

## Partage du temps et ordonnancement

Guillaume Salagnac

Insa de Lyon – Informatique

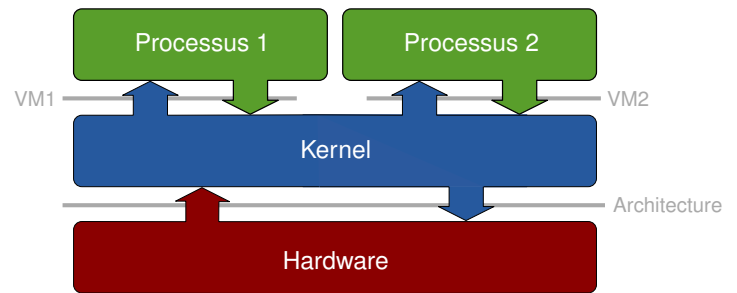
2021–2022

### Plan

1. Introduction: rappels sur la notion de processus
2. Multitâche par commutation de contextes d'exécution
3. Ordonnancement: formulation du problème
4. Ordonnancement: les stratégies classiques
5. Évaluation de politiques d'ordonnancement

3/39

## Résumé des épisodes précédents: noyau vs userland



Le processus vu comme une «machine virtuelle»

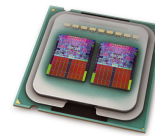
- un processeur pour moi tout seul: «CPU virtuel»
- une mémoire pour moi tout seul: «mémoire virtuelle»

2/39

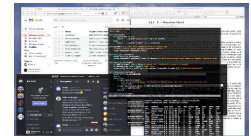
## Définitions: Multitasking vs Multiprocessing

Multitraitement, en VO *Multiprocessing, multi-core computing*

Utilisation simultanée de plusieurs CPU dans un même système



VS



Multiprogrammation = multitâche

ou en VO *multiprogramming* = multitasking

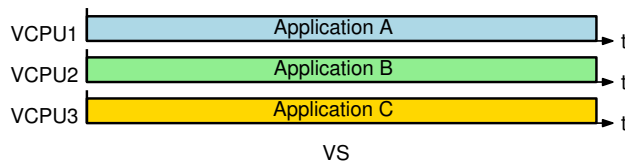
Faculté d'exécuter plusieurs programmes «à la fois»

► en général: nombre de CPU << nombre de processus

4/39

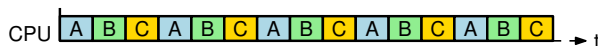
## Pseudo-parallélisme et entrelacement

Abstraction = 1 VCPU / application



VS

Implementation = CPU time-sharing



Remarque: L'entrelacement doit être assez fin pour ne pas se voir

5/39

## Le «Degré de multiprogrammation»

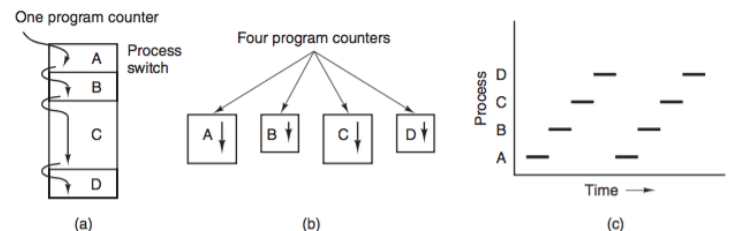


Figure 2-1. (a) Multiprogramming four programs. (b) Conceptual model of four independent, sequential processes. (c) Only one program is active at once.

Définition: degré de multiprogrammation

nombre de processus actuellement chargés en mémoire

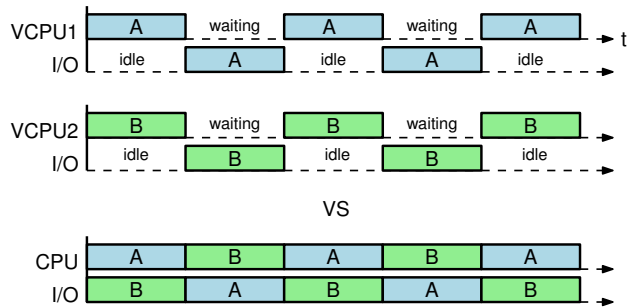
source: Tanenbaum. *Modern Operating Systems (4th ed, 2014)*. page 87

6/39

## Pourquoi la multiprogrammation ?

### Loi empirique

L'exécution d'un programme alterne entre des phases de **calcul** (en VO **CPU burst**) et des phases d'**entrées-sorties** (**I/O burst**)



7/39

## La multiprogrammation: remarques

Vous avez dit «des phases d'entrées-sorties» ?

- **latence d'accès** au matériel: disque, réseau...
- lenteur de l'utilisateur d'un **programme interactif**
- **synchronisation** avec d'autres programmes

Mauvaise solution: attente **active** (polling)

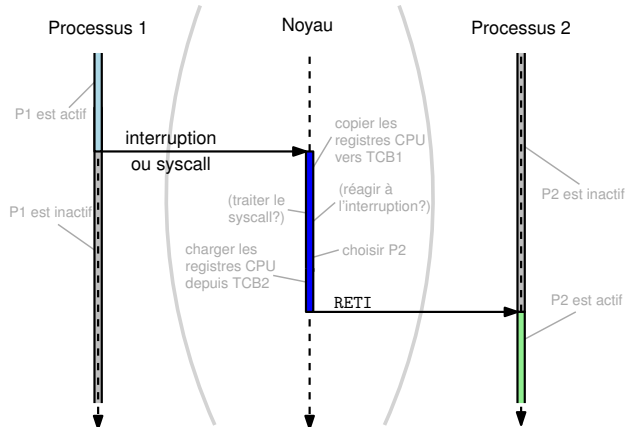
- difficile pour le programmeur d'application
- temps processeur gâché à attendre

Bonne solution: attente **passive**

- plus facile pour le développeur
- meilleur taux d'utilisation du CPU
  - masquage (= recouvrement) des latences
- ▶ besoin d'un mécanisme pour se partager le processeur

8/39

## Commutation de contexte, ou en VO context switch



9/39

## Context switch: remarques

- **dispatcher** = implémentation du context switch
  - exécuté très souvent ▶ doit être bref (**dispatch latency**)
- **scheduler** = choix du processus à qui rendre la main
  - possible que  $P2 = P1$ , par exemple `gettimeofday()`...
  - possible que  $P2 \neq P1$ , par ex. `read()` ▶ appel **bloquant**

Structures de données du noyau:

- **Process Control Block** = PCB
  - représente un processus et son état d'exécution (données...)
  - contient PID, fichier exécutable, permissions, etc (priorité...)
  - contient un TCB
- **Thread Control Block** = TCB
  - représente un VCPU, aussi appelé **contexte d'exécution**
  - contient une copie du contenu du CPU: registres, PC, SR...

vocabulaire: (dans ce chapitre) «processus» == «thread»

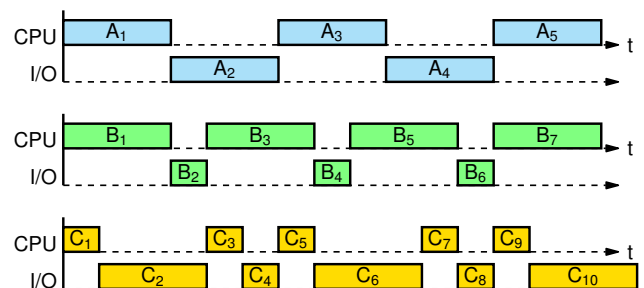
10/39

## Plan

1. Introduction: rappels sur la notion de processus
2. Multitâche par commutation de contextes d'exécution
3. Ordonnancement: formulation du problème
4. Ordonnancement: les stratégies classiques
5. Évaluation de politiques d'ordonnancement

11/39

## Quel processus exécuter après un context switch?

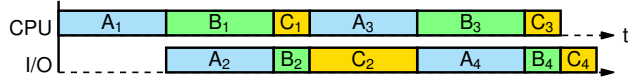


Question: étant donnés ces trois processus et un seul CPU, comment les organiser dans le temps «au mieux» ?

12/39

## Ordonnancement naïf

Première idée: exécuter A, B et C à tour de rôle

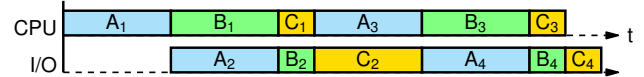


► plutôt bien pour A, moins bien pour B, et médiocre pour C

13/39

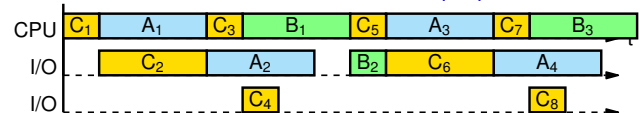
## Ordonnancement naïf

Première idée: exécuter A, B et C à tour de rôle



► plutôt bien pour A, moins bien pour B, et médiocre pour C

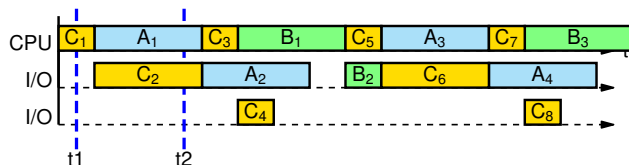
Deuxième idée: exécuter C aussi souvent que possible



► beaucoup mieux pour C, et presque aussi bien pour A et B

13/39

## Tous les processus ne sont pas en permanence candidats à l'exécution



à l'instant t1:

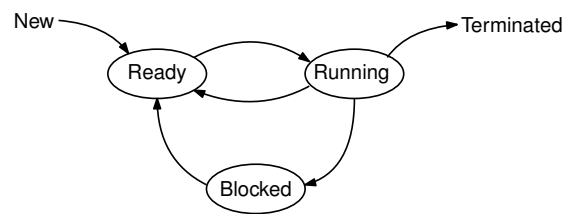
- C est en train de s'exécuter
- A et B attendent de pouvoir s'exécuter

à l'instant t2:

- A est en train de s'exécuter
- C attend que son opération d'entrée-sortie se termine
- B attend de pouvoir s'exécuter

14/39

## Diagramme état-transitions (1)

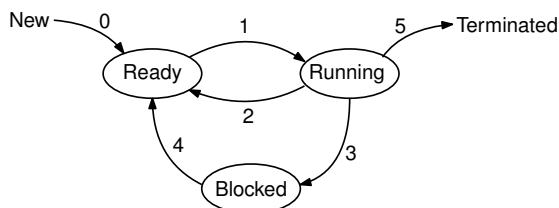


État du processus (méorisé dans son Process Control Block)

- New: en cours de création par le noyau
- Running = actif: actuellement exécuté par le processeur
- Ready = activable: attend qu'on lui donne la main
- Blocked = endormi = suspendu: en attente d'un évènement
- Terminated = fini: en cours de nettoyage par le noyau

15/39

## Diagramme état-transitions (2)



Transitions:

- 0 le noyau a fini de créer le processus
- 1 le dispatcher charge le processus sur le CPU
- 2 une IRQ / un syscall interrompt l'exécution du programme
- 3 le programme fait un syscall bloquant
  - par ex: entrée-sortie read(), délai passif sleep(), etc...
- 4 l'évènement attendu se produit
  - par ex: donnée disponible, délai écoulé, etc...
- 5 le programme se termine (volontairement ou non)

16/39

## Problème d'ordonnancement: formulation

### Ordonnancement CPU, ou en VO process scheduling

- étant donné  $K$  processus ready = prêts à s'exécuter,
  - et connaissant «leurs caractéristiques»
- étant donné  $N \geq 1$  processeurs disponibles, décider quel processus exécuter sur chaque processeur

Remarque: à quels instants cette question se pose-t-elle ?

- lors d'une transition running → blocked (3), par ex. sleep()
- lors de la terminaison (5) d'un processus
- lors d'une transition blocked → ready (4)
- lors d'une transition running → ready (2)
  - par ex. sur réception d'une interruption du system timer
- lors de la création (0) d'un nouveau processus

17/39

## Ordonnancement préemptif vs coopératif

Ordonnanceur **non-préemptif**: appelé seulement sur (3) et (5)

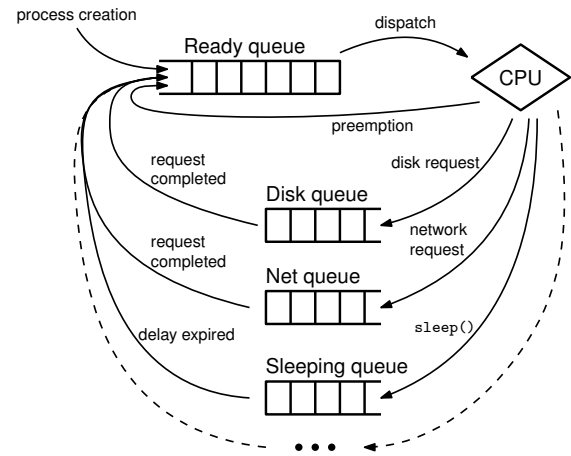
- les applications **rendent explicitement la main** au noyau
  - appels système bloquants
  - + un appel système `yield()` pour lâcher le CPU
- plus efficace mais suppose de faire confiance aux applications

Ordonnanceur **préemptif**: sur (3), (5) et aussi (0), (2) et (4)

- permet au noyau de **garder le contrôle** de la machine
  - interruptions de timer régulières pour assurer la **préemption**
- coûteux mais tous les OS grand public font ça

18/39

## Organisation des PCB en files d'attente



19/39

## Organisation des PCB en files: remarques

Les PCB des processus prêts forment la **Ready Queue**

- aussi appelée **Run Queue**

Rôle du scheduler: choisir un PCB parmi la Ready Queue

Processus bloqués ► transférés dans une autre file d'attente

- une **Device Queue** par périphérique d'entrées-sorties
- une file d'attente pour les processus endormis
- ... une file pour chaque autre raison d'être **Blocked**

20/39

## Plan

1. Introduction: rappels sur la notion de processus
2. Multitâche par commutation de contextes d'exécution
3. Ordonnancement: formulation du problème
4. Ordonnancement: les stratégies classiques
5. Évaluation de politiques d'ordonnancement

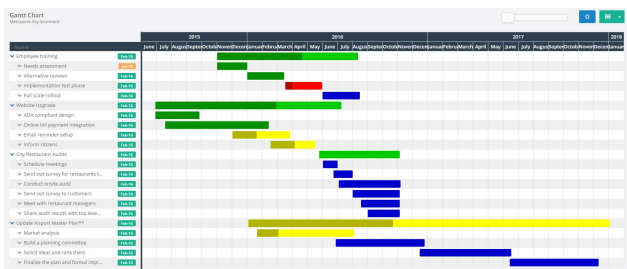
21/39

## Ordonnancement = planification de tâches

Ordonnancement **a priori**: projets, usine, etc

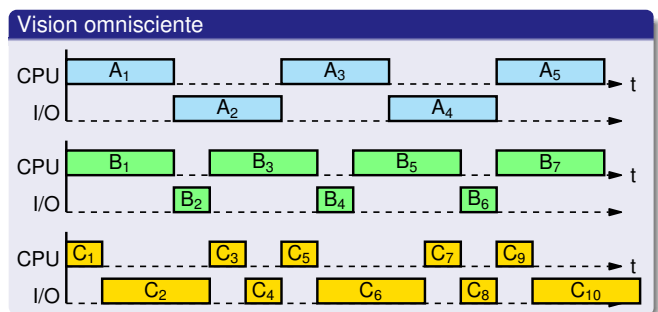
**Entrées**: ensemble de «tâches» avec durées et dépendances  
(+ ensemble de «ressources» disponibles)

**Sorties**: une **date de début** pour chaque tâche  
(+ affectation des ressources)



22/39

## Ordonnancement a priori vs processus infinis



VS

Vision de l'ordonnanceur à  $t=0$

La **Ready Queue** contient A, B et C. Le CPU est libre.

► comment décider qui exécuter ? rien pour les départager

23/39

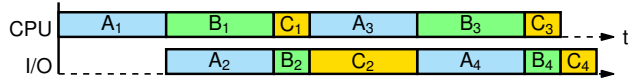
## Ordonnancement FCFS: First Come First Served

aussi appelé FIFO (First In First Out)

### Politique d'ordonnancement FCFS: principe

choisir la tâche **qui est arrivée le plus tôt** dans la ready queue

Dans notre exemple:



### Remarques:

- inspiré par les files d'attente FIFO de la vie réelle
- ordonnancement non préemptif
- *convoy effect*, en VF effet de convoi, effet d'accumulation
  - «petites» tâches risquent d'être désavantagées, par ex. C
- plutôt équitable ; aucun risque de famine

24/39

## Le risque de famine, en VO starvation

### Définition: famine = privation

Situation dans laquelle une tâche, bien que **prête**, se retrouve à **attendre indéfiniment** avant de pouvoir s'exécuter

### Remarques:

- ordonnanceur non-préemptif + 1 tâche infinie = famine
  - hypothèse: pas de tâches de durée infinie
- ordonnanceur préemptif + malchance = famine
  - malchance, ou malveillance (par ex. déni de service)

Risque de famine vs **absence garantie de famine**

en VO: non-starvation, bounded waiting

25/39

## Découpage de l'exécution en «bursts» (en VF: rafales)

### Hypothèse de travail:

- pour chaque processus dans la ready queue, le noyau a un moyen pour **connaître la durée** de sa prochaine **CPU-burst**

**Remarque:** en pratique, les «tâches» orchestrées par un scheduler d'OS sont ces **CPU-bursts**, et non pas les processus

### Vision de l'ordonnanceur à t=0

La **Ready Queue** contient **A<sub>1</sub>**, **B<sub>1</sub>** et **C<sub>1</sub>**.

► à quelle tâche doit-on donner le processeur en premier ?

26/39

## Différents goulots d'étranglement

Un processus est qualifié de «**compute-bound**» (VF «limité par le calcul») si sa performance dépend beaucoup de la vitesse du CPU

- activité = surtout des CPU-bursts

Un processus est qualifié de «**I/O-bound**» (VF «limité par les E-S») si sa performance dépend beaucoup de la vitesse des E-S

- activité = surtout des I/O-bursts

### Loi empirique

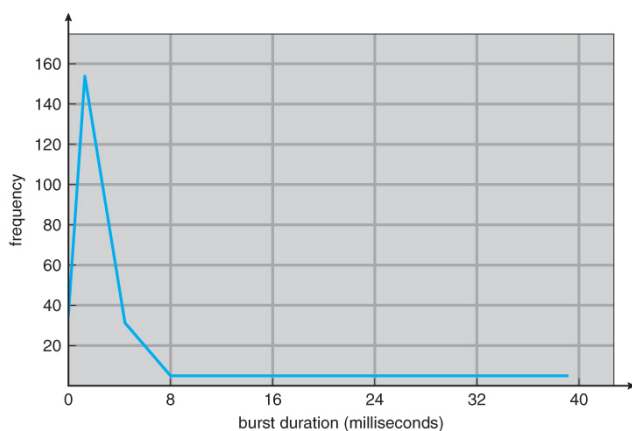
En pratique, tout processus peut être considéré *soit* comme étant plutôt **compute-bound** *soit* comme étant plutôt **I/O-bound**.

### Remarques:

- processus A dans notre exemple: pas réaliste
- certains processus changent de comportement à certains moments

27/39

## Beaucoup de bursts courts, peu de bursts longs



source: Silberschatz *Operating Systems Concepts Essentials* (2011). p 177

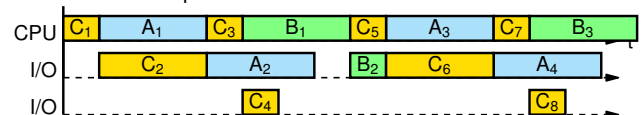
28/39

## Ordonnancement SJF: Shortest Job First

### Politique d'ordonnancement SJF: principe

choisir la tâche **la plus courte** dans la ready queue

Dans notre exemple:



### Remarques

- avantageux pour les processus IO-bound...
- ...sans être réellement pénalisant pour les CPU-bound
- mais: **risque de famine**

29/39

## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>

30/39

## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>

30/39

## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: B<sub>1</sub>, C<sub>3</sub>

30/39

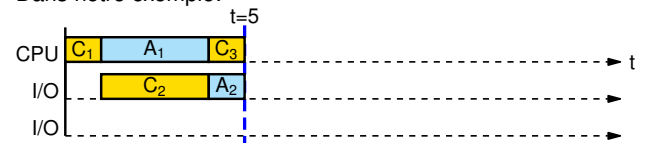
## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: B<sub>1</sub>

30/39

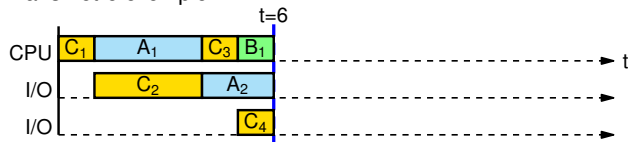
## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: B<sub>1</sub>, C<sub>5</sub>

► **Préemption** de la tâche active (B<sub>1</sub>) au profit de la tâche C<sub>5</sub>

30/39

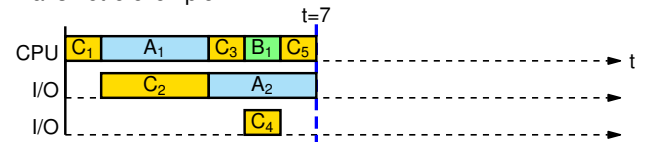
## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub>

30/39

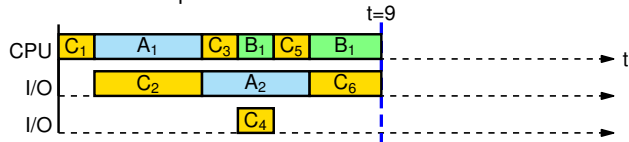
## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: A3

30/39

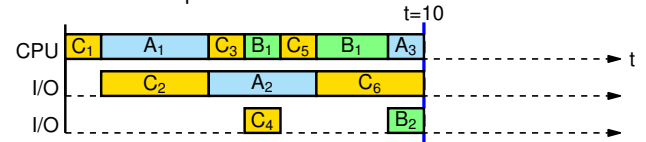
## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: A3, B3, C7

► **Préemption** de la tâche active (A3) au profit de la tâche C7

30/39

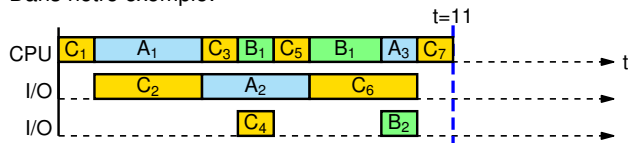
## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: A3, B3

30/39

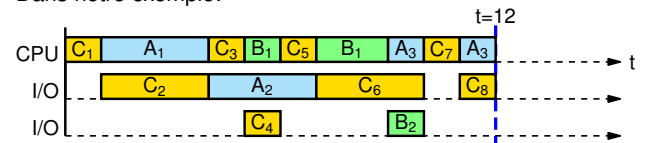
## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: A3, B3, C9

► C est prêt mais A garde le CPU

30/39

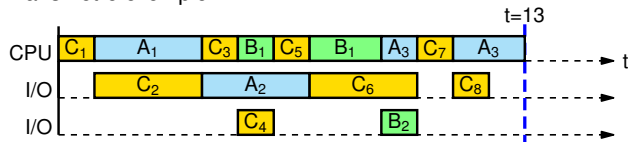
## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Ready Queue: B3, C9

30/39

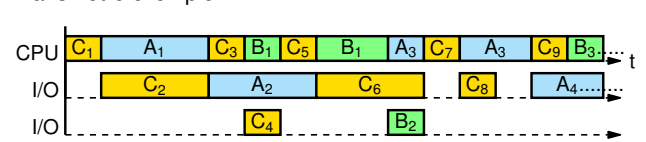
## Ordo. SRTF: Shortest Remaining Time First

### Politique d'ordonnancement SRTF: principe

chaque fois qu'une nouvelle tâche arrive dans la ready queue, lancer la tâche la plus courte de la ready queue

► variante *préemptive* de SJF

Dans notre exemple:



Remarques:

- ordonnancement préemptif: plus réactif que SJF
- mais famine toujours possible

30/39

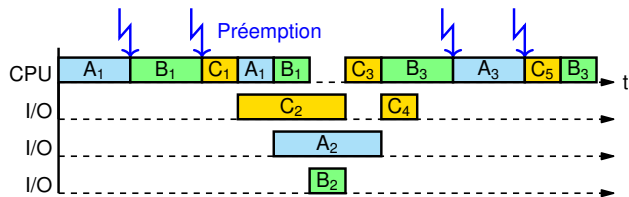
## Ordonnancement RR: Round Robin (en VF: tourniquet)

### Politique d'ordonnancement Round Robin: principe

- donner le CPU à tour de rôle à chaque tâche...
- ... pour une durée maximale  $q$  (en VO **time quantum**)
- **préemption** lorsqu'une tâche dépasse son quantum

► variante **préemptive** de FCFS

Dans notre exemple, ordonné en RR avec  $q = 2$



31/39

## Ordonnancement Round Robin: remarques

- Variante préemptive de FCFS
  - nouvelles tâches prêtes toujours ajoutées en fin de file
  - ready queue traitée comme une file d'attente FIFO
  - famine impossible
- Préemption grâce à IRQ du system timer
  - si IRQ à fréquence constante ► notion de **kernel tick**
    - quantum exprimé en nombre de ticks
  - si IRQ flexibles = *tickless kernel*
    - quantum exprimé en millisecondes
- Compromis entre **durée du quantum** et **latence du dispatcher**
  - si quantum trop long ► manque de réactivité
  - si quantum trop court ► surcoût en performance

32/39

## La vraie vie: ordonnancement à priorités

### Ordonnancement à priorités: principe

- maintenir **plusieurs ready queues** distinctes
- les examiner par **ordre de priorité** décroissante
- chaque file applique une politique différente: RR, SRTF...

#### Variantes:

- priorités fixes ► ordonnancement temps-réel
- priorités variables ► temps partagé (AKA *best-effort*)
  - exemple: **Multi-Level Feedback Queues Scheduling (MLFQ)**
  - on se donne des critères pour changer un processus de file

#### Exemple de MLFQ:

- priorité haute: RR  $q=5ms$  ► processus «interactifs»
- priorité moyenne: RR  $q=50ms$  ► processus I/O-bound
- priorité basse: SRTF ► CPU-bound en tâche de fond

33/39

## Plan

1. Introduction: rappels sur la notion de processus
2. Multitâche par commutation de contextes d'exécution
3. Ordonnancement: formulation du problème
4. Ordonnancement: les stratégies classiques
5. Évaluation de politiques d'ordonnancement

34/39

## Évaluation de politiques d'ordonnancement

### Méthodologies d'évaluation

- **simulation déterministe**: sur un scénario donné
  - dérouler les algorithmes, à la main ou sur machine
- **modélisation stochastique**
  - théorie des files d'attente, chaînes de markov...
- **instrumentation de système réel**: benchmarking
  - interférences de performances, choix de la workload

Nous = simulation à la main

- 1 «tâche» = 1 CPU-burst
- paramètres = durée d'exécution et date d'arrivée

	tâche	durée	tâche	arrivée	durée
Exemples:	T1	6	T1	0	8
	T2	8	T2	1	4
	T3	3	T3	2	9
			T4	3	5

35/39

## Critères d'évaluation

- CPU utilization rate**: fraction du temps où le CPU est productif
- i.e. occupé à exécuter du code applicatif (vs noyau, ou *CPU idle*)
- Throughput = débit**: nombre de tâches terminées par unité de temps
- attention: n'a de sens que si les «tâches» peuvent «terminer»
- Non-Starvation**: absence **garantie** de risque de famine
- propriété «qualitative» en VF: non-privation, équité
- Turnaround time** (tps de séjour): durée entre **arrivée** et **terminaison**
- n'a de sens que si les «tâches» peuvent «terminer»
- Waiting time** (temps d'attente): durée passée dans la **ready queue**
- aussi: «missed time» en VF: temps d'attente
- Response time**: durée entre **arrivée** et «réponse»
- attention: il faut définir ce qu'on appelle «réponse»

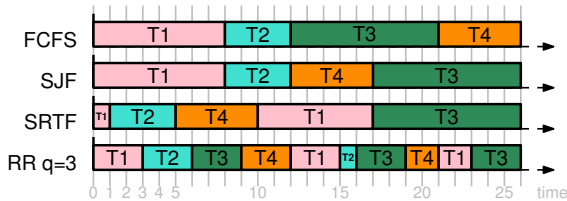
36/39



## Exemple

Soit le scénario suivant:

tâche	arrivée	durée
T1	0	8
T2	1	4
T3	2	9
T4	3	5



Pour SRTF:  $TT = \frac{(17 - 0) + (5 - 1) + (26 - 2) + (10 - 3)}{4} = 13$

$WT = \frac{(10 - 1) + 0 + (17 - 2) + (5 - 3)}{4} = 6.5$

37/39

## Plan

1. Introduction: rappels sur la notion de processus
2. Multitâche par commutation de contextes d'exécution
3. Ordonnancement: formulation du problème
4. Ordonnancement: les stratégies classiques
5. Évaluation de politiques d'ordonnancement

38/39

## À retenir

### Policy vs Mechanism

- Multitasking vs Multiprocessing
- Virtual CPU vs context switch + scheduling

### Concepts importants:

- Dispatcher, Scheduler, Process Control Block, Prémption, CPU-burst / IO-burst, États d'un processus, Ready Queue...

### Stratégies d'ordonnancement (en VO scheduling policies)

- First Come First Served
- Shortest Job First et Shortest Remaining Time First
- Round Robin avec un certain quantum
- Ordonnancement à priorités fixes ou dynamiques
  - dont Multi-Level Feedback Queue

### Évaluation: Turnaround Time, Waiting Time...

39/39