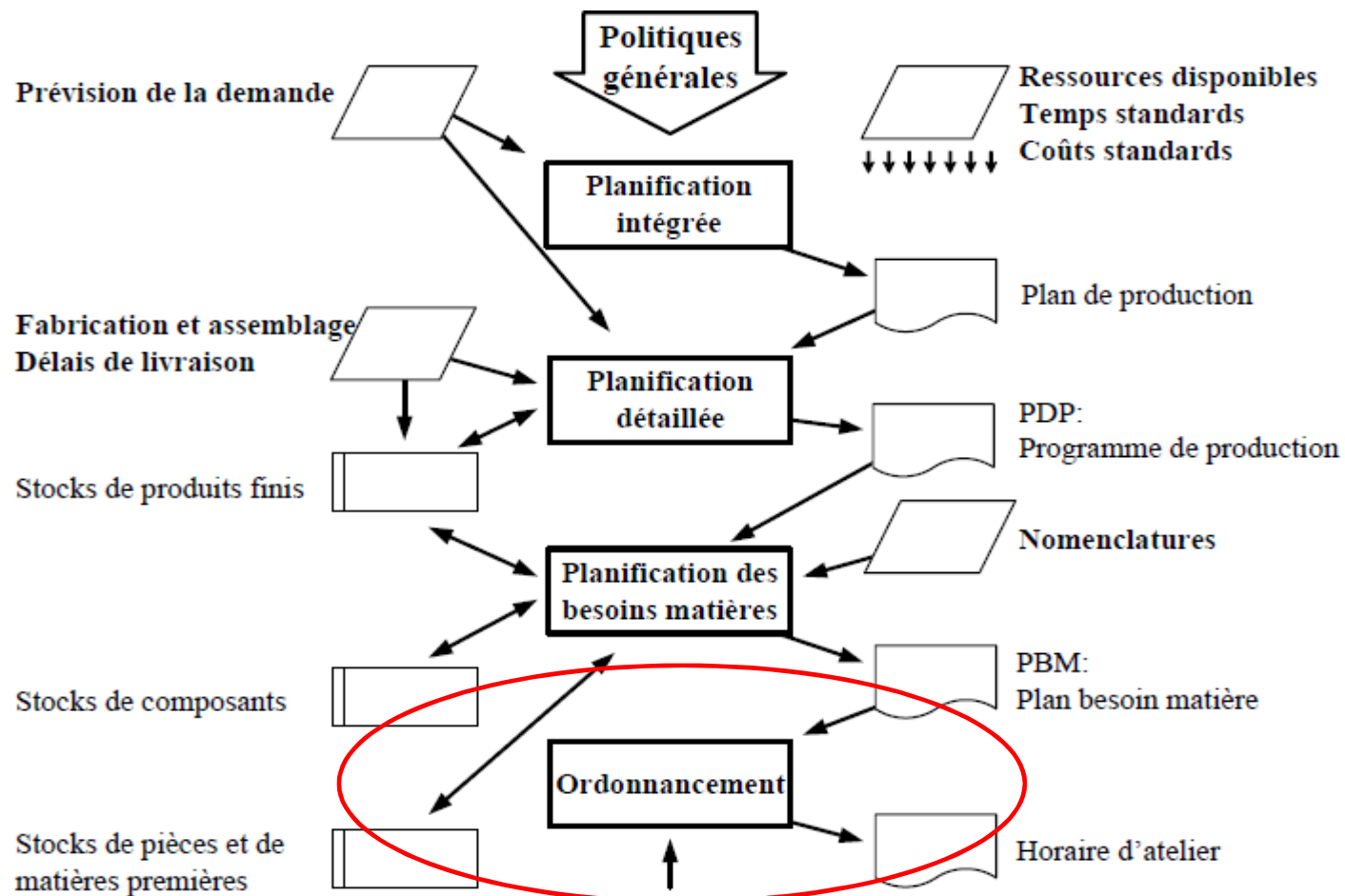


# IN 200 – Organisation Industrielle

## Cours 7 – L'ordonnancement

*par Catherine Laroche et Anis Berrada, Ing., M.Ing*

# Les principaux modules d'un système MRP II



# Qu'est-ce que l'ordonnancement?

- C'est la planification de l'exécution de la production à très court terme. L'ordonnancement est la dernière étape de la planification de la production. Elle est même souvent la seule étape dans les PME.
- C'est la détermination de l'ordre de traitement des commandes en indiquant pour chaque tâche à exécuter: où et à quel moment elle sera effectuée.

## Objectifs généraux de l'ordonnancement

- Ventes: respecter les dates promises et donc, minimiser les retards
- Production/Comptabilité: minimiser le temps dans le système
- Comptabilité: minimiser le temps supplémentaire
- Comptabilité: maximiser l'utilisation des ressources
- Entretien: respecter les calendriers de maintenance
- Direction/Comptabilité: minimiser les coûts
- Production/Comptabilité: minimiser les inventaires

## Objectifs principaux de l'ordonnancement

1. Améliorer le service aux clients en fonction des quantités à livrer, du respect des délais de livraison et de la qualité des produits.
2. Réaliser les commandes au moindre coût en réduisant les stocks et en optimisant l'utilisation des ressources
3. Tenir compte des besoins et du bien-être du personnel

# Deux approches

## Statique

- Se fait une fois par période
- Nouvelle commande = changement de l'ordonnancement

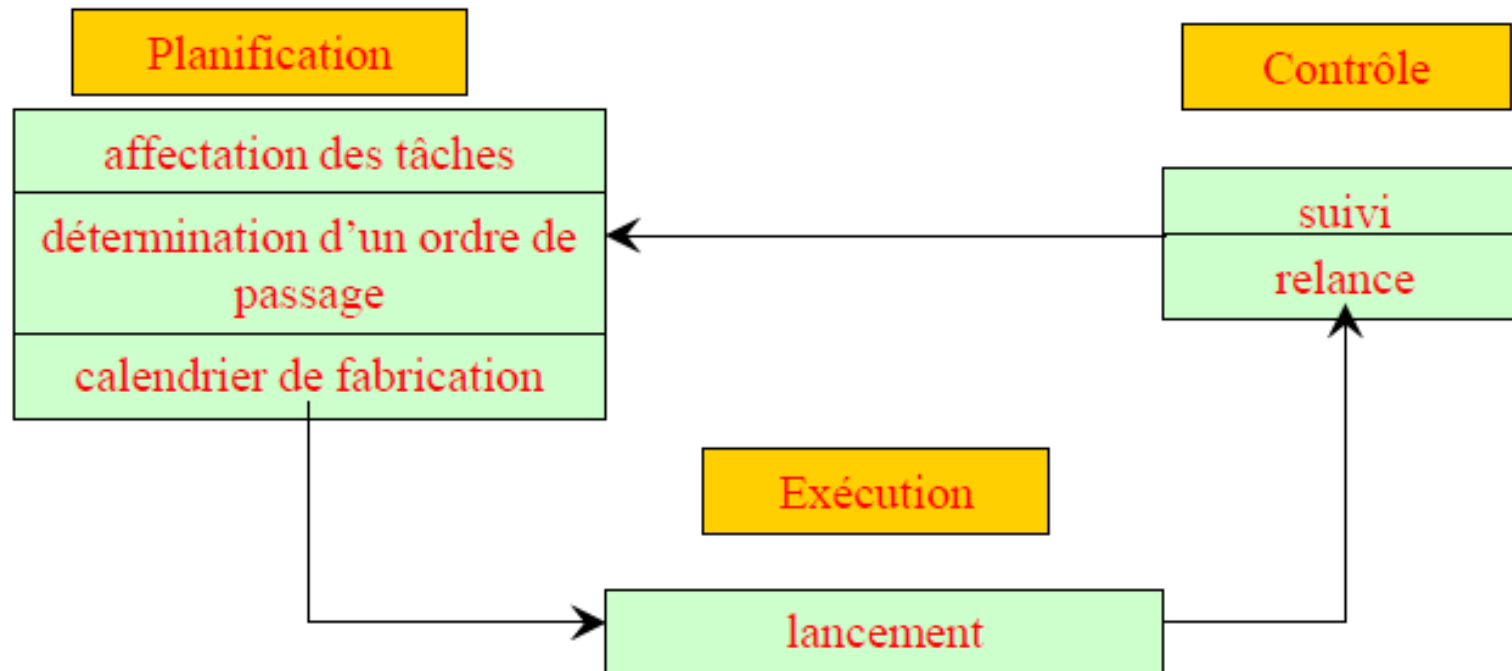
## Dynamique

- Toutes les commandes sont considérées au fur et à mesure
- Nécessite techniques + complexes (file d'attente et simulation)

# Six étapes de l'ordonnancement

- **Affectation:** répartition des commandes aux divers postes de travail i.e. qui fait quoi ?
- **Détermination d'un ordre de passage:** détermination de la séquence de traitement des commandes à chaque poste de travail: **jalonnement**
- **Calendrier de fabrication:** date et heure de lancement des opérations à chaque poste de travail
- **Lancement:** démarrage des opérations selon le calendrier
- **Suivi:** supervision de l'exécution et vérification de l'adéquation avec la planification
- **Relance:** ajustements en fonction des imprévus

## Six étapes de l'ordonnancement (suite)





## 3 classes de problème d'ordonnancement

1. Flow-shop ou atelier à cheminement unique :  
l'ordre de passage des différentes commandes sur l'ensemble des ressources disponibles est le même( Gammes opératoires identiques ) ex : chaines de production
2. Job-shop ou atelier à cheminements multiples :  
plusieurs gammes opératoires, chaque commande possède une gamme OP spécifique
3. Open-shop : les gammes OP ne sont pas spécifiées

# Le jalonnement

Pour faire le jalonnement (ou la séquence de traîtement), il faut trois choses:

- Des objectifs (critères de performance)
- Des règles de décision (règles de priorité)
- Des algorithmes (Johnson, Roy ,affectation,, etc.)

## Critères de performance les plus utilisés

Les critères de performance servent à établir dans quelle mesure le jalonnement est efficace

- Le coût total de mise en route
- La quantité de produits en cours
- Le taux d'utilisation des équipements
- Le retard moyen des commandes
- Le % de commandes en retard
- Le temps total de production

# Les règles de priorités

C'est une façon d'établir un ordre de passage des commandes  
L'utilisation de règles de priorités n'a pas l'ambition de l'optimisation mais propose des solutions "acceptables" s'appuyant sur des critères proches des objectifs du gestionnaire.

Les plus utilisées:

- PEPS: Premier entré Premier Servi (FIFO)
- TOC: Temps d'opération le plus court
- DP: Date prochaine
- PODP: Par ordre de priorité

## Hypothèses à retenir sur les règles de priorité

- La capacité des ressources est limitée
- Le nombre de commandes est connu: il n'y a pas de commandes annulées ou ajoutées
- Les temps d'opérations sont déterministes et non probabilistes
- Les temps de mise en route sont indépendants de l'ordre des commandes
- Les opérations commencées ne seront pas interrompues
- Les commandes ne sont pas scindées.

# PEPS

## FIFO: First in, First out

Par ordre d'arrivée...

- Une des pires règles quel que soit le critère de performance (car les clients dont les commandes prennent beaucoup de temps retardent les autres)
- Règle simple et d'apparence équitable

# TOC

## SPT: Short Process Time

Par ordre du temps d'opération...

- La meilleure règle pour presque tous les critères
- Ne requiert que la connaissance du temps de traitement estimé de chacune des commandes

# TOC: Avantages et désavantages

## Avantages

- Présente le plus faible retard moyen des commandes → bon niveau de service
- Présente le plus faible nombre moyen de commandes en attente → meilleur contrôle
- Le temps d'exécution total est le plus faible de toutes les règles

## Désavantages

- Néglige les commandes les plus longues → si non combinée à une autre règle, certaines commandes ne seront jamais satisfaites
- Ne s'applique pas nécessairement dans les services ex: client dans une banque
- Ne tient pas compte de la date de livraison promise



# DP

## EDD: Earliest Delivery Date

Par ordre de livraison...

- Peut être utilisée pour un poste de travail donné où l'ordre dépend de la date où la commande est requise
- Réduit les stocks de produits en cours car moins d'articles sont commencées et donc moins susceptibles d'être en retard
- Similaire au juste-à-temps

# Autres règles de priorité

- MLM: marge libre minimale, **SLACK**

Nombre de jours jusqu'à la date d'exigibilité moins la durée d'opération d'une commande

$$\text{SLACK} = \# \text{ de jour jusqu'à la date promise} - \text{durée d'opération}$$

- RC: ratio critique

Ayant le ratio critique le plus faible (le nombre de jours jusqu'à la date d'exigibilité (date de livraison) divisé par le nombre de jours de traitement

$$\text{RC} = (\text{date promise} - \text{date actuelle}) / \text{Durée d'opération}$$

# Quelques définitions

- Temps opératoire pour une opération: TO
  - Temps de mise en route et temps de traitement par unité (s'établit en fonction d'une taille de lot donnée)
  - N'inclut pas le temps d'attente entre deux machines
- Temps d'exécution (de passage) d'une commande: TE
  - Intervalle de temps entre le moment où la commande est lancée et celui où elle est achevée (correspond au délai de fabrication) = TO de la commande + TE de la commande juste avant

# Quelques définitions

- Temps d'attente
  - Temps d'attente de la commande avant qu'elle ne commence à être traitée
  - Correspond au temps d'exécution de la commande précédente
- Nombre moyen de commandes dans le système
  - $(\text{tps d'exécution total}) / (\text{tps d'opération total})$
- Retard
  - = Temps exécution de la commande - Date de livraison promise ( si le résultat est négatif, alors le retard = 0)

## Exemple 1 - PEPS

Numéro de commande	1	2	3	4
Temps d'opération TO	8	21	15	3
Temps d'exécution TE	8	29	44	47

- 1/ Déterminer l'Ordre de passage
- 2/ Déterminer le Temps d'exécution moyen TEM
- 3/ Déterminer le Temps d'attente maximal
- 4/ Déterminer le Temps d'attente moyen
- 5/ Déterminer le # moyen de commandes dans le système

## Exemple 1 - PEPS

Numéro de commande	1	2	3	4
Temps d'opération TO	8	21	15	3
Temps d'attente	0	8	29	44
Temps d'exécution TE	8	29	44	47

Ordre de passage = 1-2-3-4

Temps d'exécution moyen TEM =  $(8+29+44+47)/4 = 128/4 = 32$  h

Temps d'attente maximal = 44 h

Temps d'attente moyen =  $(8+29+44)/4 = 20,25$  h

# moyen de commandes dans le système =  $(\text{tps d'exécution total})/(\text{tps d'opération total}) = (8+29+44+47)/(8+21+15+3) = 2,72$

## Exemple 1 - TOC

<b>Ordre de passage (TOC)</b>	4	1	3	2
<b>Temps d'opération TO</b>	3	8	15	21
<b>Temps d'attente</b>	0	3	11	26
<b>Temps d'exécution TE</b>	3	11	26	47

- 1/ Déterminer l'Ordre de passage
- 2/ Déterminer le Temps d'exécution moyen TEM
- 3/ Déterminer le Temps d'attente maximal
- 4/ Déterminer le Temps d'attente moyen
- 5/ Déterminer le # moyen de commandes dans le système

## Exemple 1 - TOC

<b>Ordre de passage (TOC)</b>	4	1	3	2
<b>Temps d'opération TO</b>	3	8	15	21
<b>Temps d'attente</b>	0	3	11	26
<b>Temps d'exécution TE</b>	3	11	26	47

Ordre de passage = 4-1-3-2

$TEM = (3+11+26+47)/4 = 87/4 = 21,75 \text{ h}$

Temps d'attente maximal = 26 h

Temps d'attente moyen =  $40/4 = 10 \text{ h}$

# moyen dans le système =  $87/47 = 1,85$

L'application de la règle TOC permet de réduire le temps d'attente et le temps d'attente moyen



## Une autre façon de représenter les commandes

Séquence	Début	Durée d'opération	Fin (TE)	Date due	Retard
Tâche x	0	2	2	5	0
Tâche Y	2	7	9	13	0
Tâche Z	9	2	11	8	3
Total		11			3

- On place les différentes commandes dans le tableau en fonction de la règle de priorité avec les durées d'opérations et les dates de livraison promises correspondantes
- On calcule les différentes dates de début et de fin
- On calcule le total des durées d'opération et des TE
- On calcule les retards et le total des retards.

## Exemple 2

<u>Job</u>	<u>Durée d'opération</u>	<u>Date due</u>	<u>Slack</u>	<u>Ratio Critique</u>
A	5	10	$10-5=5$	$10/5=2.0$
B	10	15	$15-10=5$	$15/10=3.0$
C	2	5	$5-2=3$	$5/2=2.5$
D	8	12	$12-8=4$	$12/8=1.5$
E	6	8	$8-6=2$	$8/6=1.33$

- 1/ Remplissez le tableau précédent pour une règle PEPS
- 2/ Remplissez le tableau précédent pour une règle EDD
- 3/ Remplissez le tableau précédent pour une règle TOC

## Exemple 2 – PEPS

Corrigé :

Séquence	début	Durée d'opération	Fin (TE)	Date due	Retard
A	0	5	5	10	0
B	5	10	15	15	0
C	15	2	17	5	12
D	17	8	25	12	13
E	25	6	31	8	23
Total		31	93		48

## Exemple 2 – Date de livraison la plus rapprochée, EDD

Corrigé :

Séquence	début	Durée d'opération	Fin (TE)	Date due	Retard
C	0	2	2	5	0
E	2	6	8	8	0
A	8	5	13	10	3
D	13	8	21	12	9
B	21	10	31	15	16
Total		31	75		28

## Exemple 2 – Temps d'opération le plus court, TOC

Corrigé :

Séquence	début	Durée d'opération	Fin (TE)	Date due	Retard
C	0	2	2	5	0
A	2	5	7	10	0
E	7	6	13	8	5
D	13	8	21	12	9
B	21	10	31	15	16
Total		31	74		30

## Exemple 2 – Marge Libre Minimale, MLM

MLM pour chaque job : E-2, C-3, D-4, A-5, B-5

Séquence	début	Durée d'opération	Fin (TE)	Date due	Retard
E	0	6	6	8	0
C	6	2	8	5	3
D	8	8	16	12	4
A	16	5	21	10	11
B	21	10	31	15	16
Total		31	82		34

## Exemple 2 – Ratio Critique, RC

RC pour chaque job : E-1.3, D-1.5, A-2, C-2.5, B-3

Séquence	début	Durée d'opération	Fin (TE)	Date due	Retard
E	0	6	6	8	0
D	6	8	14	12	2
A	14	5	19	10	9
C	19	2	21	5	16
B	21	10	31	15	16
Total		31	91		43

## Exemple 2 – Sommaire

<b>Règle</b>	<b>Temps moyen dans le système</b>	<b>Retard moyen</b>	<b># de jobs en retard</b>	<b># moyen dans le système</b>	<b>Retard max</b>
PEPS					
EDD					
TOC					



## Exemple 2 – Sommaire

<b>Règle</b>	<b>Temps moyen dans le système</b>	<b>Retard moyen</b>	<b># de jobs en retard</b>	<b># moyen dans le système</b>	<b>Retard max</b>
PEPS	18,6	9,6	3	3	23
EDD	15	5,6	3	2,4	16
TOC	14,8	6	3	2,4	16
MLM	16,4	7,2	4	2,6	16
RC	18,2	9	4	2,9	16

# Les algorithmes

- **Un exemple d'algorithme d'optimisation de route chez UPS**

<https://www.youtube.com/watch?v=CsJRSToDI8w>



# L'algorithme de Johnson

L'algorithme de Johnson s'applique à un problème de « Flow Shop » à 2 machines

Les hypothèses sont donc :

1. Deux postes de travail successifs
2. Chaque commande doit d'abord être traitée par le premier poste de travail et ensuite par le second
3. 1 commande à la fois
4. Au début, les 2 machines sont libres

**Le critère de performance:** on cherche le temps total le plus court pour le traitement complet de l'ensemble des commandes( $C_{max}$ )

**La règle de priorité utilisée:** le temps d'opération le plus court

## Principe de base de l'algorithme de Johnson

Comme le deuxième poste de travail doit attendre que le premier poste ait complété le traitement d'une commande avant d'entrer en action, il est donc souhaitable que les premières commandes traitées par le premier poste de travail aient des temps d'opération courts

Ensuite, afin que la deuxième étape ne retarde pas trop le temps total d'exécution des commandes, il faut aussi que les dernières commandes exécutées soient courtes.

**Résultat: Si les conditions d'application sont satisfaites, l'algorithme de Johnson donne la solution optimale selon le critère de performance mentionné précédemment.**

## Les étapes de la méthode de Johnson

1. Choisir la commande ayant le temps opératoire(TO) **le plus court**. Si le TO choisi appartient au 1er poste de travail, placer la commande en tête de séquence, sinon la placer à la fin.
2. Choisir parmi les commandes qui restent celle ayant le TO **le plus court**. S'il correspond au 1er poste de travail, placer la commande à la suite de la séquence. Sinon, la placer juste devant la commande placée à la fin de la séquence, s'il y en a une.
3. Répéter l'étape 2 jusqu'à ce que les commandes soient placées.

**NOTE: Le temps total a la fin de toutes les opérations est appelé Makespan.**

### Exemple 3 – algorithme de Johnson

Une petite entreprise manufacturière produit des pièces qui nécessitent deux opérations: le sablage et la perforation. Ces opérations doivent toujours être effectuées dans le même ordre, soit le sablage avant la perforation.

La compagnie reçoit 5 commandes. Le tableau fournit, pour chaque commande et chaque opération, le temps d'opération en minutes.

## Exemple 3 – algorithme de Johnson (suite)

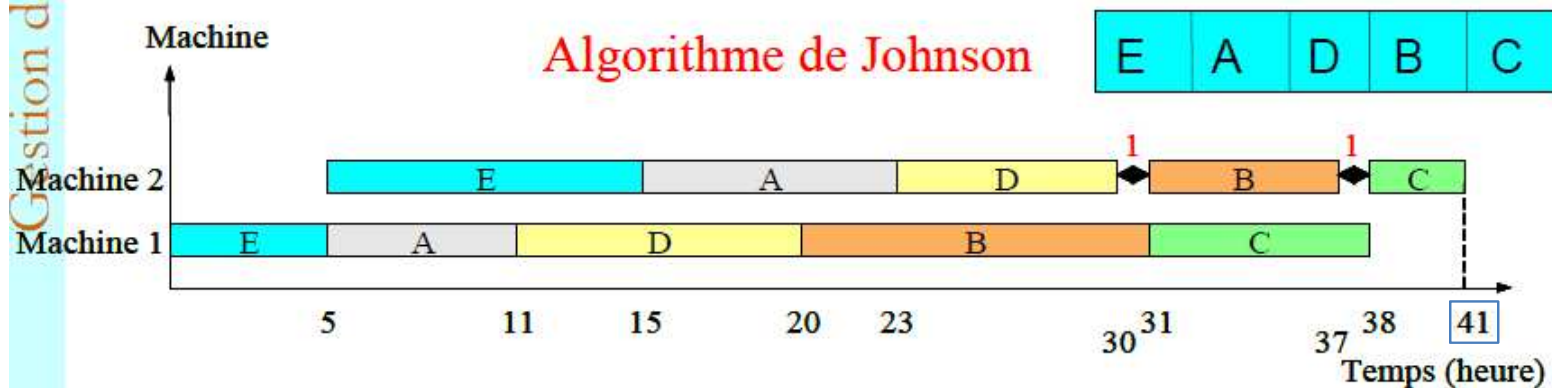
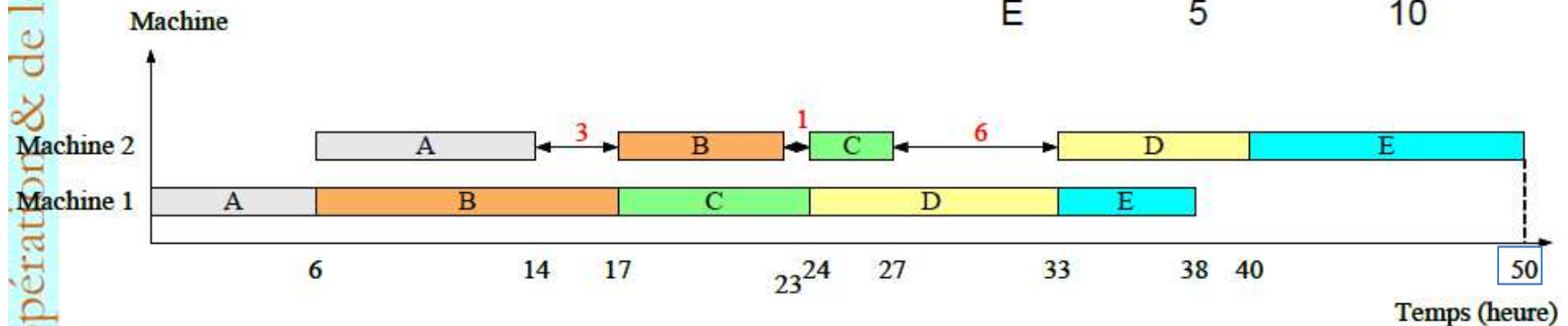
Commandes	Sablage (Machine 1)	Perforation (Machine 2)
<b>A</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
<b>B</b>	<b>11</b>	<b>6</b>
<b>C</b>	<b>7</b>	<b>3</b>
<b>D</b>	<b>9</b>	<b>7</b>
<b>E</b>	<b>5</b>	<b>10</b>

- a) Déterminez la séquence de traitement des commandes de façon à minimiser le temps total de traitement? (Avec Johnson)
- b) Déterminez la séquence de traitement des commandes par la règle FIFO?
- c) Dites à quel moment seront terminées toutes les commandes par a) et b)? (Makespan pour a) et b) )

## Exemple 3 – algorithme de Johnson (suite) – représentation graphique – diagramme de Gantt

**Règle: Premier arrivé Premier servi (FIFO)**

Job	Machine Centre 1	Machine Centre 2
A	6	8
B	11	6
C	7	3
D	9	7
E	5	10

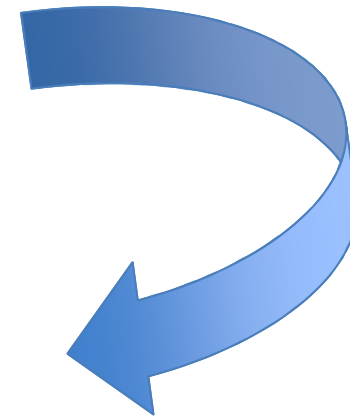




# Déterminer le délai de traitement de n Produits à p Opérations : L'algorithme de ROY

Produits	Opération A	Opération B	Opération C
1	a1	b1	c1
2	a2	b2	c2
3	a3	b3	c3
4	a4	b4	c4
5	a5	b5	c5
6	a6	b6	c6

Produits	Opération A	Opération B	Opération C
1	A1	B1	C1
2	A2	B2	C2
3	A3	B3	C3
4	A4	B4	C4
5	A5	B5	C5
6	A6	B6	C6



## L'algorithme de ROY

- Faire la somme de la première colonne :
  - $A_1 = a_1; A_2 = A_1 + a_2; A_3 = A_2 + a_3, A_i = A_{i-1} + a_i; \dots$
- Faire la somme de la première ligne :
  - $A_1 = a_1; B_1 = A_1 + b_1; C_1 = B_1 + c_1; D_1 = C_1 + d_1, \dots$
- Déterminer les  $B_2, B_3, \dots, C_2, C_3, \dots$  selon les formules :
$$B_2 = b_2 + \max(A_2 \text{ et } B_1)$$
$$B_3 = b_3 + \max(A_3 \text{ et } B_2)$$
$$B_n = b_n + \max(A_n \text{ et } B_{n-1})$$
$$M_n = m_n + \max(L_n \text{ et } M_{n-1})$$

## L'algorithme de ROY – Exercice 6

En utilisant l'algorithme de ROY, donnez la fin de traitement de chaque produit pour chaque opération

Produits	Opération A	Opération B	Opération C
P-1	5	5	8
P-2	4	3	6
P-3	8	9	3
P-4	2	7	7
P-5	6	8	10
P-6	12	15	12

## L'algorithme de ROY – les avantages

- N'est pas limité par le nombre d'opérations ou le nombre de produits
- Est applicable à n'importe quelle règle de priorité
- Est facilement programmable avec excel
- On n'a pas besoin de faire des graphiques, qui sont fastidieux à construire dans le cas de temps d'opérations longs

## L'algorithme d'affectation (méthode hongroise)

- Des fois, la même tâche prend plus ou moins de temps selon si elle est faite par l'employé ou la machine A ou B ou C
- La MH permet donc de déterminer la distribution optimale des tâches aux ressources disponibles(machines ou employés)
- Issu de la programmation linéaire
- Car sinon les autres façons de le faire sont les suivantes:
  - a) De façon aléatoire
  - b) Selon le gestionnaire, qui aura à tenir compte de l'ordre de priorité des commandes, des dates de livraison, de l'importance des clients, etc.
  - c) En essayant d'optimiser l'ensemble du système d'opération de l'entreprise

## L'algorithme d'affectation – les étapes

1. Dans chaque rangée: soustraire la plus petite valeur
2. Dans chaque colonne de la matrice résultante: soustraire la plus petite valeur
3. Recouvrir toutes les valeurs nulles par un minimum de « l » lignes horizontales ou verticales  
Si « l » < « n » → passez à l'étape suivante (avec « n » = nombre de tâches à réaliser)  
Si « l » = « n » → passez à la dernière étape de l'algorithme
4. Parmi les valeurs non recouvertes, en soustraire la plus petite valeur. Puis, l'ajouter aux valeurs se trouvant aux intersections des lignes « l » et retourner à l'étape 3
5. Affecter à chaque produit la personne correspondant à la valeur pivot nulle, en commençant avec les lignes et les colonnes ayant un seul « 0 »

# L'algorithme d'affectation – exemple 4

## Machine

### Produit

	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>		
A	10	5	6	10	→	5
B	6	2	4	6	→	2
C	7	6	5	6	→	5
D	9	5	4	10	→	4

### Réduction ligne

5	0	1	5
4	0	2	4
2	1	0	1
5	1	0	6
↓			↓
2			1

### Réduction colonne

3	0	1	4
2	0	2	3
0	1	0	0
3	1	0	5

### Couvrir les zéros

3	0	1	4
2	0	2	3
0	1	0	0
3	1	0	5
↓			
			2

# de lignes  $\neq$  # de colonnes → modifier matrice

## L'algorithme d'affectation – exemple 4 (suite)

Modifier matrice    Couvrir les zéros

1	0	1	2	1	0	1	2	# lignes l= n Solution optimale
0	0	2	1	0	0	2	1	
0	3	2	0	0	3	2	0	
1	1	0	3	1	1	0	3	

	<u>Machine</u>			
<u>Produit</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
A	1	0	1	2
B	0	0	2	1
C	0	3	2	0
D	1	1	0	3

	<u>Machine</u>			
<u>Produit</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
A	10	5	6	10
B	6	2	4	6
C	7	6	5	6
D	9	5	4	10



## L'algorithme d'affectation – exemple 5

Produits	A	B	C	D
P-1	8	6	2	4
P-2	6	7	11	10
P-3	3	5	7	6
P-4	5	10	12	9

Appliquer l'algorithme d'affectation

## L'algorithme d'affectation – exemple 5

Produits	A	B	C	D
P-1	8	6	2	4
P-2	6	7	11	10
P-3	3	5	7	6
P-4	5	10	12	9

Réponse: C – P1 , B – P2, D – P3, A – P4

# Ordonnancement dans les services

- Systèmes de rendez-vous( ex chez le médecin, dentiste, ...)
- Systèmes de réservations ( ex restaurants, hôtels, services de transport)
- Ordonnancement de la main d'œuvre
  - En se basant sur des prévisions précises
  - En mettant en place la flexibilité de la main d'œuvre
- Ordonnancement des systèmes à ressources multiples
  - Dans certaines situations, il est nécessaire de coordonner plusieurs ressources simultanément( ex hôpitaux, établissements d'enseignement, avions)
- Ordonnancement cyclique
  - Dans plusieurs cas certaines entreprises doivent délivrer un service 7 jours su 7 ou 24 heures sur 24

## Les entreprises de service et le retard

Les retards se concrétisent par des files d'attente.

Voici quelques façons de gérer l'équilibre de l'offre et la demande de services:

- Utilisation simultanée de 2 équipes pour une période limitée
- Embauche de personnes aux heures d'affluence ou des équipes volantes
- Ordonnancement planifié par la prise de rendez-vous

Le principe premier arrivé, premier servi procure un meilleur service au niveau du temps de service mais le temps d'attente est plus long.

# Techniques avancées

## **Techniques d'ordonnement:**

- Manuelle (règles de décision)
- Assistée (optimisation)
- Automatisée en temps réel

## **Les outils disponibles:**

- Règles de décisions
- Techniques de R.O (optimisation)
- Algorithmes spécialisés
- Diagrammes de Gantt dynamiques
- Simulation

# Prochaine Séance

- Lire Chapitre 13

## Exercices à faire:

Chapitre 16 (p.644): Problèmes avec solution 1, 2 et 4

Chapitre 16 (p.651): Problèmes 13, 17 et 18

# Références

- Notes IND5200 – Javad Sadr
- Stevenson – Benedetti