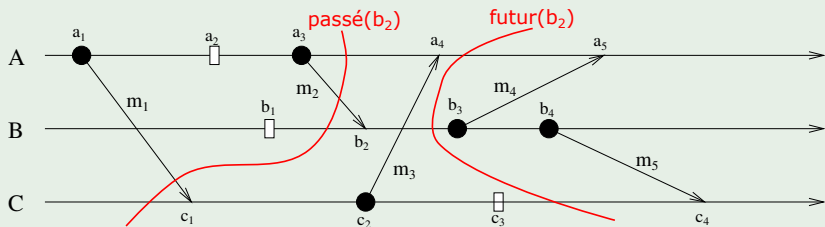
## Partition des événements

$$\text{passé}(e) \triangleq \{f \mid f \prec e\}$$

$$\text{futur}(e) \triangleq \{f \mid e \prec f\}$$

$$\text{concurrence}(e) \triangleq \{f \mid f \notin \text{passé}(e) \wedge f \notin \text{futur}(e)\}$$

## Exemple



$$\text{passé}(b_2) = \{a_1, a_2, a_3, b_1\}$$

$$\text{futur}(b_2) = \{a_5, b_3, b_4, c_4\}$$

# Coupure et coupure cohérente



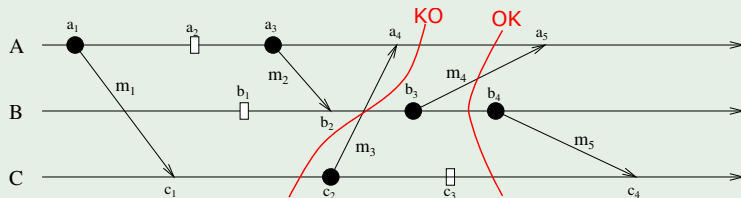
## Coupure

Une **coupure** est un ensemble d'événements qui forment des préfixes complets des histoires locales.

## Coupure cohérente

Une coupure  $C$  est **cohérente** si  $\forall e \in C : \forall e' : e' \prec e \Rightarrow e' \in C$

## Exemple



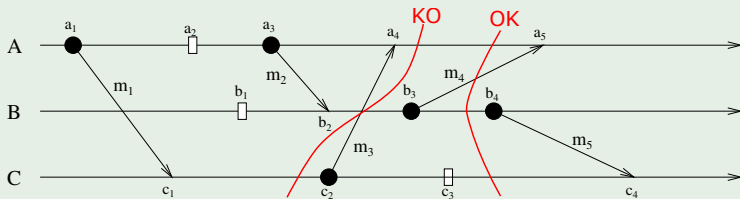
# Passé et coupure cohérente



Une coupure  $C$  est cohérente ssi  $C = \bigcup_{e \in C} (\text{passe}(e) \cup \{e\})$  :

- Pas de « trou » sur un site
- Une réception n'est pas présente sans son émission

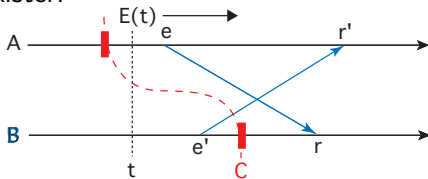
## Exemple



# Coupure cohérente et état global



Une coupure cohérente correspond à un état global qui **aurait pu** exister.

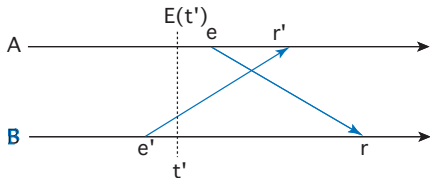


Réalité

La coupure est cohérente **mais...**

État effectif

L'état n'a pas existé à un instant global





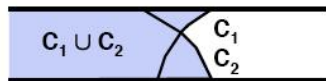
## Treillis des coupures (cohérentes)

### Treillis des coupures

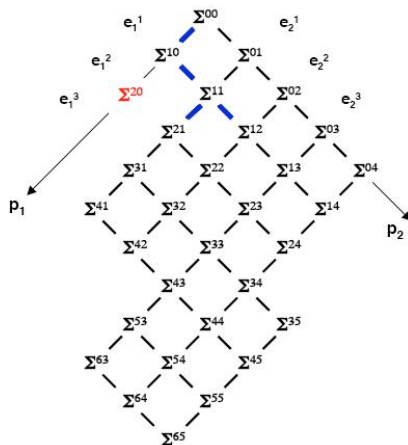
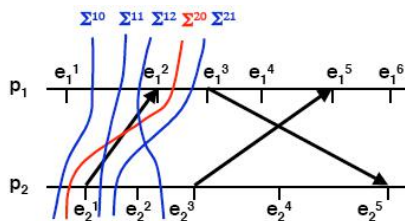
L'ensemble des coupures forme un treillis pour l'inclusion et l'intersection : si  $C_1$  et  $C_2$  sont deux coupures, alors  $C_1 \cup C_2$  et  $C_1 \cap C_2$  sont des coupures.

### Treillis des coupures cohérentes

L'ensemble des coupures cohérentes forme un treillis pour l'inclusion et l'intersection : si  $C_1$  et  $C_2$  sont deux coupures cohérentes, alors  $C_1 \cup C_2$  et  $C_1 \cap C_2$  sont des coupures cohérentes.



# Treillis des coupures cohérentes



- Arc du treillis = occurrence d'un événement possible
- Une exécution = suite d'états globaux cohérents = chemin dans le treillis

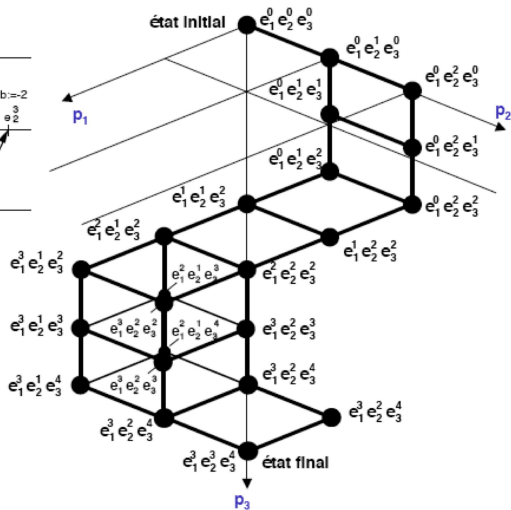
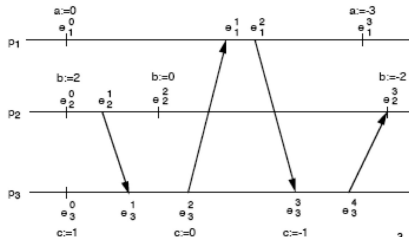
Explosion du nombre d'exécutions causalement équivalentes

(dessins : cours S. Krakowiak)



# Treillis des coupures cohérentes

## Autre exemple



(dessin : cours S. Krakowiak)