



# Planification et Ordonnancement

Année Universitaire: 2019-2020

Présenté Par :

- Mme. GRINE Fatima Zahraa



# Plan du Cours

## Introduction

### I. Planification de la production

1. Les niveaux décisionnels dans l'entreprise
2. MRP
3. Calcul des besoins

### II. Les Techniques d'ordonnancement

1. Ordonnancement de projet: PERT/GANTT
2. Ordonnancement d'atelier
3. Ordonnancement d'atelier à une machine
4. Ordonnancement à cheminement unique (Flow shop)
  - a. Flow shop à 2 Machines
  - b. Flow shop à 3 Machines
5. Ordonnancement à cheminement Multiple (Job Shop)
  - a. Job shop à 2 Machines

## • Definition:

➔ La planification des opérations consiste à définir, en fonction des délais et des priorités, les dates de début des opérations d'un ordre (**OT = Ordre de Travail ; OF = ordre de fabrication, OM = Ordre de maintenance, OA = Ordre d'achat ...**), afin que celles-ci soit terminées dans les délais prévus.

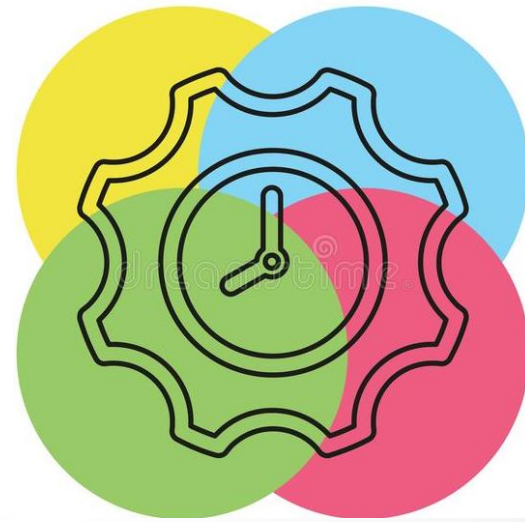


➔ Lorsque plusieurs ordres, qui nécessitent les mêmes ressources sont lancés au même moment, différentes règles de priorité peuvent être utilisées pour fixer les dates de début d'exécution. Dans la fonction production, la planification est faite de façon séquentielle et en suivant une hiérarchie à trois niveaux .

# • Definition:

## ➤ Globalement, elle obéit à la démarche suivante :

- ✓ Estimation des besoins de consommation par famille de produits ;
- ✓ Décomposition des besoins de chaque famille de produit en références finales (produit fini) ;
- ✓ Calcul des besoins bruts sur la base de la nomenclature ;
- ✓ Evaluation des stocks, calcul des besoins nets et planification des ordres;
- ✓ Planification des charges (main d'œuvre, machines, temps opératoires) sur la base des gammes d'opération ;
- ✓ Exécution du plan de fabrication.



# Planification de la Production

- Definition:

La planification industrielle implique de faire intervenir plusieurs fonctions de l'entreprise afin de déterminer les délais et les priorités de la production.

De la direction générale qui a une vision à plus long terme jusqu'au responsable de production qui gère le planning journalier



# Planification de la Production

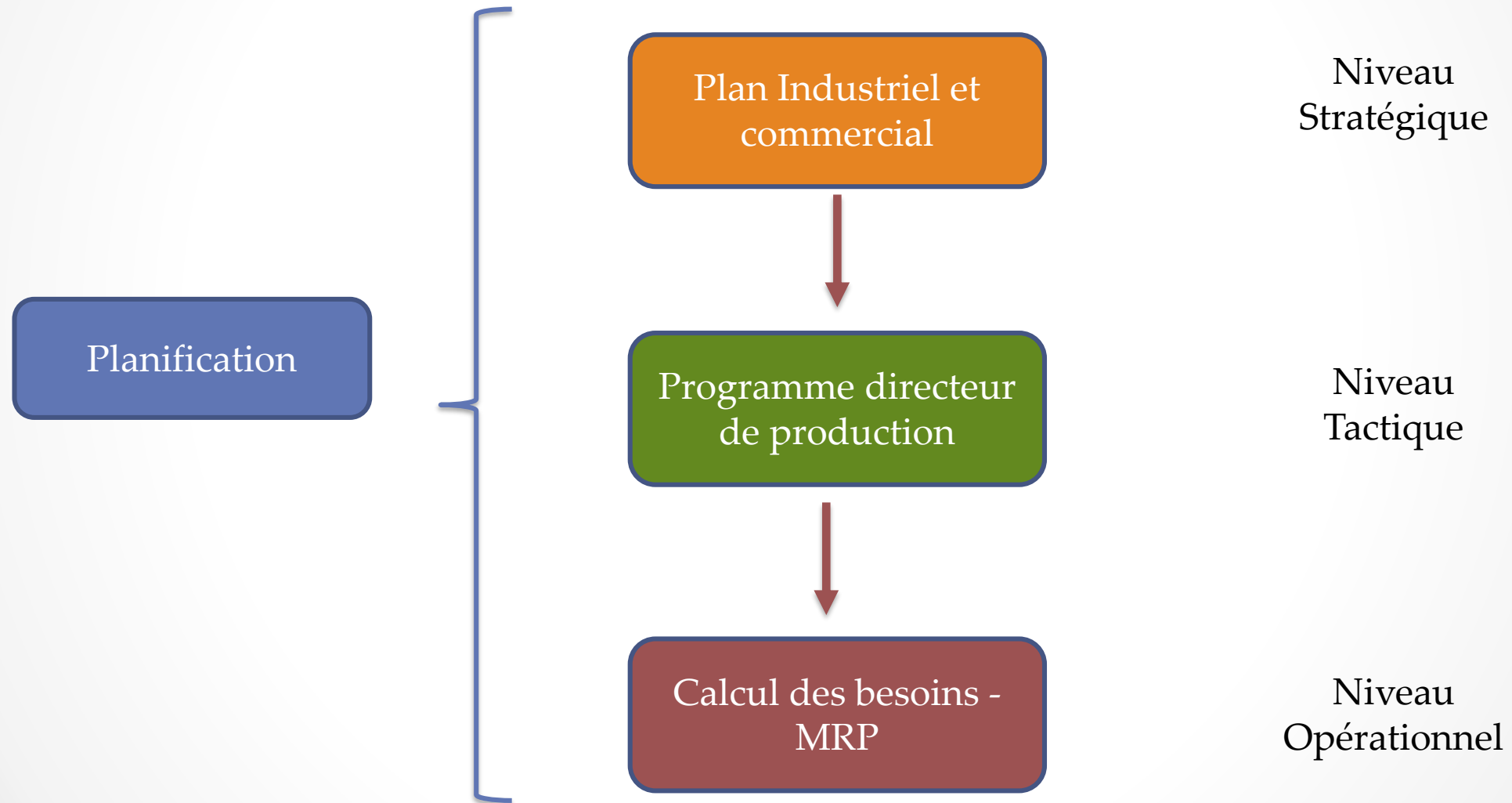
## Etapas:

La planification industrielle se décompose en différentes étapes successives.

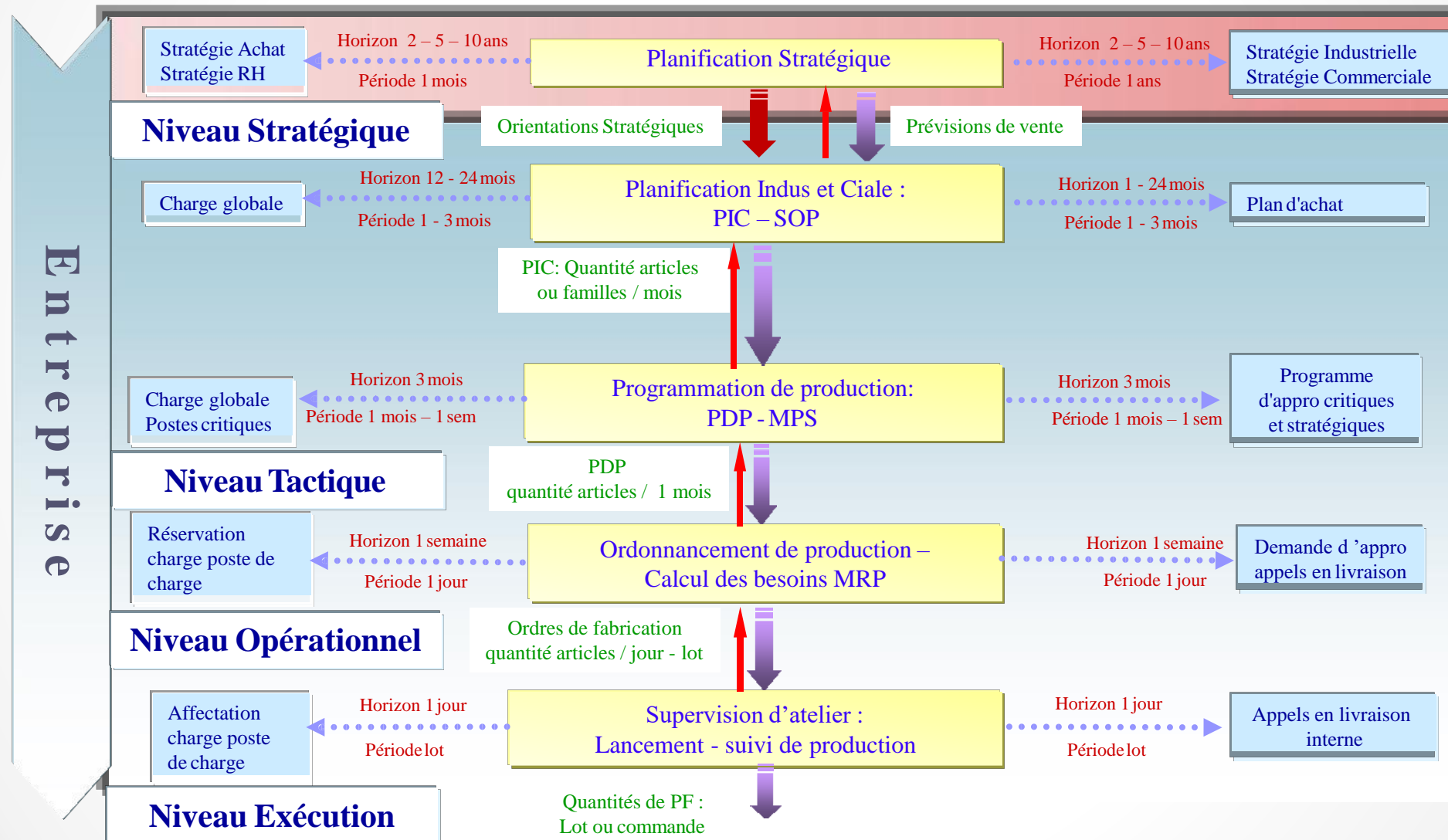
- La première étape le PIC consiste à planifier à moyen et long terme, en tenant compte des prévisions de ventes et des quantités à produire.
- La seconde étape le PDP reprend les données issues du PIC sur une vision à plus court terme et les convertit en données de production.
- La troisième étape de la planification industrielle se traduit par la réalisation d'un plan de charge afin de vérifier les capacités de production par rapport à la charge de travail. Le plan de charge permet donc de piloter les ateliers en établissant un planning des quantités à fabriquer ainsi que les dates de lancement et de livraison. Ce planning est réalisé à court terme et sa mise à jour est quotidienne.

# Planification de la Production

Les niveaux décisionnels d'une entreprise



# Les niveaux décisionnels d'une entreprise



# Planification de la Production

## → Le Plan Industriel et Commercial (PIC)

- Le PIC est la première étape de la planification industrielle
- Le PIC définit ce que l'entreprise va faire dans un moyen et long terme.
- Les délais concernés sont le mois et même le trimestre.
- Le PIC offre une vision prévisionnelle des ventes et de la production.
- Le PIC sert à établir des prévisions de vente portant sur des familles de produits, des niveaux de stock désirés et des contraintes de production

# Planification de la Production

## → Le Plan Industriel et Commercial (PIC)

### ➤ Objectifs

- Permettre de calculer la charge globale
- Vérifier globalement l'adéquation entre la charge de production et la capacité disponible sur le long terme.
- Gérer les moyens de production afin d'équilibrer la charge par rapport à la capacité et d'assurer le meilleur service client.

# Planification de la Production

## → Le Plan Directeur de Production (PDP)

- Il reprend les données issues du PIC sur une vision à plus court terme et les convertit en données de production.
- Le PDP sert à équilibrer les stocks et les charges et à suivre l'évolution des ventes réelles par rapport aux prévisions définies dans le PIC.
- Les données issues du PDP servent à effectuer le Calcul des Besoins Nets (CBN).
- Le PDP est une référence pour le commercial qui doit satisfaire sa clientèle et le service de production qui doit réaliser son programme en tenant compte des contraintes industrielles.
- Il est établi à partir des commandes fermes des clients, des prévisions de ventes et des niveaux de stock des produits.

# Planification de la Production

## → Le Plan Directeur de Production (PDP)

### ➤ Objectifs

- Anticiper les besoins des clients (prévisions),
- Convertir les familles du PIC en produits par période sous la forme d'un échéancier indiquant les quantités à produire,
- Suivre l'évolution des ventes par rapport aux prévisions,
- Garantir un taux de service client tout en minimisant le niveau de stock,
- Faire le meilleur usage du matériel, de l'équipement et des ressources,
- Informer le commercial des produits disponibles à la vente

# Planification de la Production

## → Le CBN ou MRP0 (Material requirement planning ou Planification des Besoins en Composants)

- A son début le MRP (MRP0) connu sous le nom de CBN (Calcul des besoins nets) était une méthode de planification des besoins se basant sur les nomenclatures produit.
- Le Calcul des Besoins Nets détermine les besoins en matières et composants si les stocks disponibles ne permettent pas de couvrir entièrement les besoins bruts.
- Il détermine, sur la base des prévisions de ventes, les quantités brutes de matières premières à approvisionner.
- À cette quantité, il va ensuite déduire le stock pour déterminer les besoins nets :

$$\text{Besoin brut} - \text{Stock} = \text{Besoin net}$$

# Planification de la Production

➔ Le CBN ou MRP0 (Material requirement planning ou Planification des Besoins en Composants)

## ❑ Historique:

- 1965 M.R.P."0" : Material Requirements Planning (Planification des Besoins en Composants) M.R.P. ne représente alors qu'une méthode de calcul des besoins matières.
- 1971 M.R.P."1" : Material Requirements Planning (Méthode de Régulation de la Production). C'est un système à boucles fermées avec adéquation charge / capacité.
- 1979 M.R.P."2" : Manufacturing Ressources Planning (Management des Ressources de la Production).  
M.R.P. s'étend à l'ensemble de l'entreprise.
- 1995 E.R.P. : Enterprise Ressources Planning (Planification des ressources de l'entreprise). E.R.P. couvre l'ensemble des flux matières et financiers de l'entreprise.

# Planification de la Production

➔ Le CBN ou MRP0 (Material requirement planning ou Planification des Besoins en Composants)

➤ Le (MRP0) permet de répondre à trois questions :

- Quel produit produire ?
- Pour quand devons nous le produire ?
- Combien devons nous en produire ?

# Planification de la Production

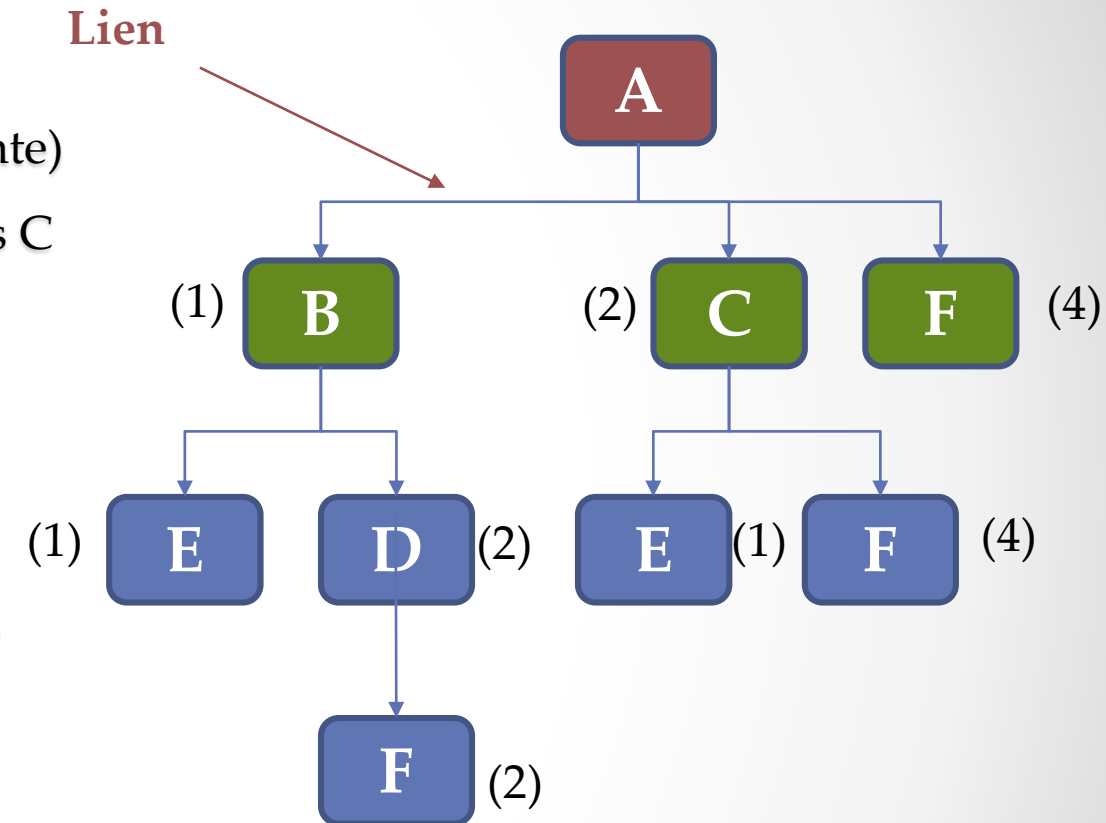
➔ Le CBN ou MRP0 (Material requirement planning ou Planification des Besoins en Composants)

➔ Pour réaliser ce calcul, il est nécessaire d'obtenir :

- Les nomenclatures permettant d'obtenir les composants de chaque produit,
- Les délais d'obtention (fabrication, assemblage, approvisionnement),
- Les produits en stock ou en cours de fabrication,
- Les tailles de lots de fabrication ainsi que la valeur du stock de sécurité

# Planification de la Production

- Basé sur les liens de nomenclature (représentation arborescente)
- A se compose d'un sous-ensemble B, de deux sous-ensembles C et de quatre pièces F...
- Nombre de composants pour un composé de niveau immédiatement supérieur (**coefficient technique ou de montage**)
- En final, le montage d'une unité de A suppose de disposer de trois unités de E et de seize unités de F
- Pour 200 produits A commandés:
- il faut approvisionner 600 pièces E et 3200 pièces F : ce sont les besoins bruts



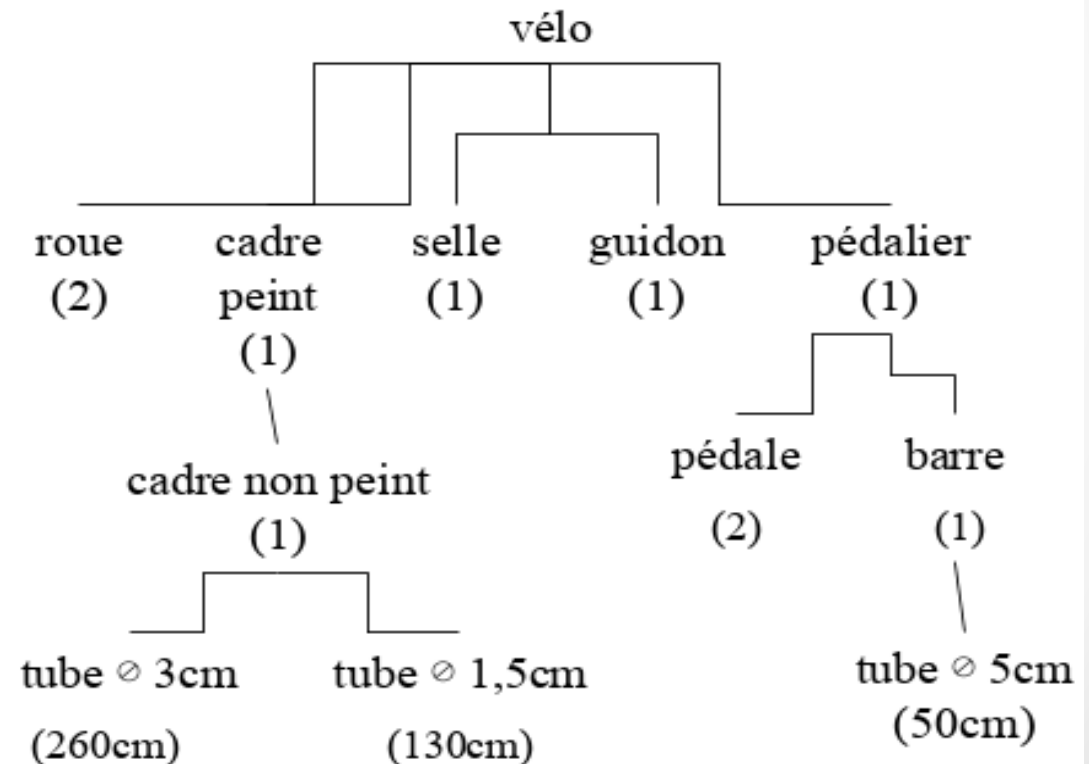
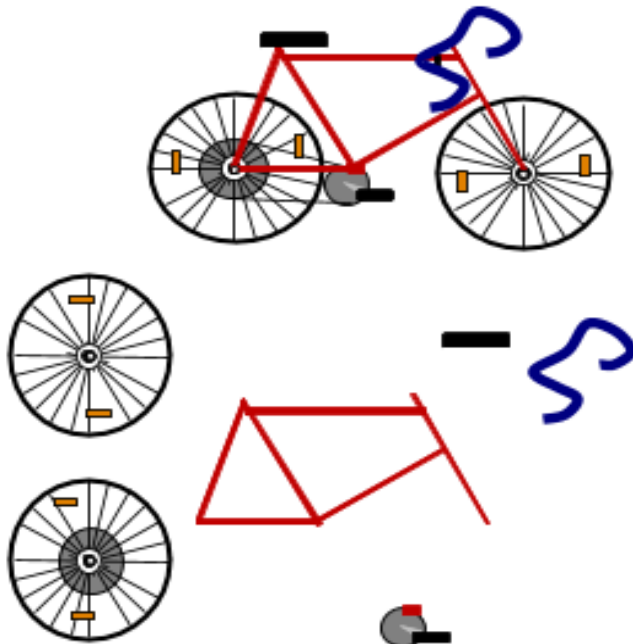
# Planification de la Production

→ Le CBN ou MRP0 (Material requirement planning ou Planification des Besoins en Composants)

## Principes

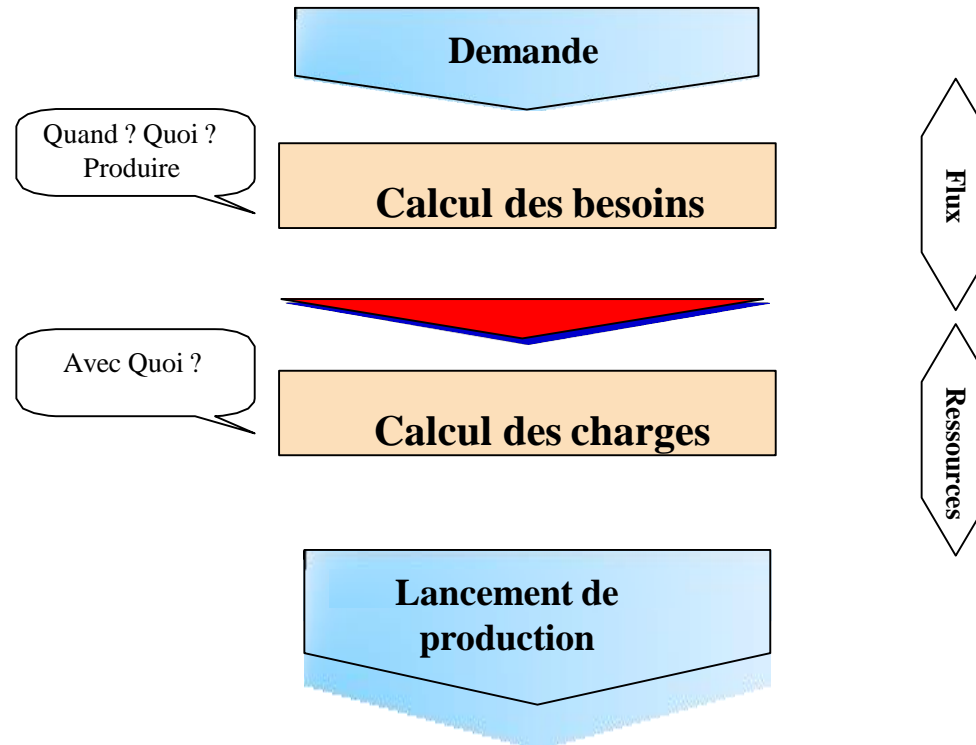
Une nomenclature :

- établit / représente la liste des constituants d'un produit
- crée des liens entre les articles composés et les composants



# Calcul des besoins : MRP

Le MRP enchaîne deux calculs distincts



# Calcul des besoins : MRP

## ❑ Données d'entrées :

- PDP
- Gamme, Nomenclature
- Stock disponible pour chaque composant

## ❑ Caractéristiques :

- Porte sur l'ensemble des composants
- Maille : journée
  - ✓ tous les besoins sont positionnés, par le système, sur les jours ouvrés de la semaine (dans des « buckets »)
  - ✓ la maille peut augmenter au fur et à mesure que l'on avance dans le temps
- Horizon : suffisant pour déclencher tous les approvisionnements
  - ✓ au moins équivalent au délai total de production
  - ✓ de l'ordre de 12 mois en général
- Mise à jour : quotidienne
  - ✓ L'MRP est un outil de pilotage au quotidien
  - ✓ les entreprises le font fonctionner généralement pendant la nuit

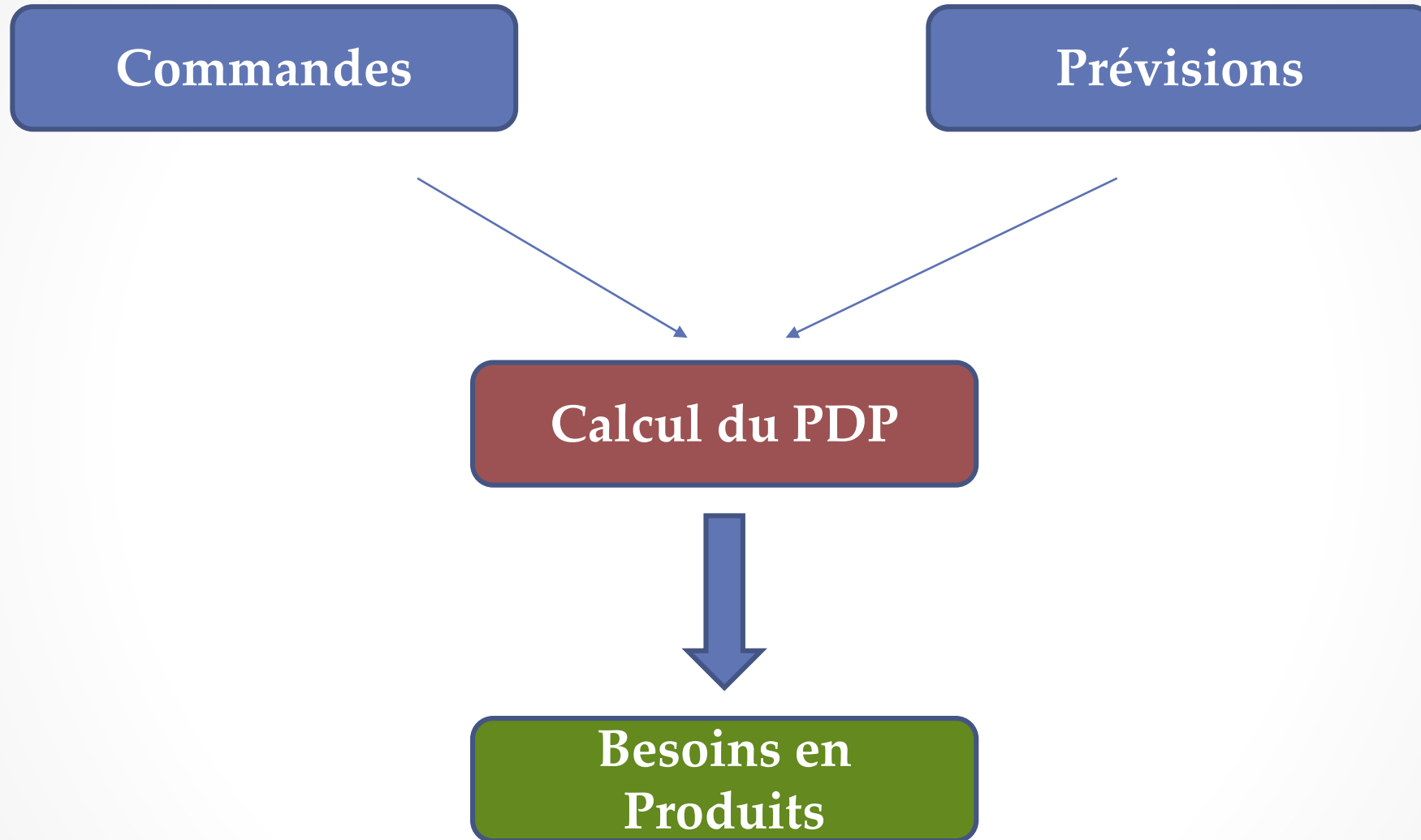
## Tableau type

Taille lot : 100 Délai : 2 semaines		J1	J2	J3	J4	...
Besoin Brut			50	45	20	
Réceptions prévues		10				
Stock disponible	65	75	25	80	60	
Besoin net				20		
Réception d'ordres planifiés				100		
Lancement d'ordres planifiés		100				

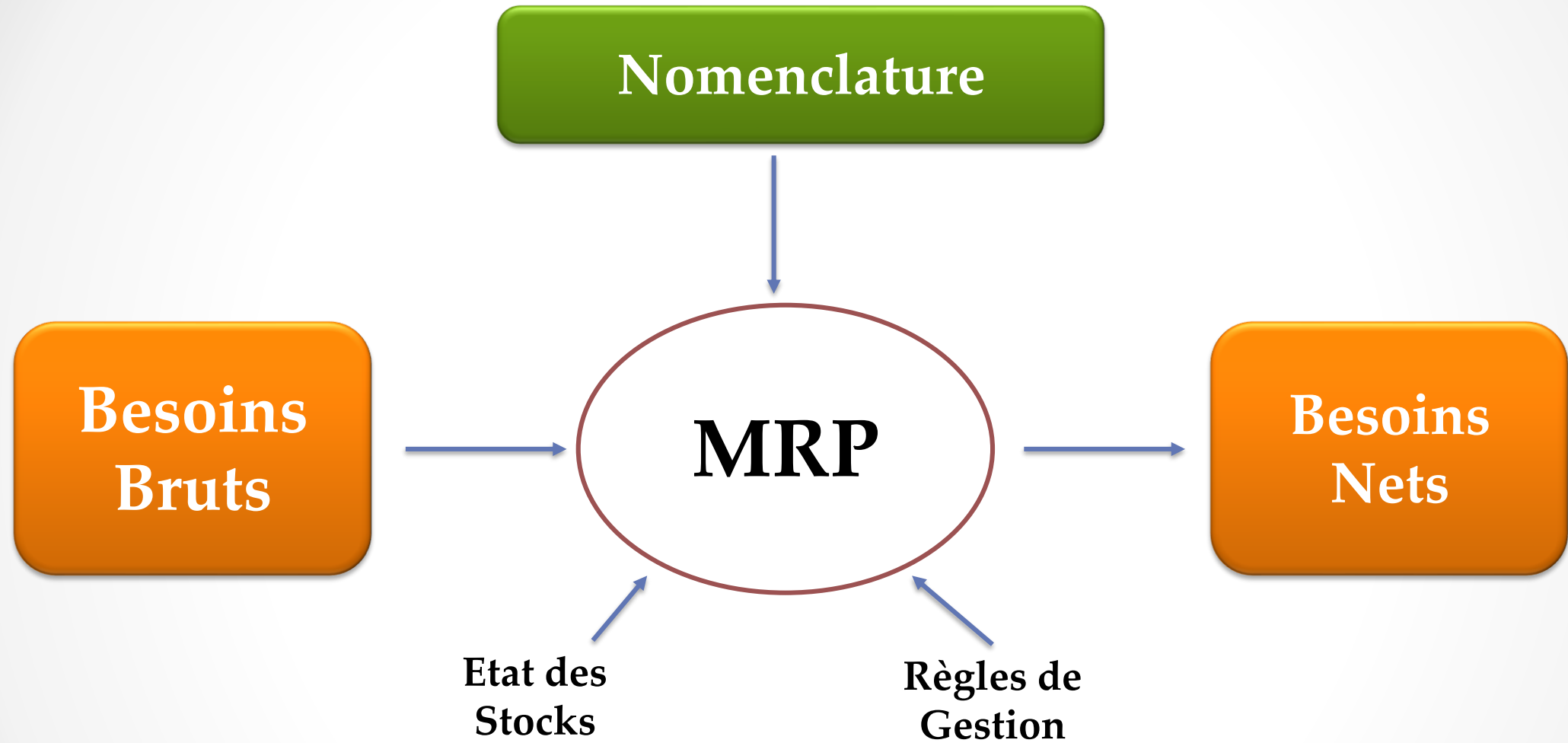
## Décisions prises :

- lancement d'ordres
- déplacement d'ordres ouverts
- positionnement d'ordres fermes
- contrôle de l'approvisionnement de la matière critique
- coordination avec les achats, les master schedulers, ...

## Récapitulatif:



## Récapitulatif:



# CBN

## Logique du calcul des besoins

- $BN(t) = BB(t) - SP(t-1) - OL(t)$

Si  $BN(t) > 0$  une multiple de lot doit être disponible à cette période (Ordre proposé fin)

- $SP(t) = SP(t-1) + OL(t) + OP(t) - BB(t)$

$300(\text{PDP début}) \times 2$

$L = 1000 ; D = 2$

C		18	19	20	21	22	23	24	25
Besoins bruts		600	600	600	600	600	600	600	0
Ordres lancés			1000						
Besoins nets		540	0	0	340	0	540	140	0
Stocks prévisionnels	60	460	860	260	660	60	460	860	860
Ordres proposés	Fin	1000			1000		1000	1000	
	Début		1000		1000	1000			

$BN(t) = BB(t) - SP(t-1) - OL(t)$   
 $BN(18) = 600 - 60 - 0$   
 $BN(18) = 540$

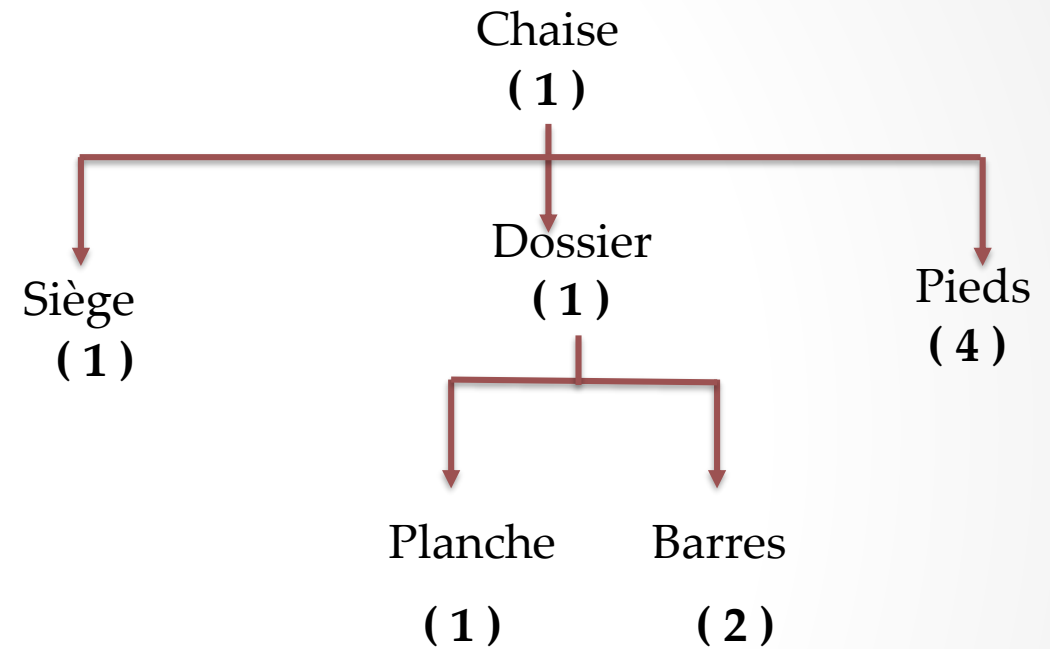
$SP(t) = S(t-1) + OL(t) + OP(t) - BB(t)$   
 $SP(18) = 60 + 0 + 1000 - 600$   
 $SP(18) = 460$

# Remarques

- Le besoin net en  $t$  est la différence entre le besoin brut en  $t$  et le stock en  $t-1$
- Pour trouver ce qu'il faut fabriquer ou commander pour satisfaire un besoin net en  $t$ , il est nécessaire de voir s'il y a une contrainte ou non. Si c'est le cas il faut prendre le multiple de la contrainte immédiatement supérieur ou égal au besoin net en  $t$ . Par exemple si le besoin net en  $t$  est de 380 et s'il faut acheter par multiple de 60, alors la quantité à acheter sera de 420.
- Le stock en  $t$  se calcule en faisant la différence entre la quantité à acheter ou à fabriquer et le besoin net en  $t$
- Dans une même colonne il faut que le stock plus le besoin net soit égal au besoin brut

# Planification de la Production

## Exemple 1:



# Planification de la Production

## Exemple 1:

Chaises	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Besoin brut				10	15	25	25	30	45	20	30
Ordre à Lancer			10	15	25	25	30	45	20	30	

On dispose des données suivantes :

- Stock en semaine 0 = 160 pieds
- Quantité de fabrication minimale pour les pieds = 100
- Semaine 3 : arrivée de 100 pieds
- Délai 2 semaines

➔ Calculer le  
Besoin Net pour  
les Pieds

Exemple 1:

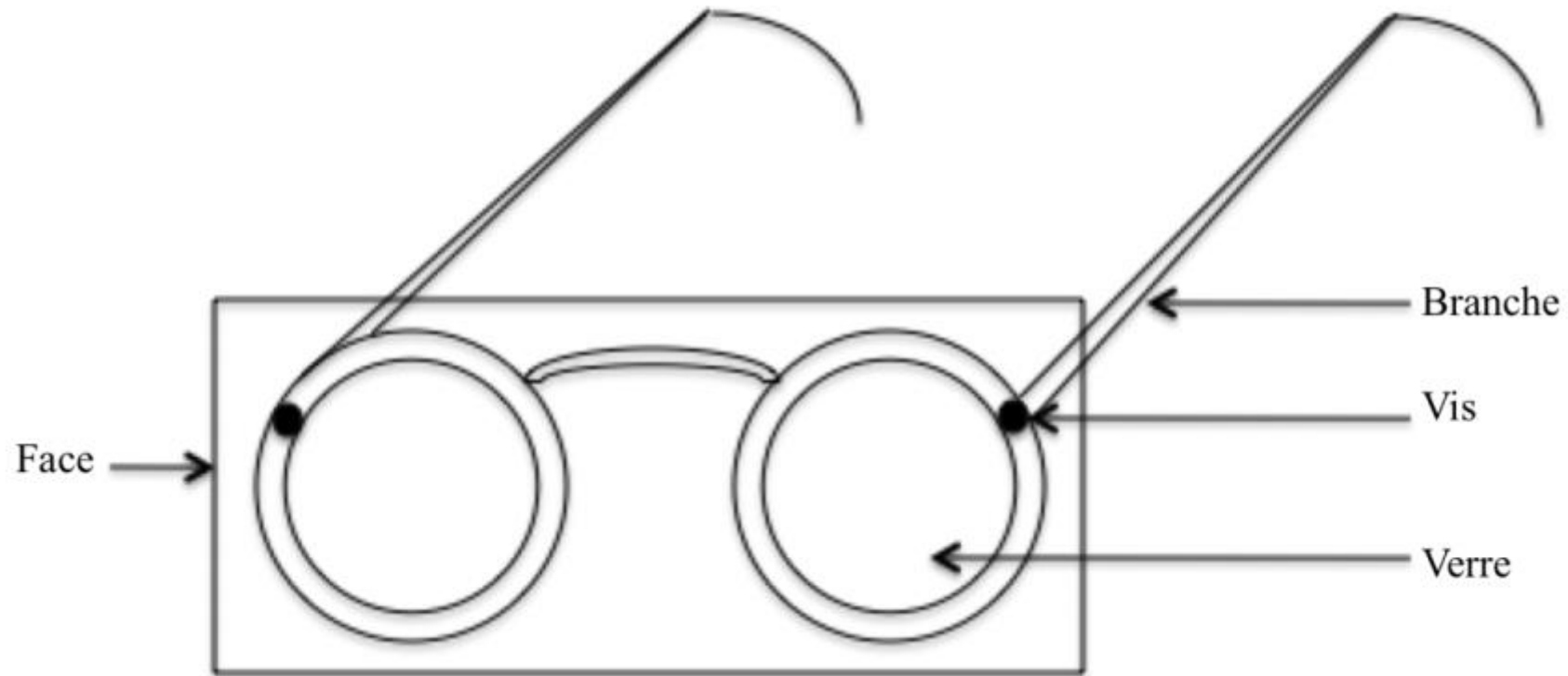
Pieds (Chaises *4)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Besoin brut		40	60	100	100	120	180	80	120	
En Cours			100							
Stock	160									
Besoin Net										
Quantité Commandée										
Ordre à Lancer										

# Planification de la Production

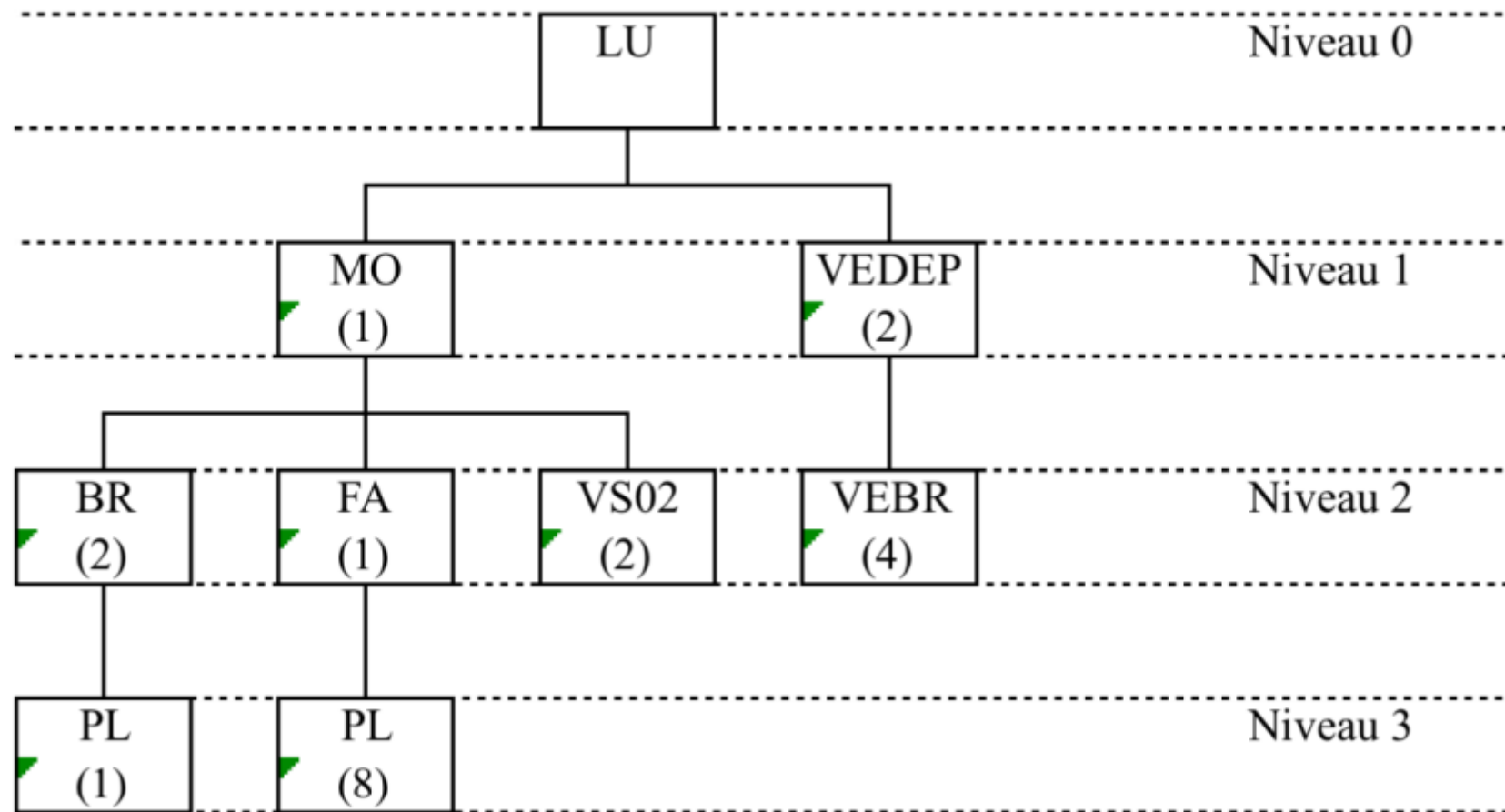
## Exemple 1:

Pieds (Chaises *4)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Besoin Brut		40	60	100	100	120	180	80	120	
En cours			100							
Stock	160	120	160	60	60	40	0	20	0	
Besoin net					40	60	140	80	100	
Quantité Commandée					100	100	140	100	100	
Ordre à lancer			100	100	140	100	100			

# Planification de la Production



# Planification de la Production



# Planification de la Production

→ Programme directeur de production pour les lunettes

Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

PROGRAMME DIRECTEUR DE PRODUCTION												
	Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LUNETTES	Besoins bruts		50	50	50	50	50	10	10	10	10	10
Lot pour lot	Réceptions prévues		80									
Lot multiple = 10	Stock final	20	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stock de sécurité = 0	Besoins nets		0	0	50	50	50	10	10	10	10	10
Délai = 2 périodes	Début d'ordre		50	50	50	10	10	10	10	10	0	0

periodes	a orare											
----------	---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Lot pour lot  
 Lot multiple=10  
 Stock de sécurité=0  
 Délai= 2 périodes

# Planification de la Production

## → Planification des besoins en composants

### Niveau 1

	Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MONTURES	Besoins bruts		50	50	50	10	10	10	10	10	0	0
Lot pout lot	Réceptions prévues											
Lot multiple = 10	Stock final	60	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stock de sécurité = 0	Besoins nets		0	40	50	10	10	10	10	10	0	0
Délai = 1 période	Début d'ordre		40	50	10	10	10	10	10			

	Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VERRES	Besoins bruts		100	100	100	20	20	20	20	20	0	0
Lot pout lot	Réceptions prévues											
Lot multiple = 10	Stock final	200	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stock de sécurité = 0	Besoins nets		0	0	100	20	20	20	20	20	0	0
Délai = 2 périodes	Début d'ordre		100	20	20	20	20	20	0	0	0	

# Planification de la Production

## Niveau 2

	Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BRANCHE	Besoins bruts		80	100	20	20	20	20	20	0	0	0
Lot pout lot	Réceptions prévues		60									
Lot multiple = 10	Stock final	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stock de sécurité = 0	Besoins nets		0	100	20	20	20	20	20	0	0	0
Délai = 1 période	Début d'ordre		100	20	20	20	20	20	0			

	Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FACE	Besoins bruts		40	50	10	10	10	10	10	0	0	0
Lot pout lot	Réceptions prévues											
Lot multiple = 10	Stock final	50	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stock de sécurité = 0	Besoins nets		0	40	10	10	10	10	10	0	0	0
Délai = 1 période	Début d'ordre		40	10	10	10	10	10	0	0	0	0

# Planification de la Production

	Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VIS	Besoins bruts		80	100	20	20	20	20	20	0	0	0
Lot pout lot	Réceptions prévues											
Lot multiple = 10	Stock final	200	120	20	0	0	0	0	0	0	0	0
Stock de sécurité = 0	Besoins nets		0	0	0	20	20	20	20	0	0	0
Délai = 2 périodes	Début d'ordre		0	20	20	20	20	0	0	0	0	0

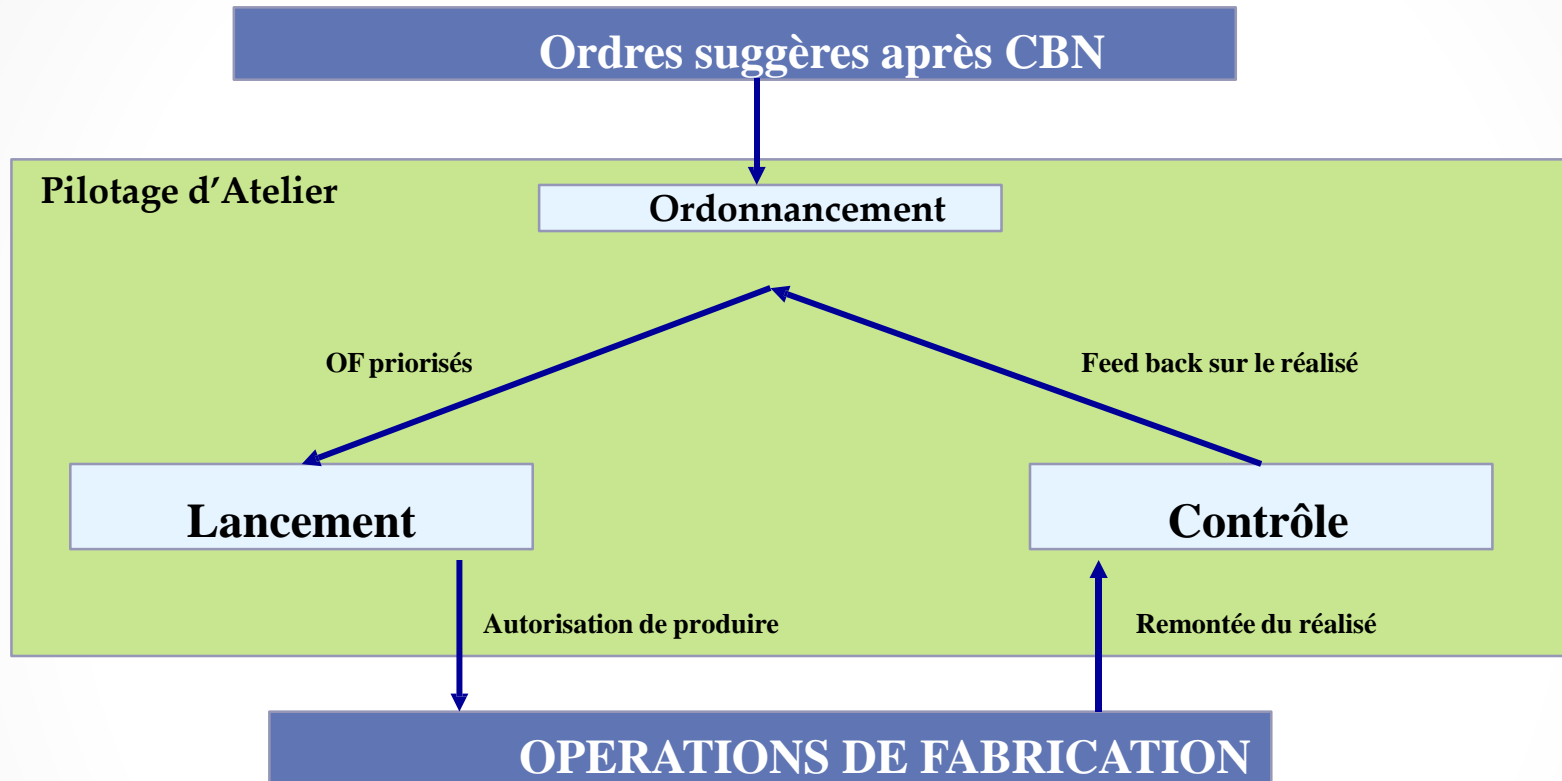
	Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VERRE BRUT	Besoins bruts		400	80	80	80	80	80	0	0	0	0
Lot pout lot	Réceptions prévues											
Lot multiple = 10	Stock final	500	100	20	0	0	0	0	0	0	0	0
Stock de sécurité = 0	Besoins nets		0	0	60	80	80	80	0	0	0	0
Délai = 3 périodes	Début d'ordre		80	80	80	0	0	0	0	0	0	0

# L'ordonnancement

❑ L'ordonnancement a pour vocation de :

- Garantir l'adéquation charge / capacité à court terme,
- Piloter le lancement des ordres de fabrication,
- Piloter le lancement des ordres d'achat,
- Réserver les composants,
- Etablir les listes à servir,
- Calculer les charges,
- Lisser la charge, ,
- Lancer les Ordres de Fabrication et des Ordres d'Achat
- Optimiser les flux très court terme,
- Gérer les aléas,
- Gérer les priorités
- Visualiser les OF et les moyens de production,

# L'ordonnancement



## ❑ OBJECTIFS :

- Respecter les contraintes de planification afin de garantir la qualité de service au client
- Optimiser l'utilisation des ressources
- Maîtriser le niveau d'encours dans les ateliers

# L'ordonnancement

Décrit

L'exécution de **taches**

Et l'affectation de **ressources** au  
cours du temps

Compte tenu de **contraintes** et de  
manière à satisfaire des **objectifs**

- **Ressource** : moyen socio-technique disponible en quantité limitée (capacité) , renouvelable ou consommable
- **Tache**: (ou activité ou opération)  
Entité élémentaire caractérisée par une date de début et/ou de fin, une durée, et une intensité de ressources
- **Contrainte**: restriction sur l'exécution des tâches de temps ou de ressource
- **Objectif** :  
Optimalité vis-à-vis de critères

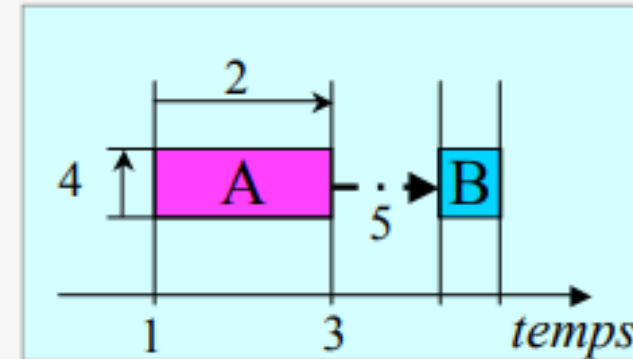
# L'ordonnancement

## ■ Etant donné :

- un ensemble de tâches
- un ensemble de ressources

## ■ Déterminer :

- **quand les tâches sont exécutées ?**  
début (1), durée (2), fin (3)
- **comment les ressources sont affectées aux tâches ?**  
nature et intensité (4), séquencement (5)



## ■ Applications

- organisation du travail dans un atelier de fabrication
- gestion de projet
- confection d'emplois du temps
- conception d'algorithmes de gestion (informatique, spatial, ...)

# Première classification : Ordonnancement de projets versus ateliers

## Projets

### Ressources :

Considérées comme *illimitées* pour les problèmes les plus simples.

### Dépendances des opérations :

Un *graphe de précedence* sans circuit muni d'une source et d'un puits relie les opérations pour les problèmes les plus simples.

## Ateliers

### Ressources :

*Une* ressource en un exemplaire associée à chaque opération pour les problèmes les plus simples.

### Dépendances des opérations :

Les opérations sont *indépendantes* (pas de gammes ni de contraintes de précedence pour les problèmes les plus simples).

# Ordonnancements de projet

- Ordonnancement sans contraintes de ressources :

*Ressources illimitées.*

*Graphe de précedence  
sans circuit.*

= méthode PERT/Gantt

Notions intéressantes  
de marges libres

# L'ordonnancement

- Ordonnancement sans contraintes de ressources

## Ordonnancement d'un Projet



# Ordonnancement d'un Projet

## a. Diagramme PERT

PERT: Programm Evaluation and Review Technique

C'est

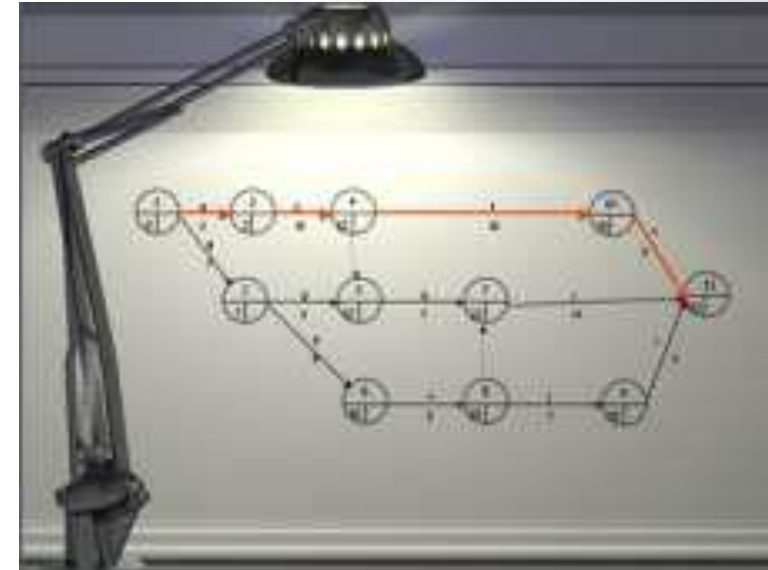


- Une technique permettant de gérer l'ordonnancement dans un projet.
- Consiste à représenter sous forme de graphe, un réseau de tâches dont l'enchaînement permet d'aboutir à l'atteinte des objectifs d'un projet.

Pour



- **Minimiser** la durée de réalisation du projet
- **Respecter** les contraintes d'**antériorités**
- **Déterminer** les **calendriers** de réalisation
- **Déterminer** les **marges** associées



# Ordonnancement d'un Projet

## a. Diagramme PERT

### Historique:

→ Elle a été conçue par la marine américaine ([Années 1950](#)) afin de permettre de coordonner les travaux de plusieurs milliers de personnes pour aboutir à la réalisation de missiles à ogives nucléaires POLARIS.

→ Le projet POLARIS représentait entre autres :

- 250 fournisseurs,
- 9 000 sous-traitants,
- 7 ans de réalisation.

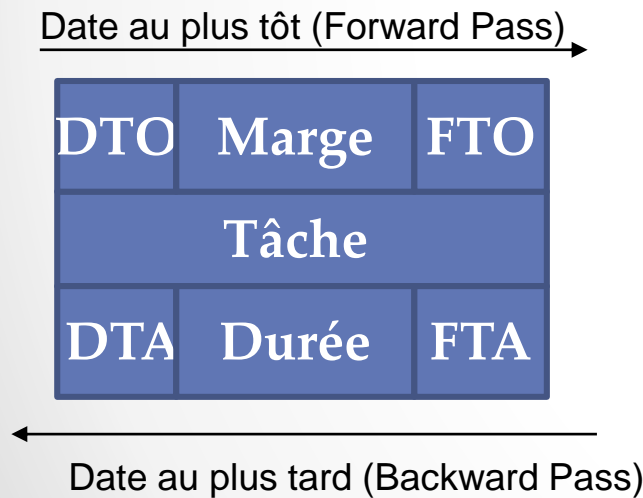
→ L'utilisation du [PERT](#) a permis de ramener la durée globale de réalisation du projet de [7 à 4 ans](#).



# Ordonnancement d'un Projet

## a. Diagramme PERT

- ➔ Un graphe orienté dont les sommets représentent les tâches, et les arcs représentent les contraintes d'antériorité, et sont donc orientés vers la ou les tâches postérieures.
- ➔ Les sommets sont représentés en général par des rectangles comprenant les dates de début et de fin au plus tôt et au plus tard ainsi que la référence et la durée de la tâche.



**DTO** : Début au plus tôt,

**FTO** : Fin au plus tôt [  $\text{FTO} = (\text{DTO} + \text{Durée}) - 1$  ]\*

**DTA** : Début au plus tard [  $\text{DTA} = (\text{FTA} - \text{Durée}) + 1$  ]

**FTA** : Fin au plus tard,

**Marge Total** :  $\text{FTA} - \text{FTO}$ .

- +1 et -1 prise en compte des début et fin de journée
- Chaque DTO est initialisé à 1

# Ordonnancement d'un Projet

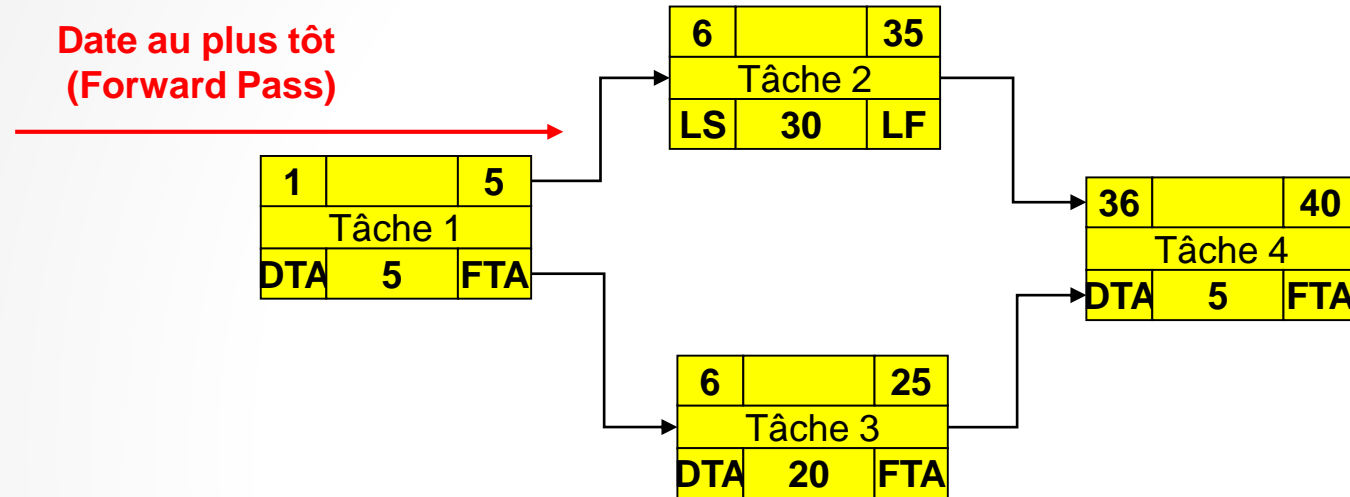
## a. Diagramme PERT

### Exemple:

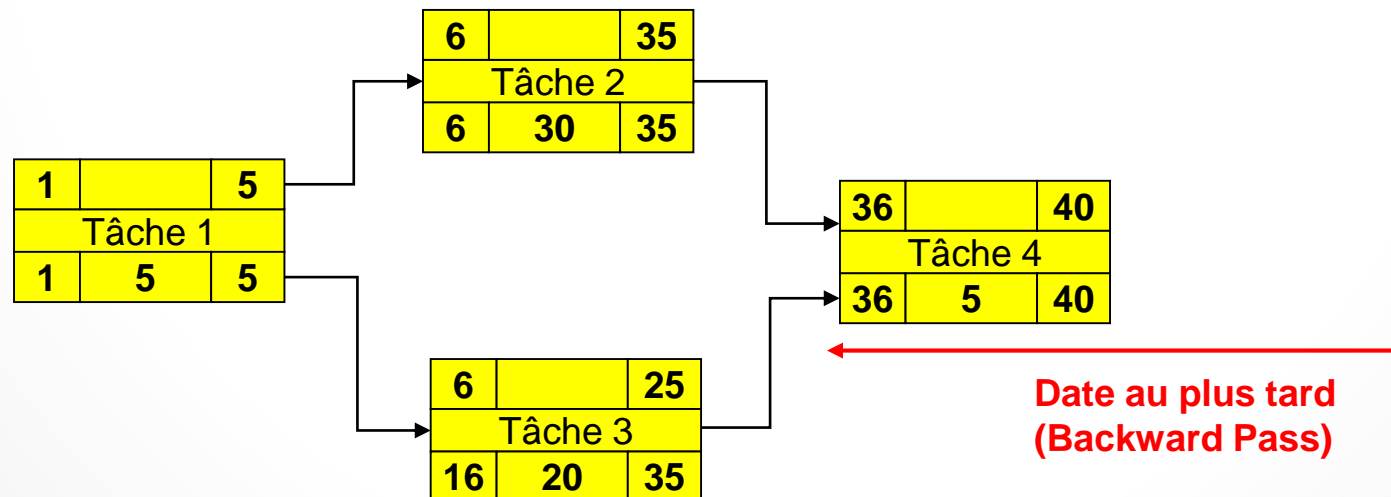
N°	Tâche	Durée	Prédécesseur
1	Déterminer les spécifications du système	5	-
2	Acheter le matériel	30	1
3	Acheter le logiciel	20	1
4	Installer le système	5	2 - 3

## Corrigé:

### 1-Calculs directs au plus tôt

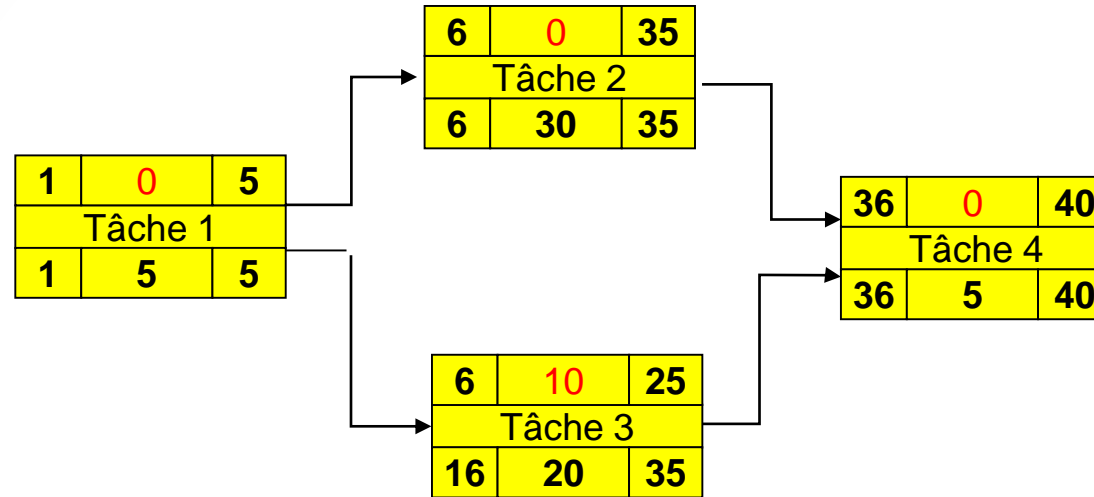


### 2-Calculs à rebours

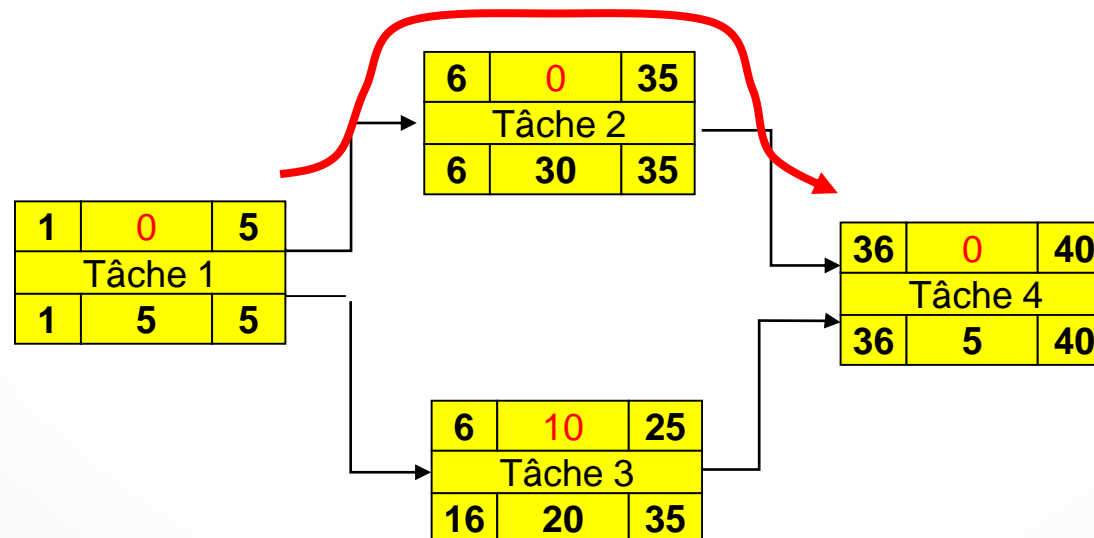


### Corrigé:

- Calculs des marges (appartient toujours au chef de projet qui peut identifier où cette marge peut être utilisée)



- Chemin critique (en suivant le chemin des tâches sans marge). Un projet peut avoir plus d'un chemin critique



# Ordonnancement d'un Projet

## a. Diagramme PERT

Tache Critique:  $\text{Date début plus tôt} = \text{Date début plus tard}$

Chemin critique: tout chemin qui ne comporte que des tâches critiques.

Remarque importante: toute tâche critique est à surveiller de très près, car tout retard sur son démarrage entraîne absolument un retard sur la fin du projet.

# Ordonnancement d'un Projet

## a. Diagramme PERT

### Exercice:

Code de l'activité	Prédécesseur(s)	Durée
1	---	5
2	---	10
3	1, 2	5
4	3	15
5	2	10
6	3	5
7	5	5
8	7	3

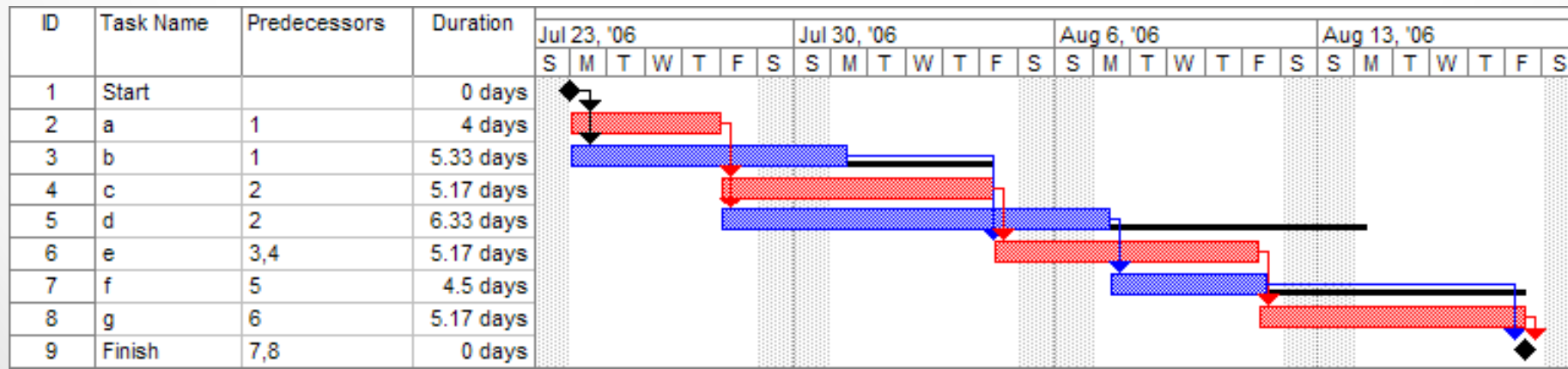


- ✓ Déterminez la durée minimale de réalisation du projet
- ✓ Déterminez le chemin Critique

# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

- ➔ Il permet de représenter la durée d'un projet, grâce à un diagramme à barres.
- ➔ Permet de renseigner et de situer dans le temps les étapes, les tâches, et les ressources du projet
- ➔ Ainsi, on représente sur un axe les différentes tâches à effectuer (sur l'axe des ordonnées par exemple), puis on représente la durée des tâches sur l'autre axe (l'axe des abscisses).



# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

➔ Le chemin Critique:

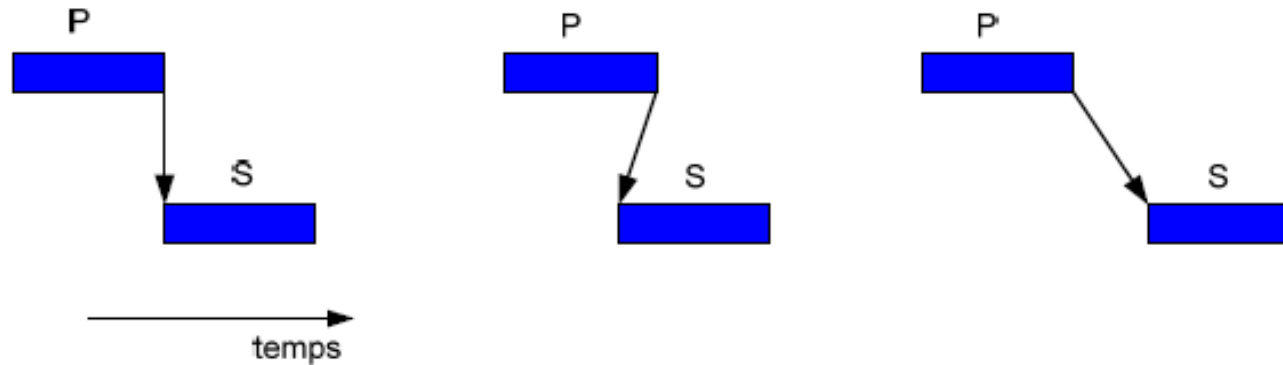
Lire le graphique en sens inverse pour représenter le chemin critique

# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

### Les 4 types de liaisons:

- a- liaison de type fin à début (FD)



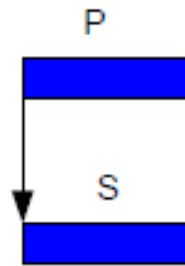
La tâche S (le successeur) peut débuter lorsque la tâche P (le prédécesseur) est terminée.

# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

### Les 4 types de liaisons:

- b- liaison de type début à début (DD)



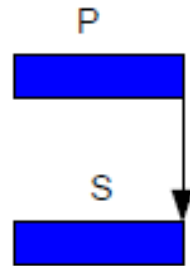
La tâche S (le successeur) peut débuter lorsque la tâche P (le prédécesseur) est commencée.

# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

### Les 4 types de liaisons:

- c- liaison de type fin à fin (FF)



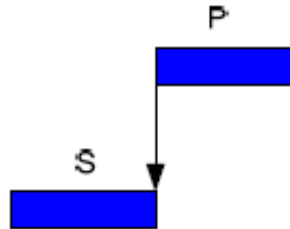
La tâche S (le successeur) peut se terminer lorsque la tâche P (le prédécesseur) est terminée.

# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

### Les 4 types de liaisons:

- d- liaison de type début à fin (DF)



La tâche S (le successeur) peut se terminer lorsque la tâche P (le prédécesseur) est commencée.

# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

### Exercice1 :

Dans le tableau suivant : lister les tâches, estimer les durées, identifier l'ordre dans lequel les tâches doivent être faites et déterminer le chemin critique :

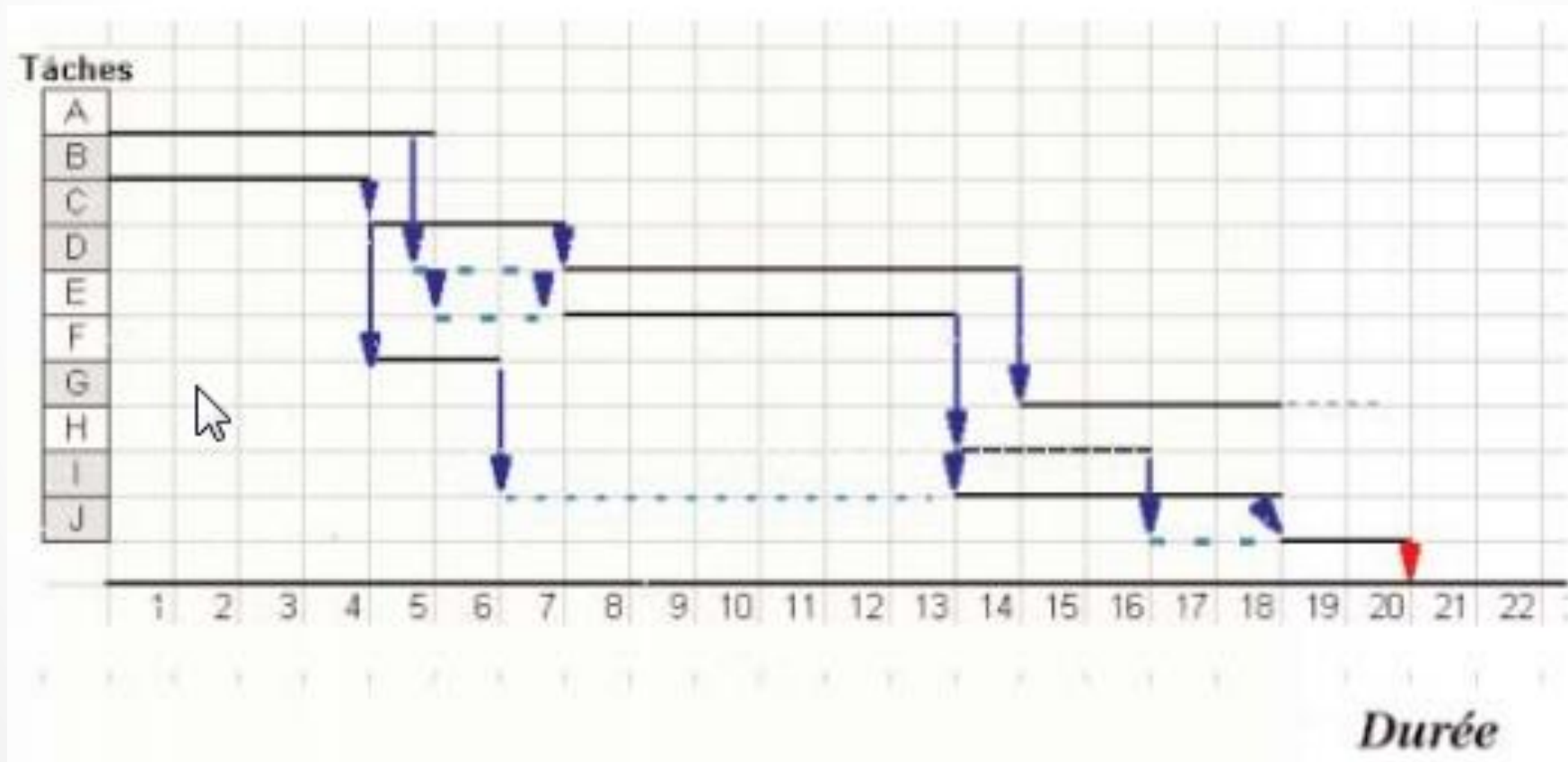
Tâches	Durée	Tâches précédentes
A	5	
B	4	
C	3	B
D	7	A C
E	6	A C
F	2	B
G	4	D
H	3	E
I	5	E F
J	2	H I

# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

### Réponse :

Dessiner chaque tâche en respectant les contraintes antérieures et en montrant les marges de manœuvre

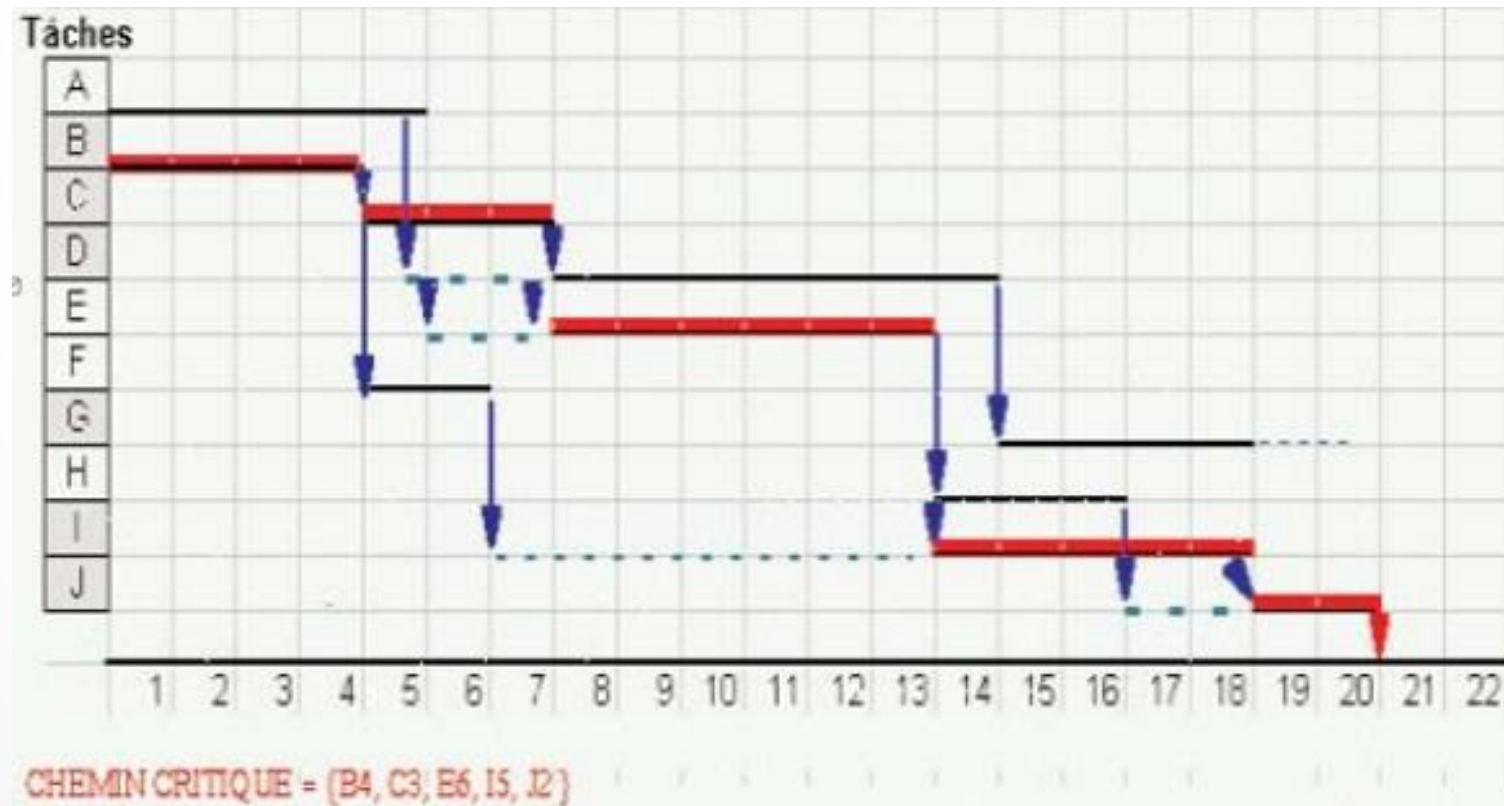


# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

### Réponse :

➔ Pour retrouver le chemin critique il faut lire le graphique en sens inverse et inclure les tâches qui sont immédiatement derrière.



# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

### Exercice 2 :

#### 1 Taches

- A : choisir le menu (30 min)
- B : acheter les ingrédients (90 min)
- C : préparer l'apéritif (30 min)
- D : nettoyer la table (10 min)
- E : mettre la table (10 min)
- F : préparer les ingrédients (30 min)
- G : cuisiner les plats (60 min)
- H : servir le repas (10 min)

#### 2 Contraintes

- B doit être après A
- C et F doivent être après B
- E doit être après D
- G doit être après F
- H doit être après C, G et E

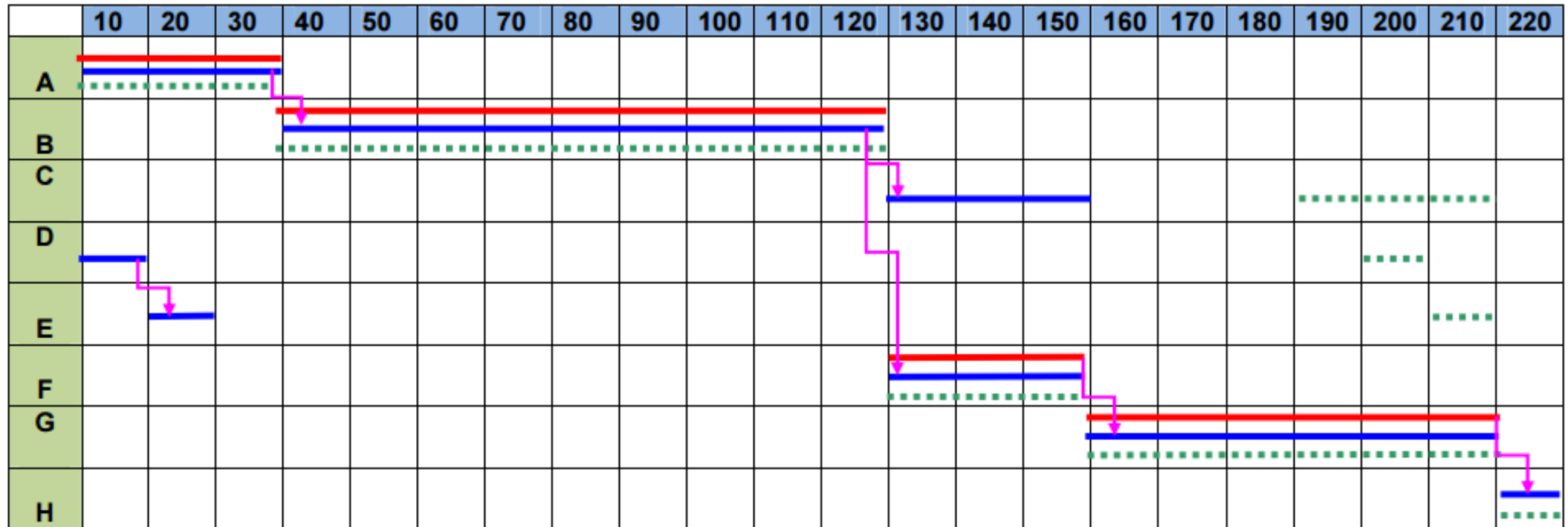
	Durée	antécédent	successeur
A	30	-	B
B	90	A	C-F
C	30	B	H
D	10	-	E
E	10	D	H
F	30	B	G
G	60	F	H
H	10	C-G-E	-

1. Construire le planning GANTT
2. Déterminez le chemin critique

# Ordonnancement d'un Projet

## b. Diagramme GANTT

Réponse :



# L'ordonnancement

- Ordonnancement avec contraintes de ressources

## *Ordonnancement d'atelier*

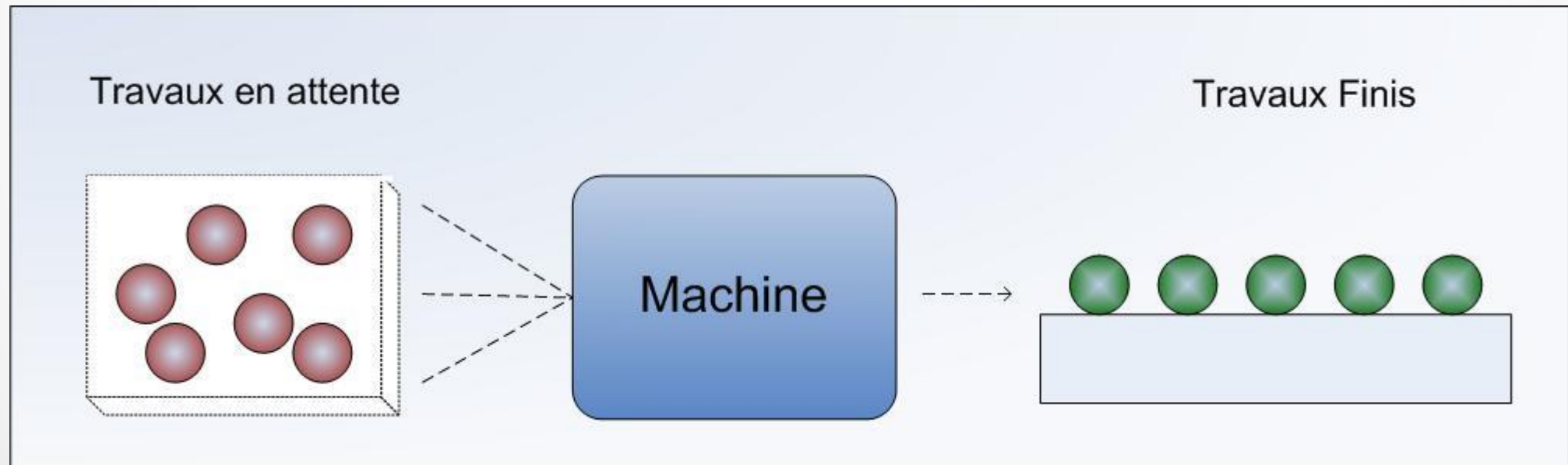
# Ordonnancement dans les différents types d'ateliers manufacturiers

➔ Une classification très répandue des ateliers, du point de vue ordonnancement, est basée sur les différentes configurations des machines. Les modèles les plus connus sont:

- Machine unique
- Machines parallèles
- Ateliers à cheminement unique (Flow Shop)
- Ateliers à cheminements multiples (Job Shop)

# 1. Ordonnancements d'atelier à une machine (Machine Unique)

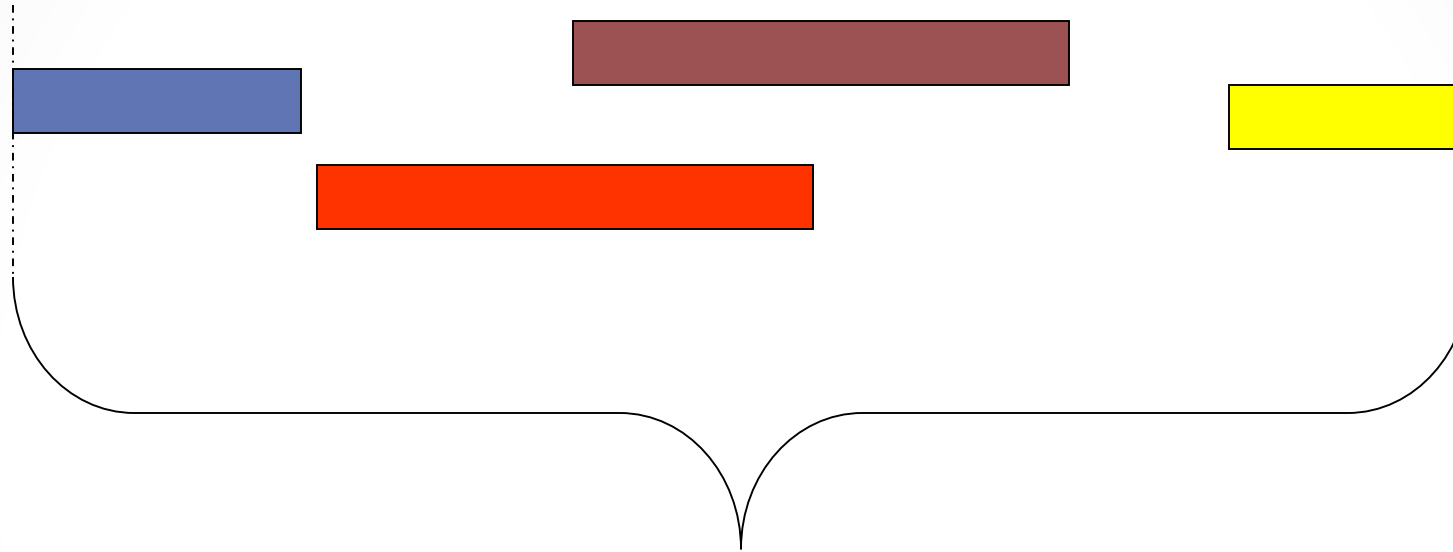
- C'est le cas très particulier où il n'y a pas du tout de contraintes de précédence et où on a seulement une ressource qui existe en un seul exemplaire.
- Dans ce cas, l'ensemble des tâches à réaliser est fait par une seule machine. Les tâches alors sont composées d'une seule opération qui nécessite la même machine.



# 1. Ordonnancements d'atelier à une machine (Machine Unique)

## ➤ Description du problème de base à une machine

- Un ensemble de  $N$  produits doit être traité sur une machine.
- La durée de traitement du produit  $i$  est  $T(i)$ . (ou  $p(i)$  processing time)
- $t(i)$  est donc la durée de l'opération du produit  $i$  sur la machine.
- Les produits sont disponibles à partir de l'instant 0.
- Les produits sont indépendants les uns des autres (pas de contraintes de précédence).
- La machine est toujours disponible.
- La machine ne peut traiter qu'un seul produit à la fois



Minimisation de la durée totale ou  $C_{\max}$  ou Makespan

*Le critère le plus utilisé.*

# 1. Ordonnancements d'atelier à une machine

**Exemple Introductif :** On illustre la méthode par le biais de l'exemple suivant : on souhaite effectuer 5 tâches sur une machine A.

Le tableau ci-dessous présente les différentes tâches ainsi que leur temps opératoire en minutes.

Tâche $i$	1	2	3	4	5
Temps opératoire $T_i$	50	150	80	200	30

Données: Exemple 1

Il s'agit de déterminer l'ordre dans lequel on va effectuer ces différentes tâches. Il est clair que, quel que soit l'ordre choisi, le temps opératoire total (ou somme des temps opératoires **Makespan**) est le même. Il faut donc définir un autre critère entre tous les ordonnancements possibles. Un exemple d'ordonnement est donné ci-dessous :

# 1. Ordonnancements d'atelier à une machine

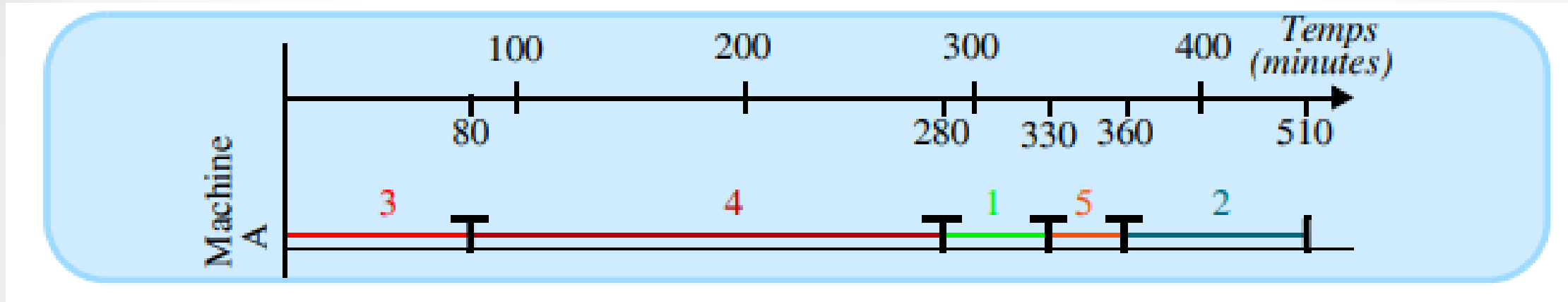
- Solution Possible

Ordre de passage (j)	1	2	3	4	5
Tache programmée (i)	3	4	1	5	2
Temps d'exécution $T_j$	80	200	50	30	150
Date $A_j$ de fin de la tache j	80	280	330	360	510

## Ordonnancement 1 : Exemple 1

# 1. Ordonnancements d'atelier à une machine

**Le diagramme de Gantt :** Le diagramme de Gantt représente une technique de visualisation d'un ordonnancement



Le diagramme de Gantt permet de visualiser a la fois :

- l'utilisation des moyens productifs,
- l'avancement de l'exécution des tâches.

Une ligne horizontale illustre l'évolution du temps. Pour chaque moyen productif (en l'occurrence la machine A), on trace une ligne horizontale au dessus de la ligne du temps. Chaque tâche à effectuer sur la machine A est représentée par un segment horizontal dont la longueur est proportionnelle à la durée d'exécution de la tâche. Le numéro de la tâche sera indiqué au dessus du segment.

→ Dans exemple:  $5! = 120$  ordonnancements possibles

le nombre de combinaisons possibles d'ordonnancer 5 taches (  $n!$  façons différentes de permuter  $n$  objets )

# 1. Ordonnancements d'atelier à une machine

- On a vu précédemment que tous les ordonnancements possibles conduisent au même temps opératoire total. Dans l'exemple 1, l'exécution des 5 tâches nécessite 510 Minutes. Alors quel ordonnancement doit-on choisir ?

## → Critère: Date d'achèvement:

- On note  $A_j$  le temps d'achèvement de la tâche programmée en position  $j$ . Le temps d'achèvement d'une tâche est la somme des temps d'exécution de la tâche avec ceux des tâches précédentes :

où  $T_i$  est le temps opératoire de la tâche  $i$ .

$$A_j = \sum_{i=1}^j T_i = T_1 + T_2 + \dots + T_j$$

# 1. Ordonnancements d'atelier à une machine

- Le calcul des différents temps d'achèvement des tâches est donné dans le tableau ci-dessous :

Ordre ( $j$ )	1	2	3	4	5
$T_j$	80	200	50	30	150
$A_j$	80	280	330	360	510

- Le temps d'achèvement moyen vaut alors :

$$\bar{A} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^n A_j = \frac{80 + 280 + 330 + 360 + 510}{5} = 312.$$

# 1. Ordonnancements d'atelier à une machine

- Ce temps d'achèvement moyen peut se réécrire en détails comme suit :

$$\begin{aligned}\bar{A} &= (80 \\ &\quad + 80 + 200 \\ &\quad + 80 + 200 + 50 \\ &\quad + 80 + 200 + 50 + 30 \\ &\quad + 80 + 200 + 50 + 30 + 150)/5 \\ &= (5 \times 80 + 4 \times 200 + 3 \times 50 + 1 \times 30)/5\end{aligned}$$

- Il s'agit donc d'une somme pondérée des temps opératoires, chaque temps opératoire étant pondéré par un facteur d'autant plus grand qu'il se trouve exécuté plus tôt dans l'ordonnancement

# 1. Ordonnancements d'atelier à une machine

La règle d'ordonnancement qui minimise le temps d'achèvement moyen est celle du Temps Opérateur Minimum (règle **T.O.M.**) qui consiste à exécuter les tâches par ordre croissant de durée :

$$T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_j \leq \dots \leq T_n$$

L'application de cette règle donne l'ordonnancement illustré dans le tableau ci-dessous

Ordre ( $j$ )	1	2	3	4	5
Tâches ( $i$ )	5	1	3	2	4
$T_j$	30	50	80	150	200
$A_j$	30	80	160	310	510

Ordonnancement 2 : Exemples 1

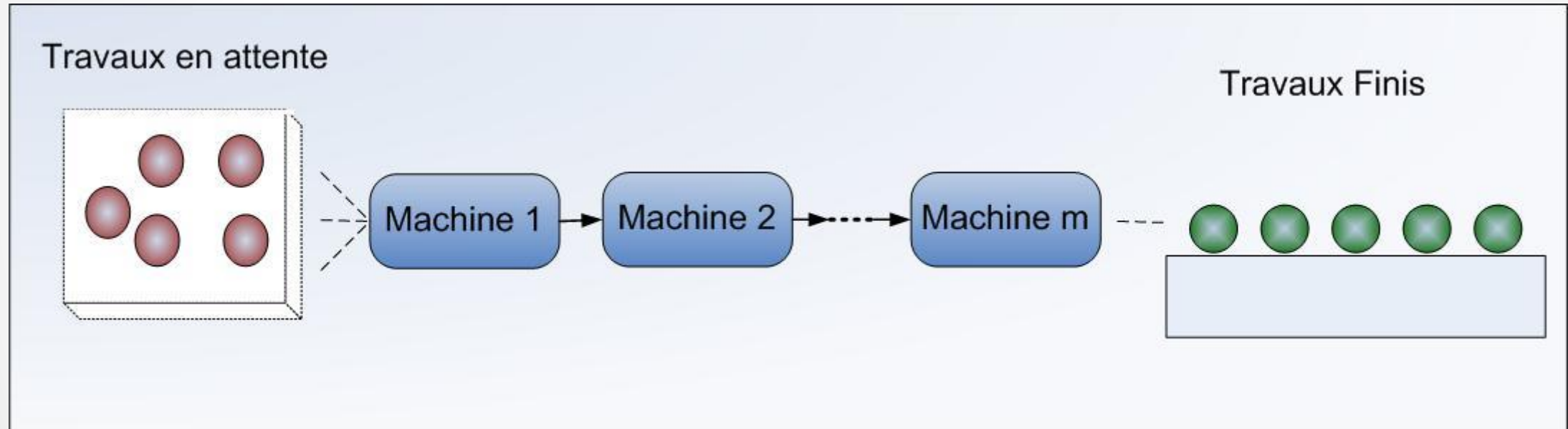
$$\bar{A} = 218$$

Au lieu de 312

## Remarque:

- On peut montrer que la règle T.O.M. revient à minimiser le retard moyen, le retard d'une tâche étant la différence entre le moment où la tâche est terminée et celui où elle aurait été terminée si l'on avait commencé en premier lieu.

## 2. Ateliers à cheminement unique (Flow Shop)



# Implantation linéaire (Flow Shop ): caractéristiques

- Connue aussi sous implantation flow shop, produit, en ligne, monogamme;
- Le “flow shop” est caractérisé par une faible variété de produits et un volume de production important;
- La production en atelier monogamme se prête très bien pour l’aménagement de lignes d’assemblage;
- L’aménagement linéaire sous-entend que les équipements et postes de travail sont physiquement disposés selon les gammes de fabrication

# Implantation linéaire : caractéristiques

- Un atelier à cheminement unique est un atelier où le processus d'élaboration de produits est dit « linéaire », c'est-à-dire lorsque les étapes de transformation sont identiques pour tous les produits fabriqués.
- Les machines sont implantées en fonction de leur séquence d'intervention dans la gamme de production.
- L'un des objectifs principaux dans le cas d'atelier à cheminement unique est de trouver une séquence des tâches en main qui respecte un ensemble de contraintes et qui minimise le temps total de production. Parmi les caractéristiques d'un problème de cette catégorie :
- il existe au minimum  $n!$  différentes solutions où  $n$  est le nombre de travaux à réaliser.

Notons que  $n! = n \times (n-1) \times (n-2) \times \dots \times 1$  ;

- le problème est NP-difficile à l'exception des versions avec **deux machines et certains cas particuliers avec trois machines** ;
- une grande productivité mais une faible flexibilité.

## a. Ordonnancement avec deux centres de production

- On considère le cas où toutes les tâches sont à exécuter sur le premier centre puis sur le second. Soient  $t_{iA}$  et  $t_{iB}$  les temps d'exécution de la tâche  $i$  sur les machines (ou centres de production) A et B respectivement.
- ➔ On va utiliser comme critère d'ordonnancement la minimisation du temps total d'exécution des tâches sur les deux Machines.

**Exemple1:** Supposons que cinq tâches soient à exécuter sur les machines A puis B. Les temps opératoires en minutes sont repris ci-dessous :

Tâches ( $i$ )	1	2	3	4	5
$t_{i,A}$	50	150	80	200	30
$t_{i,B}$	60	50	150	70	200

Données- Exemple 1

## a. Ordonnancement avec deux centres de production

- Durant l'exécution de la première tâche sur A, la machine B "dort". On a donc intérêt à mettre en tête la tâche de temps  $t_{iA}$  le plus faible. De façon similaire, lors de l'exécution de la dernière tâche sur la machine B, la machine A dort. On a donc intérêt à mettre en fin la tâche de durée d'exécution  $t_{iB}$  minimum.
- ➔ En se basant sur ces deux observations, l'algorithme Johnson calcule l'ordonnancement minimisant le temps total d'exécution des tâches.

- **Algorithme 1: Algorithme de Johnson**

**A → B**

1. *Rechercher la tâche  $i$  de temps d'exécution  $t_i$  minimum.*
2. *Si  $m = A$ , placer cette tâche à la première place disponible.*  
*Si  $m = B$ , placer cette tâche à la dernière place disponible.*
3. *Supprimer la tâche  $i$  des tâches encore à programmer, retour en 1.*

## Appliquons cet algorithme à l'exemple 1:

- la tâche 5 ( $t_{5A} = 30$ ) est mise en première position

1	2	3	4	5
5				

- Puis la tâche 1 ( $t_{1A} = 50$ ) est mise en deuxième position

1	2	3	4	5
5	1			

- Puis la tâche 2 ( $t_{2B} = 50$ ) est mise en dernière position

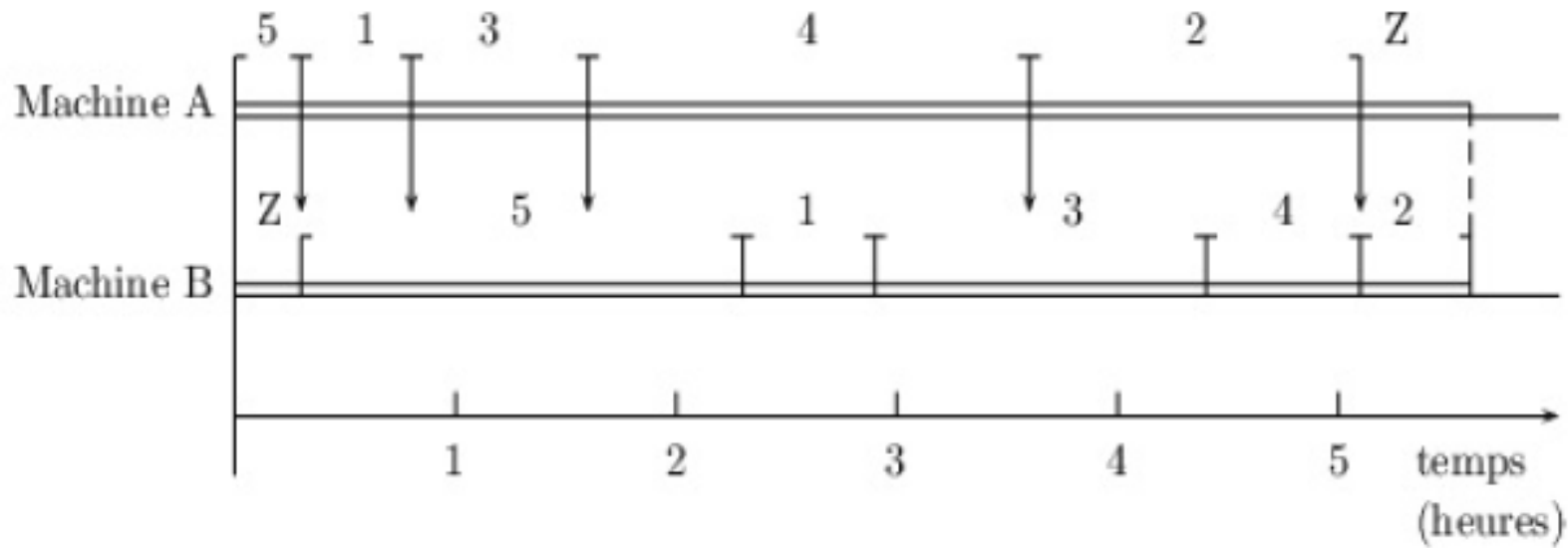
1	2	3	4	5
5	1			2

- Puis la tâche 4 ( $t_{2B} = 70$ ) est mise en avant-dernière position

1	2	3	4	5
5	1		4	2

- Puis la tâche 3 est mise à la dernière place disponible.

1	2	3	4	5
5	1	3	4	2



**Figure: Diagramme de Gantt- Exemple 1**

L'ordonnancement obtenu est optimal et est illustré à la figure suivante. Le passage d'une tâche d'une machine à l'autre est visualisé à l'aide d'une flèche verticale. On notera qu'une machine au repos est indiquée par un Z.

## b. Ordonnancement avec Trois centres de production

- L'algorithme de Johnson ne s'applique qu'en présence de deux machines. Cependant, le cas de trois machines peut se ramener au cas de deux machines si la machine B est **complètement dominée** par la machine A ou par la machine C
- C'est le cas où **le centre de production B**, qui, techniquement, doit intervenir avant le centre de production C et après le centre de production A, **est complètement dominé** par l'un ou l'autre de ces 2 centres de production, c'est-à-dire que le plus grand temps d'exécution  $t_{iB}$  est plus faible (ou égal) que le plus petit temps d'exécution observé sur le centre de production qui le domine (étant entendu qu'il est possible que le centre de production B soit dominé par les deux centres de production). C'est-à-dire si l'on se trouve dans le cas où:

soit dans le cas où

$$\text{minimum } t_{iA} \geq \text{maximum } t_{iB}$$

$$\text{minimum } t_{iC} \geq \text{maximum } t_{iB}$$

## b. Ordonnancement avec Trois centres de production

Lorsque ce cas se produit, on reformule le problème en un problème à 2 centres fictifs de production, le premier groupant les centres de production A et B en un centre de production virtuel noté {AB} (avec un temps opératoire  $ti_{AB} = ti_A + ti_B$ ) et le second groupant les centres de production B et C en un centre de production virtuel noté {BC} (avec un temps opératoire  $ti_{BC} = ti_B + ti_C$ ).

## b. Ordonnancement avec Trois centres de production

### Exemple:

Tâches	1	2	3	4	5	6	7
Assemblage	20	12	19	16	14	12	17
Inspection	4	1	9	12	5	7	8
Expédition	7	11	4	18	18	3	6

Données d'exemple à 3 Machines

- On constate que les conditions d'application énoncées précédemment sont vérifiées. Il est à remarquer que les deux conditions ne doivent pas être vérifiées simultanément. Dans l'exemple, la seconde condition n'est pas vérifiée.
- On reformule le problème en un problème à deux machines. Dans le cadre de l'exemple, la première regroupe les machines A et B (puisque l'assemblage domine l'inspection) avec  $t_{iAB} = t_{iA} + t_{iB}$  et la seconde regroupe les machines B et C (l'expédition domine l'assemblage) avec  $t_{iBC} = t_{iB} + t_{iC}$  ce qui donne les nouveaux temps opératoires:

## b. Ordonnancement avec Trois centres de production

### Exemple:

Tâches	1	2	3	4	5	6	7
Assemblage + Inspection	24	13	28	28	19	19	25
Inspection + Expédition	11	12	13	30	23	10	14

### Reformulation du Problème

On applique alors l'algorithme de Johnson à ce problème à deux machines pour déterminer l'ordonnancement optimal.

Place	1	2	3	4	5	6	7
Tâche	5	4	7	3	2	1	6

### Ordonnancement

## b. Ordonnancement avec Trois centres de production

### Exemple: Gantt

- On peut alors tracer le diagramme de Gantt correspondant au problème original, c'est-à-dire celui avec trois machines

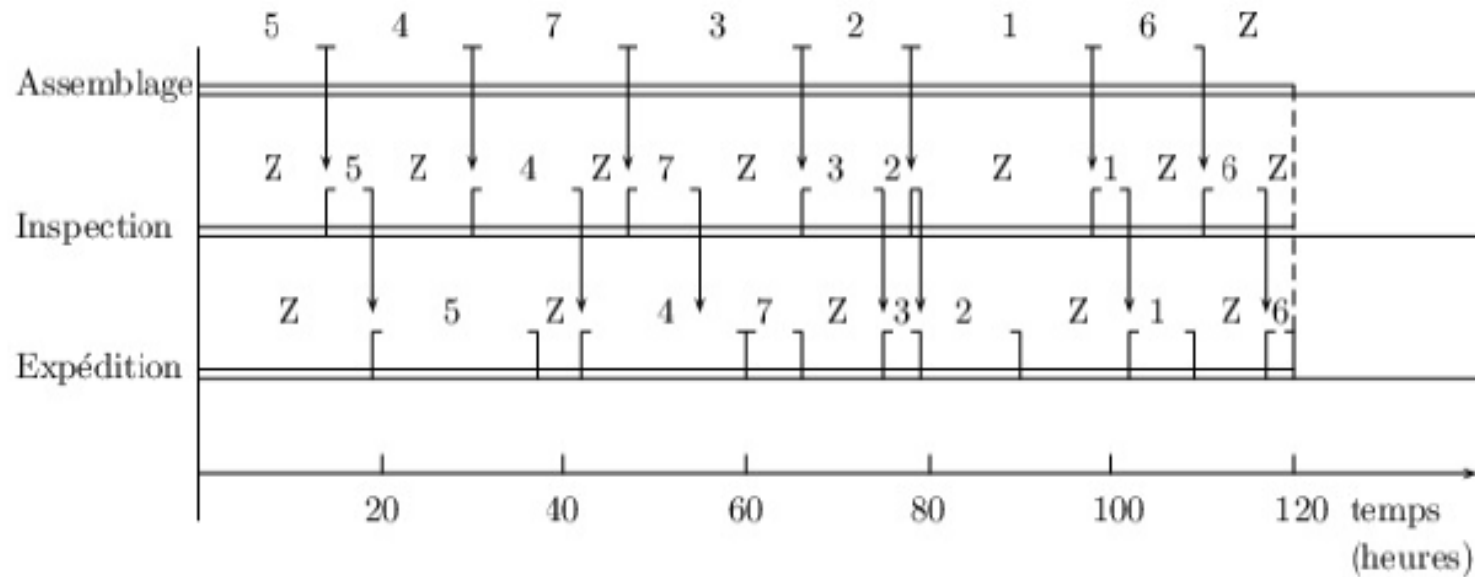


Diagramme de Gantt pour l'Exemple de 3 Machines

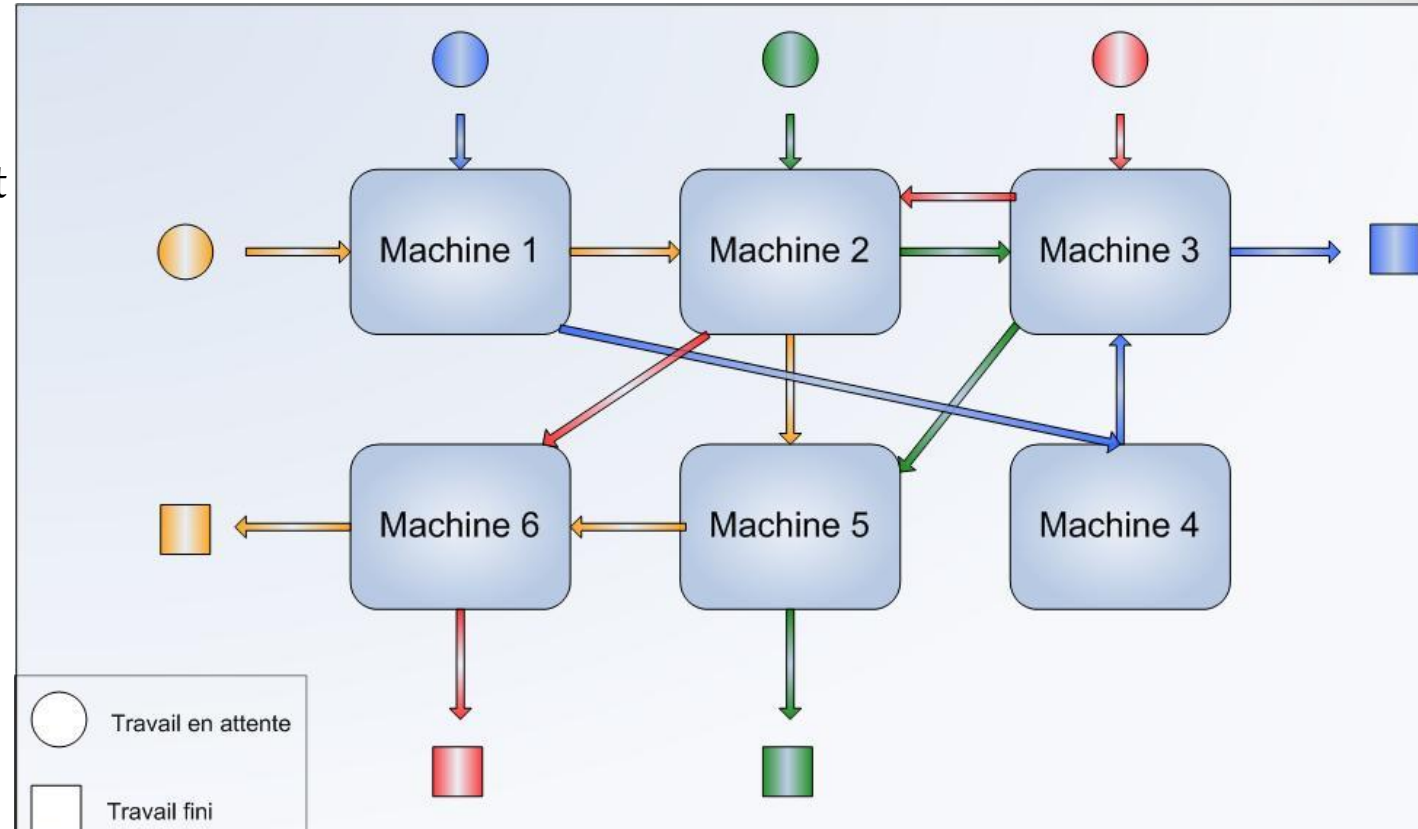
### 3. Ordonnancements d'atelier à cheminements multiples (Job Shop)

#### Ordonnancement en ateliers spécialisés (Job Shop)

- On parle **d'atelier à cheminements multiples** ou d'ateliers spécialisés (Implantation Fonctionnelle) lorsque l'ensemble des équipements nécessaires pour assurer une fonction déterminée sont rassemblés dans un même atelier. Le problème de gestion quotidienne est de déterminer l'ordre d'exécution d'un certain nombre de tâches, la réalisation d'une tâche nécessitant le passage sur une ou plusieurs machines.

## Implantation Fonctionnelle (Job Shop) : Caractéristiques

- Connue aussi sous implantation job shop, processus, sections homogènes , multi gamme
- Implantation par technologie, par métier : Les équipements et les installations servant à la même fonction sont regroupés
- Le “job shop” est caractérisé par une variété de produits importantes et un volume de production faible pour chaque produit;
- Flux multidirectionnel et variable
- Travailleurs spécialisés par type d'équipement



### 3. Ordonnements d'atelier à cheminements multiples (Job Shop)

#### Implantation Fonctionnelle (Job Shop) : Caractéristiques

Parmi les caractéristiques d'un problème d'ordonnement dans un atelier à cheminements multiples :

- le nombre de solutions possibles est de l'ordre de  $(n!)m$ , où  $n$  est le nombre de tâches à effectuer et  $m$  le nombre de machines.
- le problème est NP-difficile et est considéré parmi les problèmes les plus difficiles à traiter

### 3. Ordonnancements d'atelier à cheminements multiples (Job Shop)

#### a. Cas de deux Machines:

- Jackson a montré comment adapter l'algorithme de Johnson pour tenir compte de la possibilité d'avoir des tâches ne s'effectuant pas toutes dans le même ordre

### 3. Ordonnancements d'atelier à cheminements multiples (Job Shop)

#### a. Cas de deux Machines:

Il faut tout d'abord effectuer une partition de l'ensemble initial des  $n$  tâches en quatre sous-ensembles:

- l'ensemble  $\{A\}$  comprend toutes les tâches qui ne nécessitent que l'intervention du centre de production A;
- l'ensemble  $\{B\}$  comprend toutes les tâches qui ne nécessitent que l'intervention du centre de production B;
- l'ensemble  $\{AB\}$  comprend toutes les tâches qui nécessitent de passer d'abord par le centre de production A avant de passer par le centre de production B;
- l'ensemble  $\{BA\}$  comprend toutes les tâches qui nécessitent de passer d'abord par le centre de production B avant de passer par le centre de production A.

### 3. Ordonnancements d'atelier à cheminements multiples (Job Shop)

#### a. Cas de deux Machines:

- On définit tout d'abord l'ordonnancement optimal sur le sous-ensemble  $\{AB\}$  à l'aide de l'algorithme de Johnson. Puis on fait de même pour le sous-ensemble  $\{BA\}$ .
- Pour les sous-ensembles  $\{A\}$  et  $\{B\}$ , l'ordre de passage des tâches n'ayant aucune importance, on sélectionne une séquence arbitraire de passage des tâches dans chaque sous-ensemble. On combine les résultats obtenus dans chaque sous-ensemble de la façon suivante:

→ Centre de production A: séquence optimale du sous-ensemble  $\{AB\}$ , puis tâches du sous-ensemble  $\{A\}$ , et enfin séquence optimale du sous-ensemble  $\{BA\}$  ;

→ Centre de production B: séquence optimale du sous-ensemble  $\{BA\}$ . puis tâches du sous-ensemble  $\{B\}$ , puis séquence optimale du sous-ensemble  $\{AB\}$ .

### 3. Ordonnancements d'atelier à cheminements multiples (Job Shop)

#### a. Cas de deux Machines:

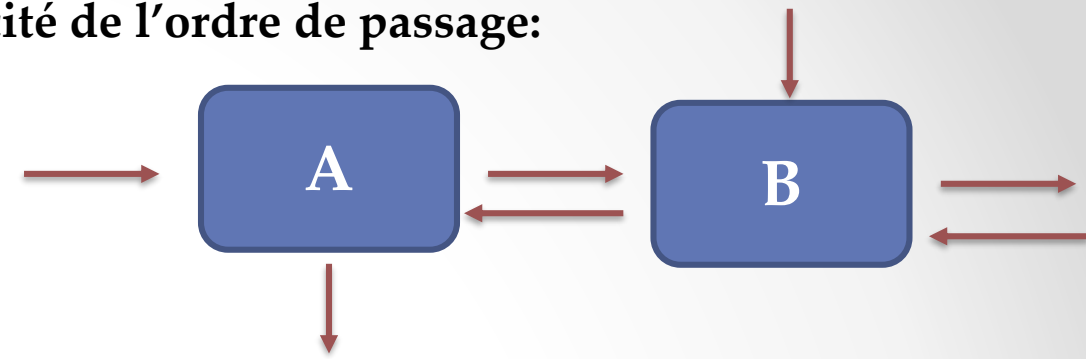
#### Algorithme de Jackson :

**Partition en 4** de l'ensemble initial

- $\{A\}$  toutes les tâches ne nécessitant que l'intervention de A
- $\{B\}$  toutes les tâches ne nécessitant que l'intervention de B
- $\{AB\}$  toutes les tâches passant par A puis B
- $\{BA\}$  toutes les tâches passant par B puis A
- ordonnancement optimal
  - algorithme de Johnson sur  $\{AB\} \Rightarrow$  séquence 1
  - algorithme de Johnson sur  $\{BA\} \Rightarrow$  séquence 2
  - ordre quelconque sur  $\{A\} \Rightarrow$  séquence 3
  - ordre quelconque sur  $\{B\} \Rightarrow$  séquence 4
  - Sur le centre A séquences 1 puis 3 puis 2
  - Sur le centre B séquences 2 puis 4 puis 1

## Non-unicité de l'ordre de passage:

### Exemple Algorithme de Jackson :



Tâches à effectuer sur A puis B

Tâche (i)	1	2	3	4	5	6
Temps d'exécution (TiA)	50	80	10	50	30	70
Temps d'exécution (TiB)	30	60	30	0	0	0

Tâches à effectuer sur B puis A

Tâche (i)	7	8	9	10	11	
Temps d'exécution (TiB)	90	20	10	40	10	
Temps d'exécution (TiA)	70	30	100	0	0	

## Exemple Algorithme de Jackson :

1. Définition des 4 sous-ensembles:
  - $A = \{4,5,6\}$
  - $B = \{10,11\}$
  - $AB = \{1,2,3\}$
  - $BA = \{7,8,9\}$
2. Calcul d'un ordonnancement pour chaque sous-ensemble:
  - A :5,4,6 *(ordre croissant des durées)*
  - B :11,10 *(ordre croissant des durées)*
  - AB :3,2,1 *(par Johnson)*
  - BA :9,8,7 *(par Johnson)*
3. Ordonnancement de chaque machine:
  - *Pour la machine A* :3,2,1,5,4,6,9,8,7
  - *Pour la machine B* :9,8,7,11,10,3,2,1