

# Les Lignes d'assemblage

---

Safia LAMRANI

Decembre 2012

# Plan (1/2)

---

## I. les lignes d'assemblage : dimensionnement

- L'aménagement en ligne de production
- Les lignes d'assemblage
- Avantages & inconvénients
- Le transfert entre les stations de travail
- Takt Time
- Problème d'équilibrage des lignes;
- Dimensionnement des lignes de production :
- comment améliorer l'équilibrage d'une ligne de production?

# Plan (2/2)

---

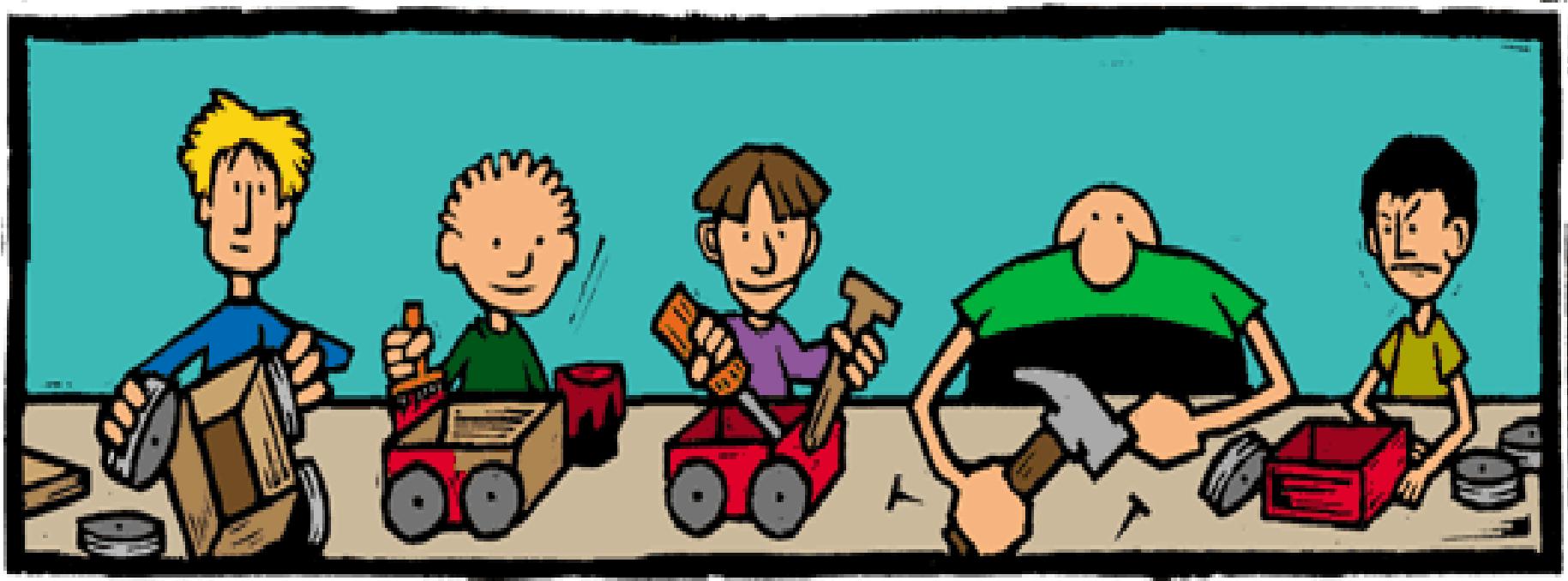
## II. Méthode d'équilibrage des lignes d'assemblage

- étapes d'une étude d'équilibrage
- Les contraintes d'antériorité
- Matrice des antériorités et Graphe des antériorité

## III. Quelques Algorithmes classiques pour SALBP

- SALB 1 et SALB 2
- Méthode d'Helgeson & Birnie;
- Méthode Kilbridge & Wester;
- Méthode COMSOAL

# I - Les lignes d'assemblage: Dimensionnement



# Aménagement en Lignes de production

---

- Rappel
  - Si la demande d'un produit standard est suffisamment grande et stable pour une longue période de temps, il est généralement plus rentable d'aménager les équipements dans l'ordre dans lequel ils sont utilisés. c'est **l'arrangement en ligne** : (product layout, **flow shop**)

# Lignes d'assemblage : Historique

*Les lignes d'assemblage mobiles ont été introduites par Ford automobiles aux USA en 1913.  
Le temps de production d'un châssis d'automobile a été réduit de 12 hr 28 min à 1 hr 33 min*



**Résultat :**  
**production en masse et une grande réduction des prix**  
**Première voiture « démocratique »**

**Rappel :**  
**Taylorisme**  
**Fordisme**

# Les Lignes d'assemblage

---

- Il existe deux types de lignes de production :
  - lignes de fabrication
    - construisent des composants tels que les pneus de voitures, les pièces métalliques, etc. (*make-to-stock production system*).
  - lignes d'assemblage
    - assemblent les pièces fabriquées : (*assemble to stock production system*)
    - Exemples : jouets, automobiles, produits électroniques, électroménagers...
- Ligne d'assemblage généralisée :
  - mix entre opération de fabrication & assemblage
  - Une ligne d'assemblage peut aussi bien être manuelle, automatique ou hybride.

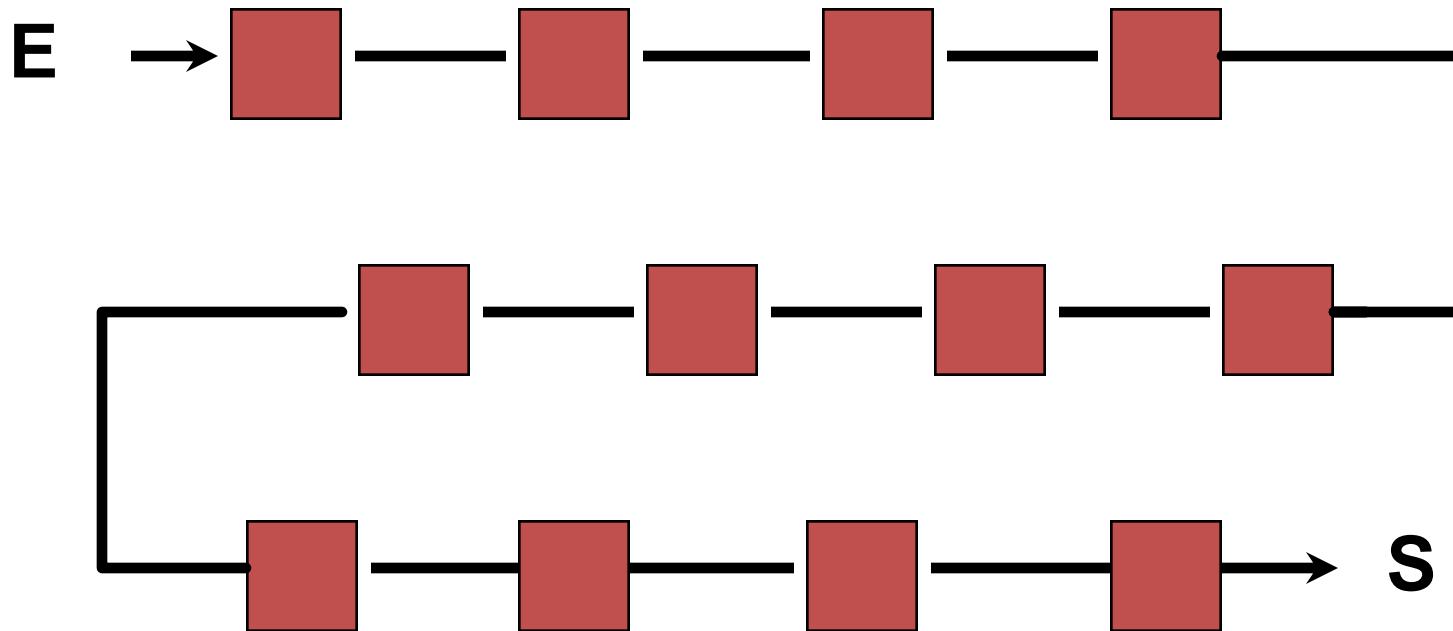
# Types de lignes d'assemblage

---

- Linéaire
- Circulaire
- Serpentin
- En U

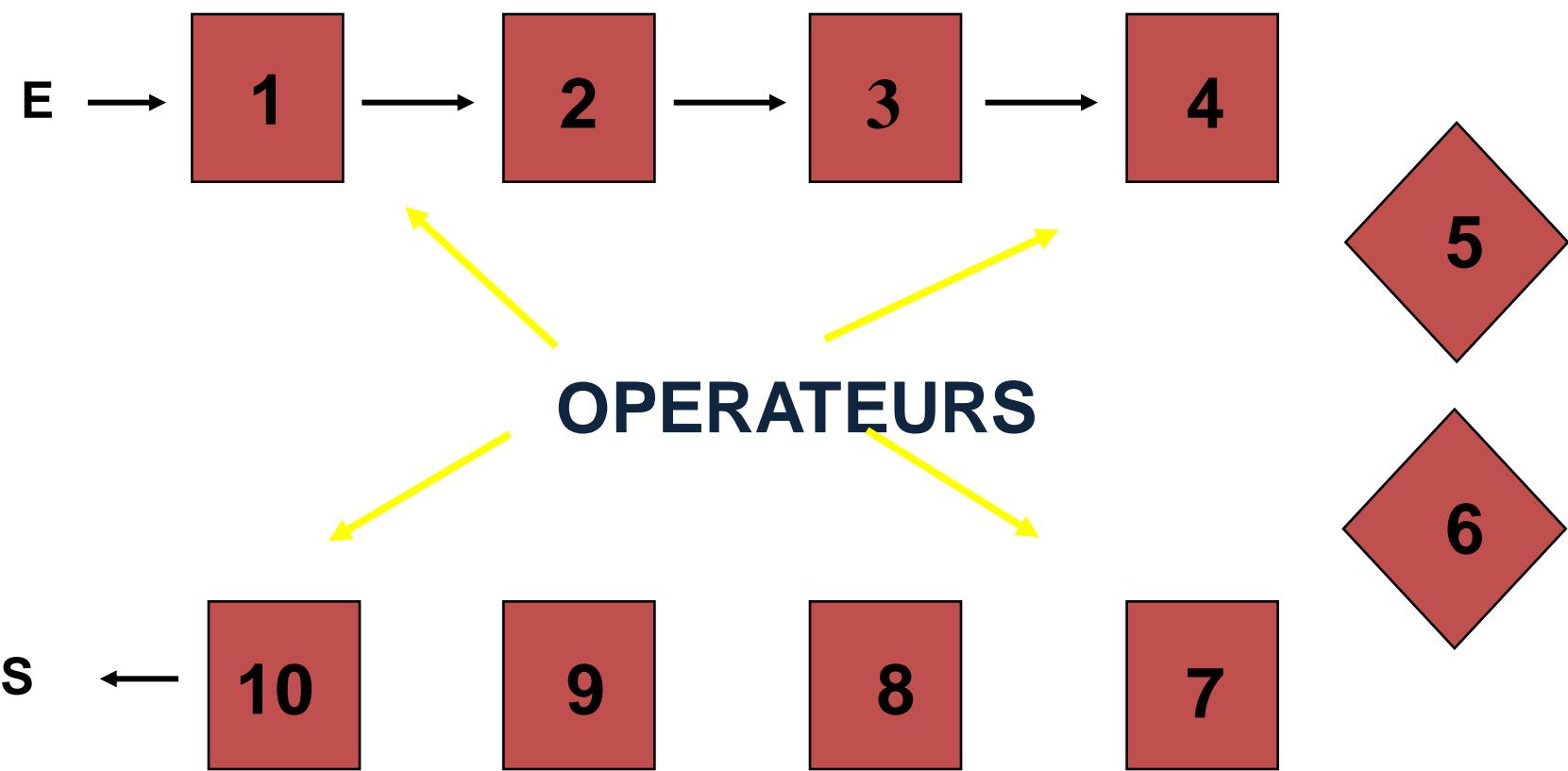
# Aménagement en ligne (serpentin)

---



# Ligne en U

---



# Exemple ligne d'assemblage de voitures

---

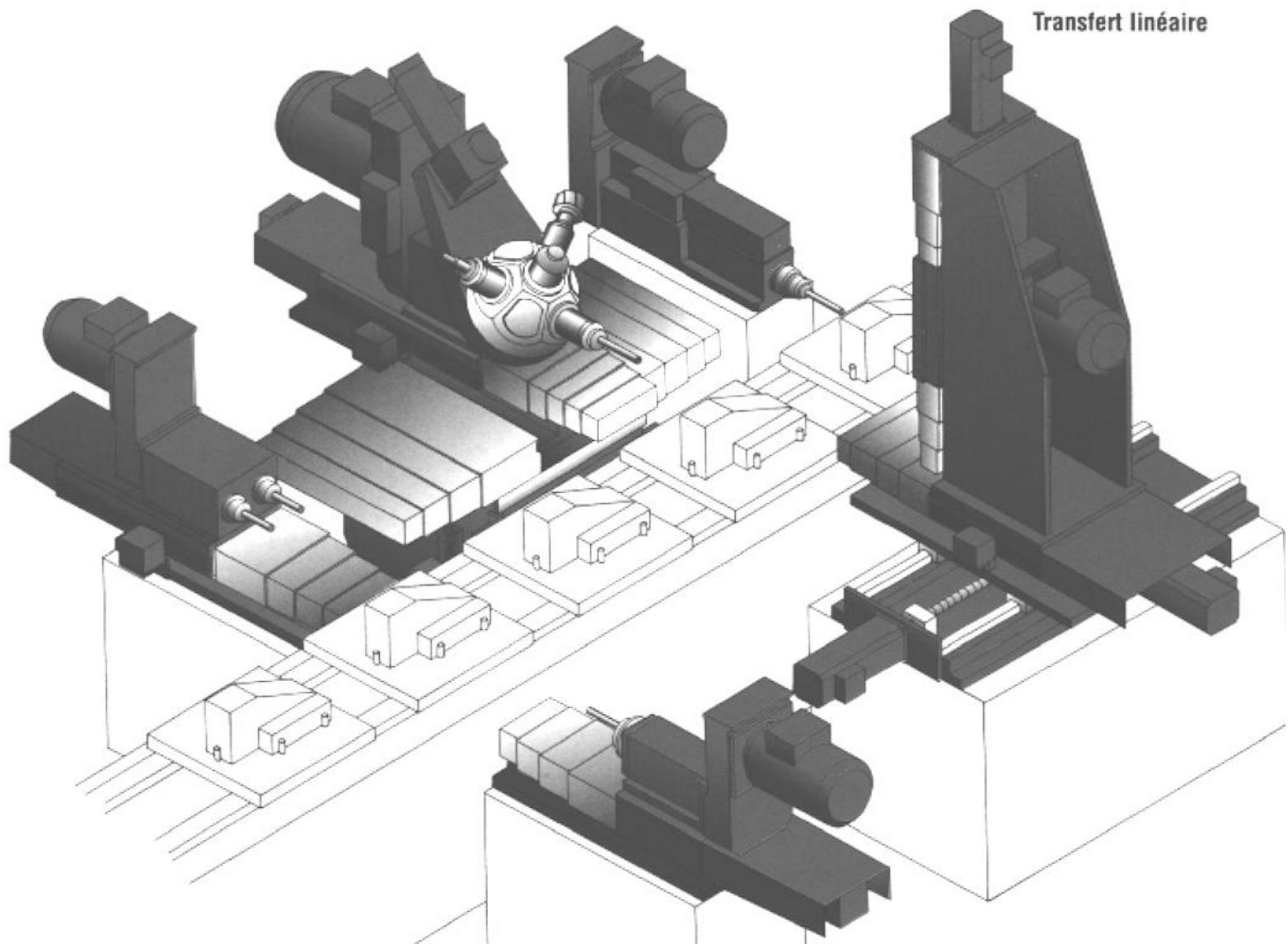


# Exemple : lignes de production automatisées

---



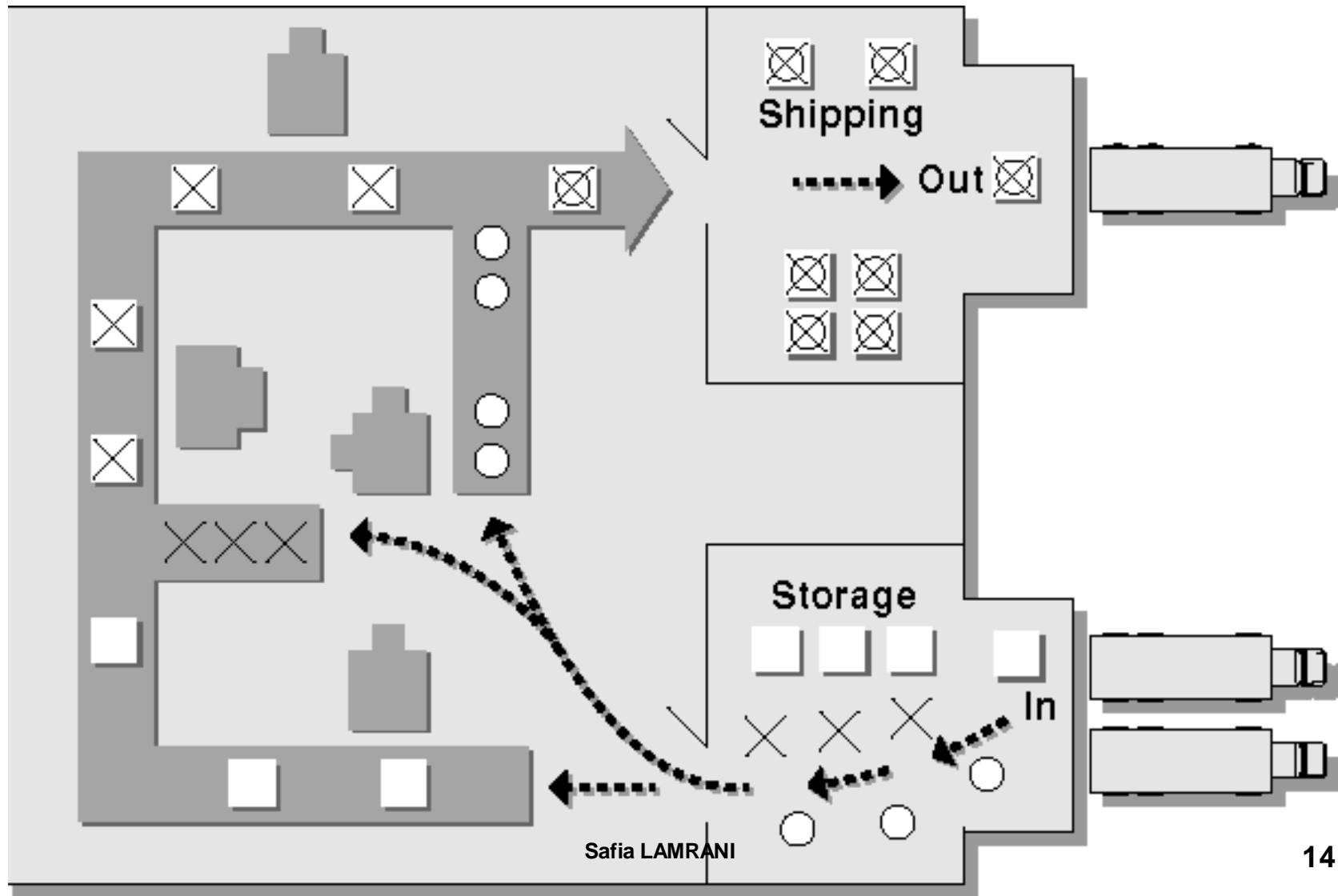
# Ligne Transfert



Dimensionnement des lignes d'assemblage

Dimensionnement ligne d'assemblage

# Ligne d'assemblage généralisée



# Les Lignes d'assemblage

---

- Les lignes de production (fabrication ou assemblage) sont des processus répétitifs
- Le travail total est divisé en plusieurs éléments (opérations indivisibles). Les opérations sont toutes suffisamment petites pour qu'une ou plusieurs opérations puissent être effectuées sur une station de travail. (tâche)
- Une station de travail (ou poste) est une aire le long de la ligne qui requiert au moins un opérateur ou une machine.

# Avantages de l'aménagement en ligne:

---

- En affectant à chaque opérateur une tâche bien définie et répétitive, il devient un spécialiste et donc exécute la tâche plus rapidement. (courbe d'apprentissage).
- Diminution du coût de la pièce
- Gestion facilitée de la ligne
- Équipements spécialisés pour les production de masse
- Achats en gros

# Inconvénients de l'aménagement en ligne

---

- Difficulté de changer le taux de production
- Des changements même mineurs de la conception du produit peuvent nécessiter des changements importants de la lignes.
- Vulnérabilité de la ligne aux pannes : efficacité totale = le produit des efficacités des stations en lignes.
- Pour les opérateurs: routine, maladies professionnelles, absentéisme,
- manque de motivation des opérateurs
- La Cadence de la ligne est subordonnée à la station la plus lente (goulet d'étranglement)

# Transfert entre les stations de travail (1/2)

---

## 1. Transfert non mécanisé

- *Les pièces transitent d'une station à l'autre à la main*
- *Cas assemblage composants électriques (ex SOURIAU)*
- Avantage : plus « Humain »
- Inconvénients :
  - *Manque de pièces à des stations*
  - *Blocage à d'autres stations*
    - » Taux de production variable !!
    - » Utilisation des stock tampons entre les stations pour pallier ce problème

# Transfert entre les stations de travail (2/2)

---

## 2. Transfert mécanisé :

Utilisation de convoyeurs pour déplacer les sous ensembles ou les composants entre les stations

Le transport peut être

### ***Continu***

- *Le plus usité dans les lignes manuelles*
- *Deux cas : pièces fixées au convoyeur (exemple : véhicules), ou pièces pouvant être enlevée du convoyeur*

### ***Synchrone (intermittent)***

- *Mouvement rapide et discontinu*
- *Lignes automatisées uniquement, car stressant pour les opérateurs*

### ***Asynchrone***

- *La pièce quitte la station une fois la tâche terminée, indépendamment des autres pièces*
- *Lignes manuelles ou automatisées.*

# Takt time

---

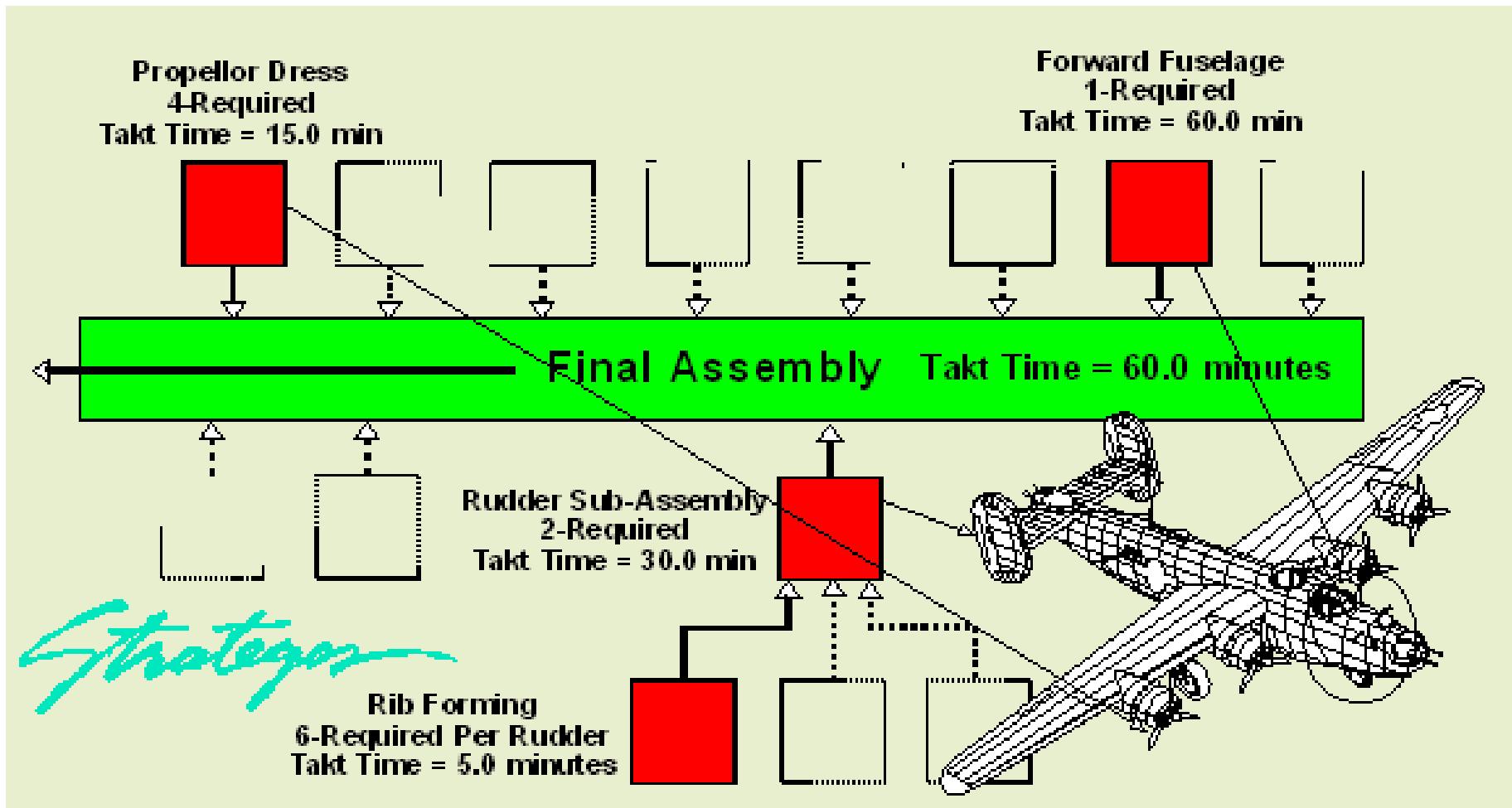
- Le **takt** est le rythme sur lequel il faut se caler pour se mettre en phase avec la demande. il se définit par le rapport :

**Takt = temps disponible / nombre d'unités consommées ou vendues.**

- Les unités de temps doivent être cohérentes, en général on opte pour la maille de la journée et l'on exprime le temps disponible par jour, le nombre d'unités consommées ou vendues par jour.

# Takt time un avion par heure!!!

Avion B-24 construit à l'usine [Willow Run](#) durant la seconde guerre mondiale.  
L'assemblage final était réalisé à une cadence de "un avion par heure"  
Le TAKT time était 60.0 minutes



# Un avion par heure !!!

---

- Le Takt finale est 60 minutes
- Il faut un fuselage par avion donc le TAKT pour l'usine de production des fuselage est aussi 60 minutes
- **Four propellers** per aircraft generate a Takt time at Propeller Dress of 15.0 minutes.
- Each ship needs **two rudders**, so Takt time for Rudder Sub-Assembly is 30.0 minutes. Each rudder requires **six ribs**. Takt time for Rib Forming is, therefore, 5.0 minutes

# Un avion par heure

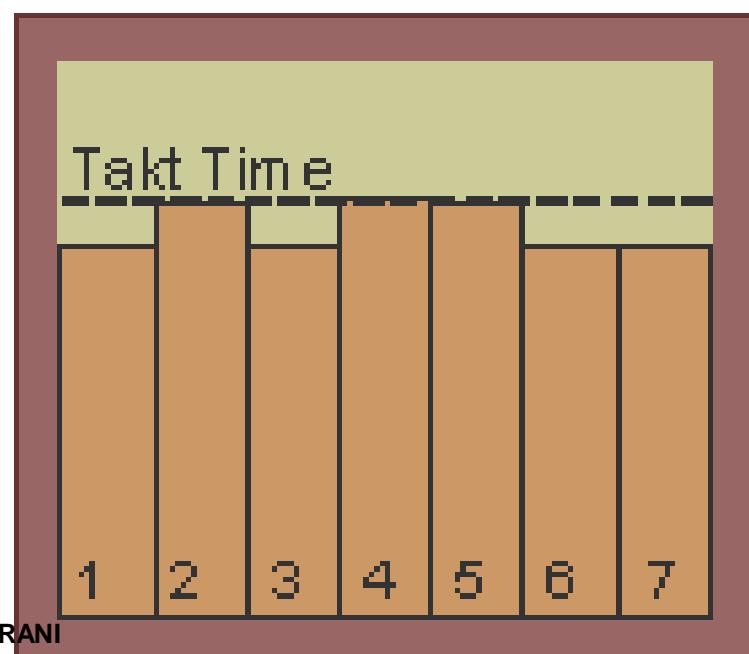
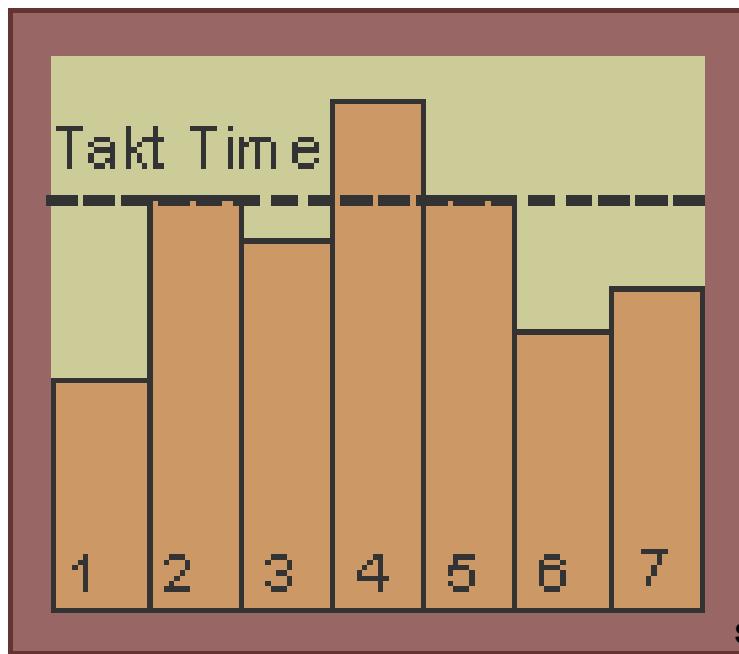
---



# Takt time

La ligne ne peut pas produire la quantité demandée car l'opération # 4 dépasse le Takt time.  
(Temps de cycle)

Travail équilibré dans ce cas,

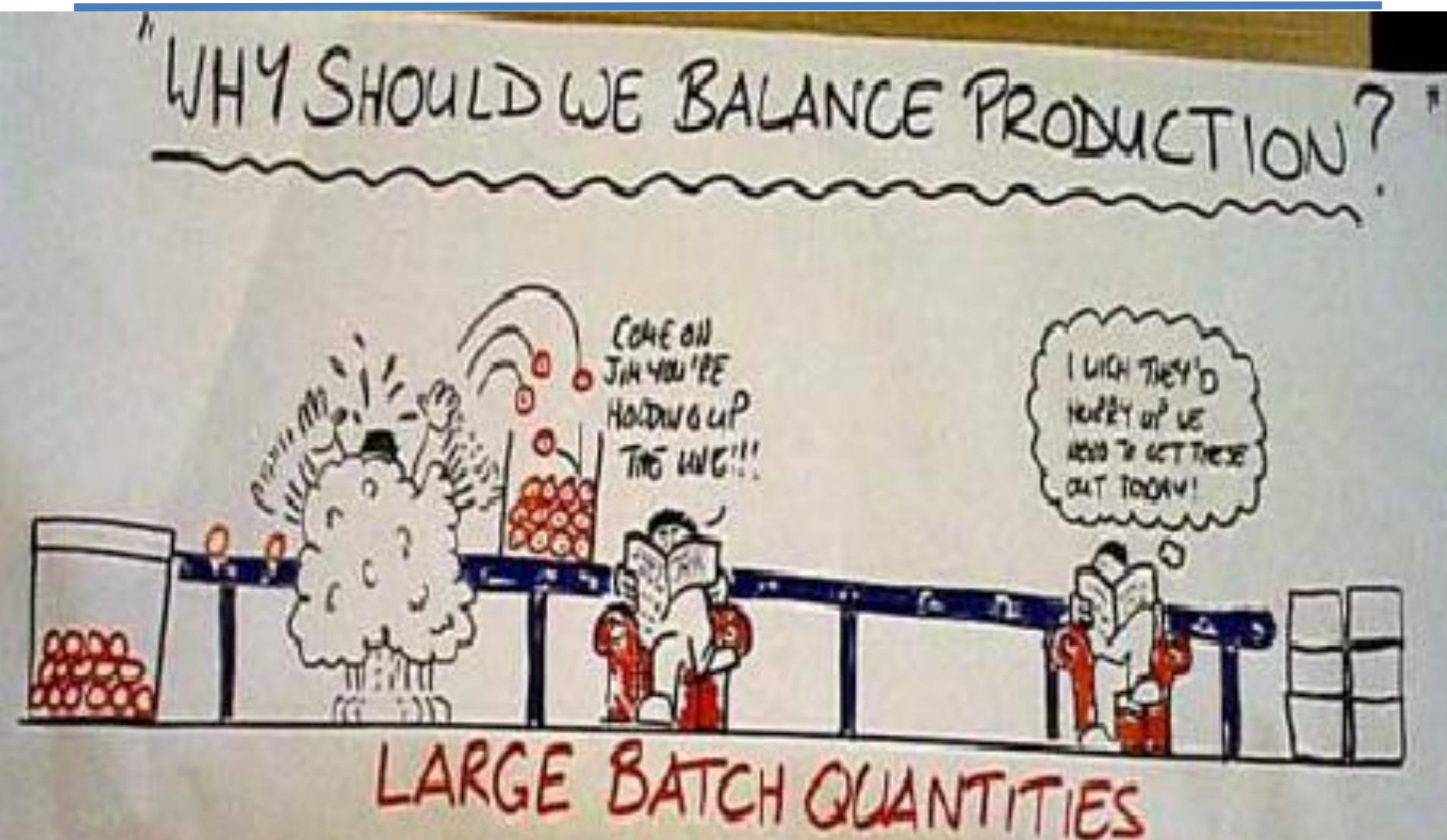


# Équilibrage des lignes de production

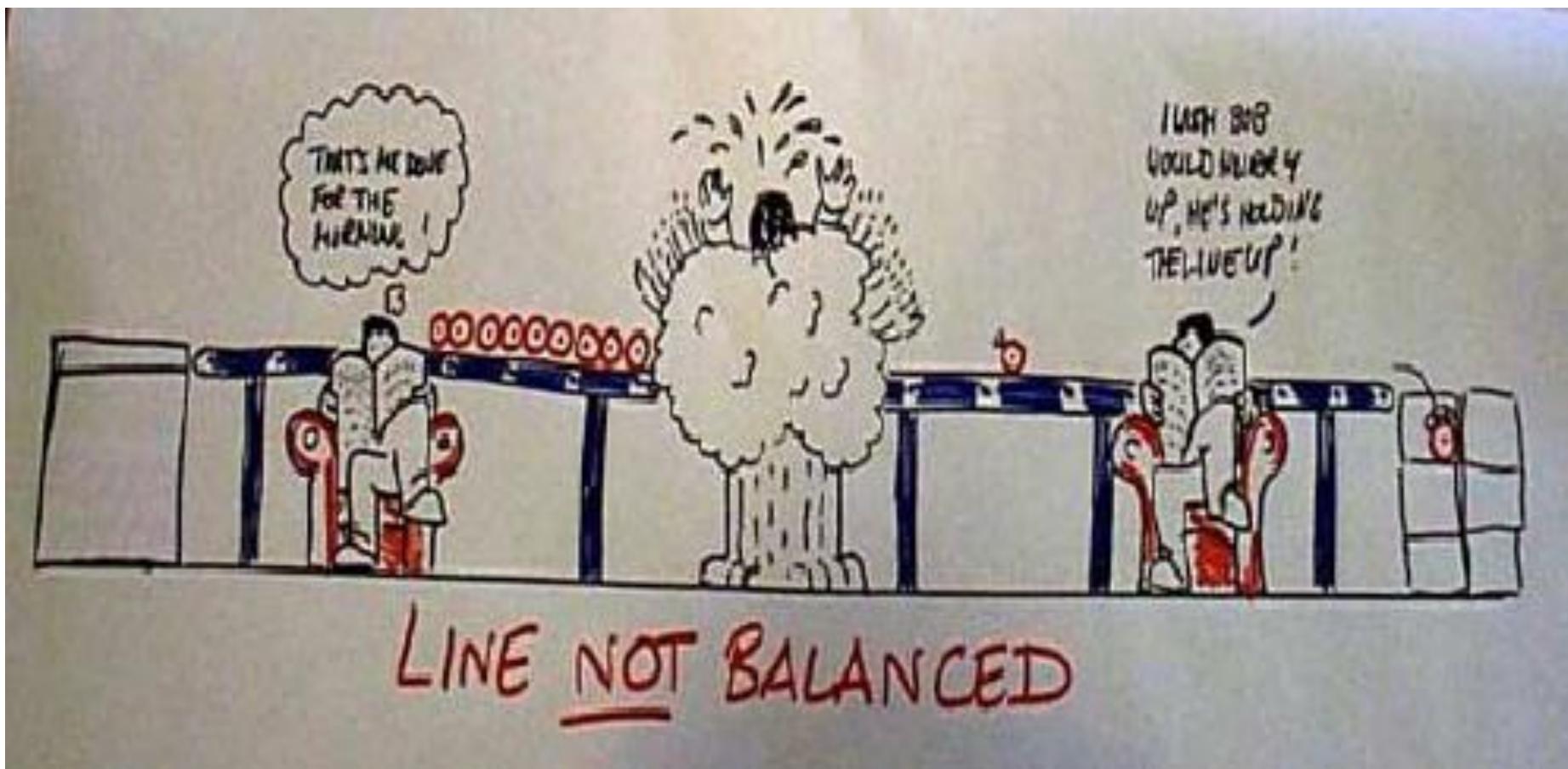
---

Le problème d'équilibrage (balancing) de la ligne consiste à affecter aux différentes stations de la ligne des tâches sensiblement égales.

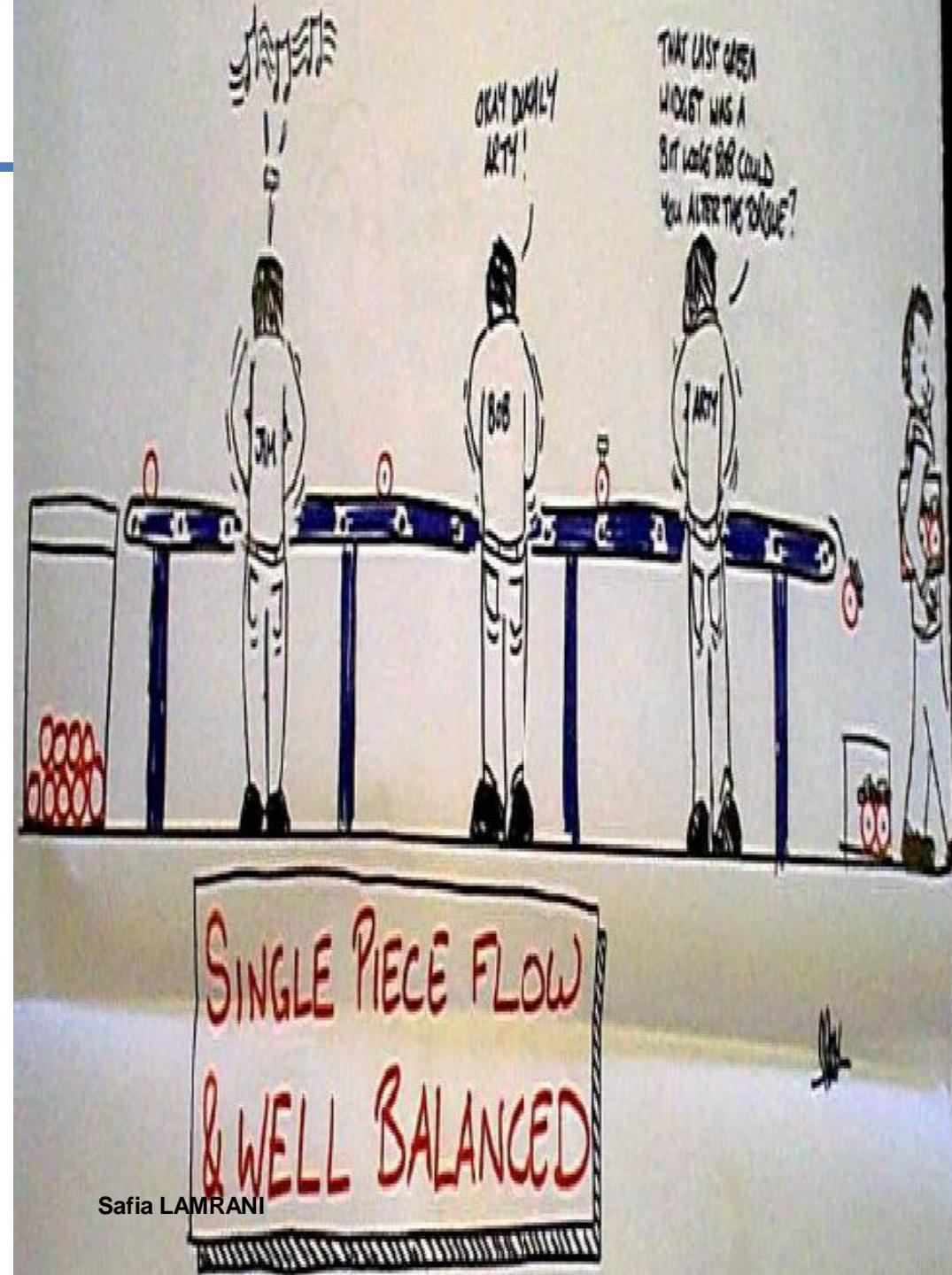
# Problème d'équilibrage , pourquoi? (1/2)



## Problème d'équilibrage , pourquoi? (2/2)



# Ligne équilibrée



# Conception des lignes de production :

---

- Calcul du nombre minimal de stations (idéal) : sans prise en compte du problème d'équilibrage
- **Contraintes de production**

Soit une demande annuelle  $D_a$

- Mode de travail de l'unité de production :
  - *50 semaines par an*
  - *S = Nombre d'équipes (shift) par semaine*
  - *H = Nombre d'heures par équipe*
- Exemple:
  - *$D_a = 90\ 000 p/an$*
  - *2 équipes par jour*
  - *8 heures par équipe*
  - *5 jours par semaine*

# Nombre minimal de stations d'une ligne

---

- $S = 10$  équipes par semaine
  - $H = 8$  hr par équipe
- 
- Soit  $R_p$  (pièces par heure) le taux de production horaire requis (production rate)
    - $R_p = ?$   
**22.5 pièce par heure**
  - Soit  $T_p$  (min) le temps de production moyen requis pour une pièce
    - $T_p = ?$   
**2.66 min/pièce**

- 
- Prendre en compte pour la demande annuelle le taux de rebut
  - Supposons un taux de rebut global de 5%
  - Donc le Rp va changer !
  - $T_p = 2,53\text{min/pce}$

# Nombre minimal de stations d'une ligne :

---

## problème de fiabilité

- Pannes électriques et mécanique
- Pannes d'Énergie
- Changements d'outils ...
- Absenteismes, greves...
- Inventaires...



- *La ligne doit fonctionner plus vite que  $T_p$  pour compenser les pertes de temps dues au problèmes de fiabilité de la ligne.*

# Nombre minimal de stations d'une ligne :

---

- **Soit E efficacité de la ligne (line efficiency)**
  - *Estimée à partir de lignes similaires, n'oubliez pas que la ligne n'existe pas encore.*
  - *Exemple E = 90%*
- **Soit T<sub>k</sub> le Takt Time**
  - *C-à-d le temps qu'il faut réaliser en pratique pour réaliser la productivité requise*
- **Donc :**  
 $T_k = E * T_p = 2,27 \text{ min /pièce}$

# Contraintes dues au produit

---

- La gamme du produit est constituée des opérations de fabrication/ assemblage  $O_1 O_2 \dots O_k$
- Une opération = un élément de travail indivisible, la plus petite tâche pratique en laquelle le travail peut être divisé.
- La durée de l'opération  $O_i$  est  $t_i$ 
  - $t_i$ , supposée constante, (dans la réalité, elles peuvent varier dans une station manuelle);
  - Les  $t_i$ , supposées additives, (en réalité la somme peut changer si deux opérations sont faites dans la même station).

# Nombre minimal de stations d'une ligne

---

*Soit  $T_{wc}$  (work content time) le temps de réalisation idéal d'une pièce*

$$T_{wc} = \sum_{(1 \leq i \leq k)} (t_i)$$

*Le Nombre minimal (idéal) requis pour produire le produit à la cadence imposée par la production est donc*

*C-à-d Sous les hypothèses : travail total divisible en tâches de durée  $T_c$  chacune, et temps de transfert nul.*

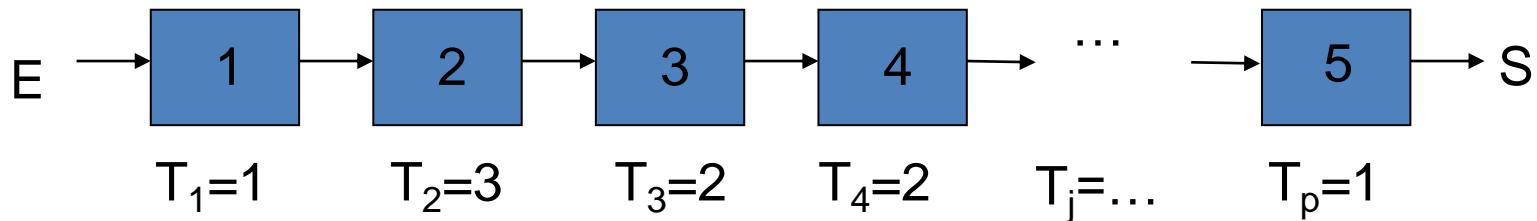
$$n = \min \text{ integer } \geq T_{wc} / T_k$$

# Prise en compte du problème d'équilibrage

- *Calculons l'efficacité d'équilibrage à partir des données sur le produit*

Supposons que la ligne est constituée de p stations de travail

Soit  $T_j$  la durée de la tâche affectée à la station n°j,  $1 \leq j \leq m$



Soit :

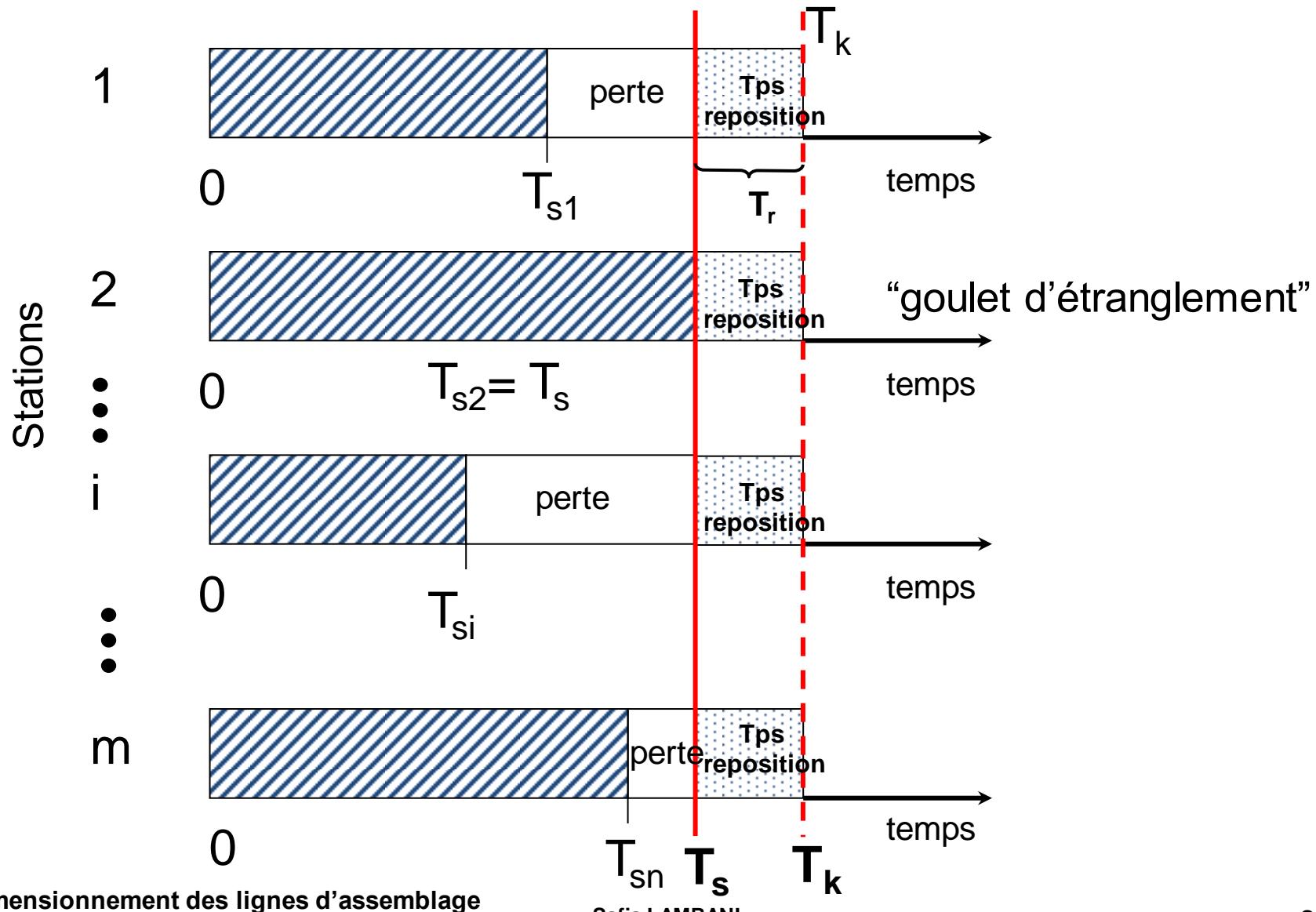
$T_s$  la durée de la station la plus lente

$T_r$  le temps de repositionnement (transfert poste à poste)

$$T_k = T_r + \text{Max}(T_i) = T_r + T_s$$

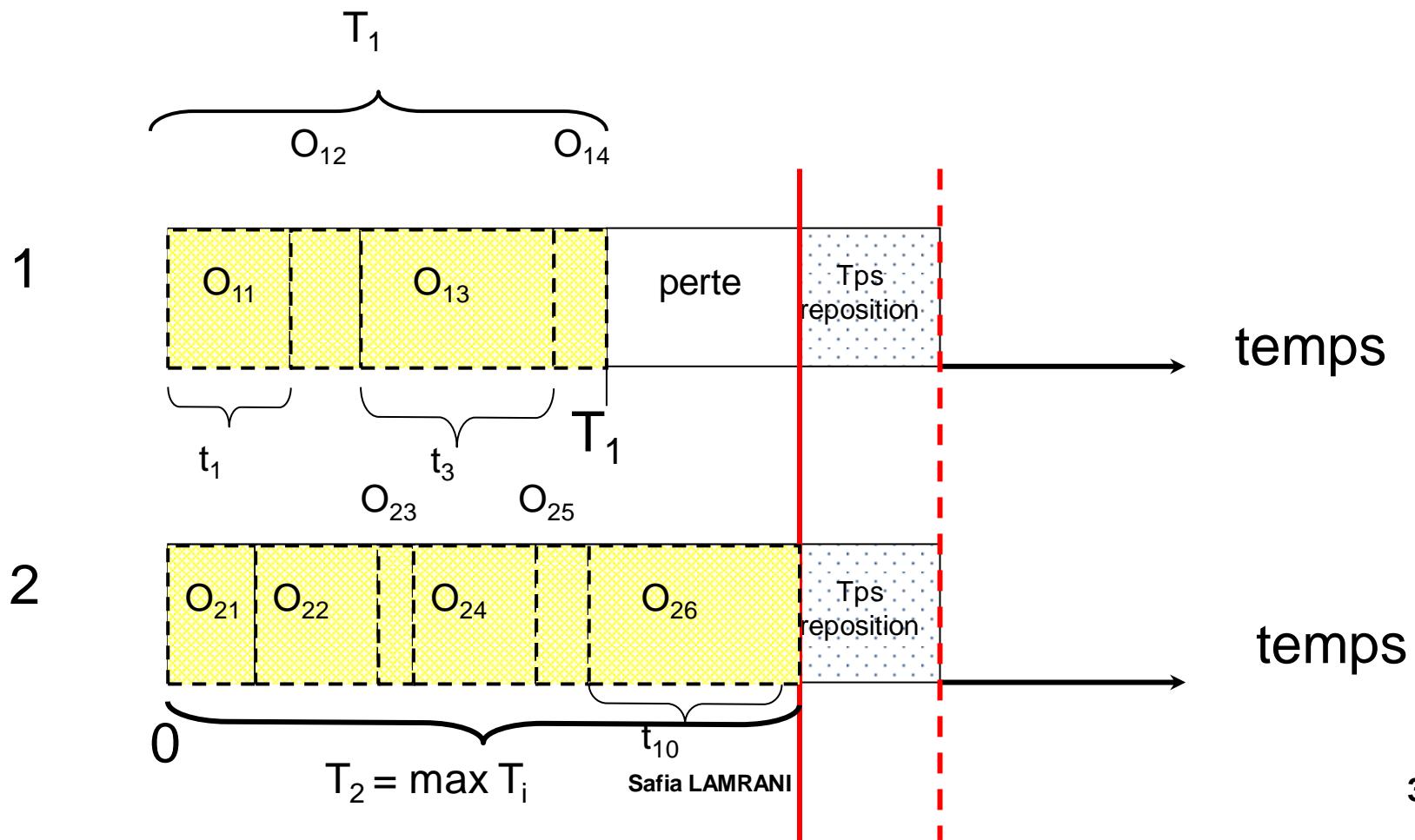
Safia LAMRANI

# Prise en compte du problème d'équilibrage



# Prise en compte du problème d'équilibrage

Rappel : une tâche est constituée d'une ou plusieurs opérations



## Nombre de stations d'une ligne : perte d'équilibrage

---

La perte d'équilibrage de la ligne est donc :

$$\sum(T_s - T_i) / (m \cdot T_s) = (m \cdot T_s - T_{wc}) / (m \cdot T_s)$$

Donc l'efficacité d'équilibrage est :

$$E_b = T_{wc} / (m \cdot T_s)$$

En estimant  $E_b$  à partir de lignes similaires :

$$m = (\min \text{ integer } \geq T_{wc} / (E_b \cdot T_s))$$

Typiquement  $0.90 \leq E_b \leq 0.95$

# Application

---

On veut dimensionner une ligne d'assemblage d'un produit P dont la demande annuelle est 90 000 p/an, Le temps de réalisation idéal de P est 55 minutes.

Taux de pièces defectueuses 3%.

La ligne fonctionnera 50 semaines par an, 5 équipes par semaine, et 8 hr par équipe.

La fiabilité de la ligne est estimée à 95% et son efficacité d'équilibrage à 93%, le temps de repositionnement est 9 sec.

**Trouver le nombre de stations requis ainsi que le nombre minimal de stations de la ligne.**

**n = 44 stations**

**m = 53 stations**

Safia LAMRANI

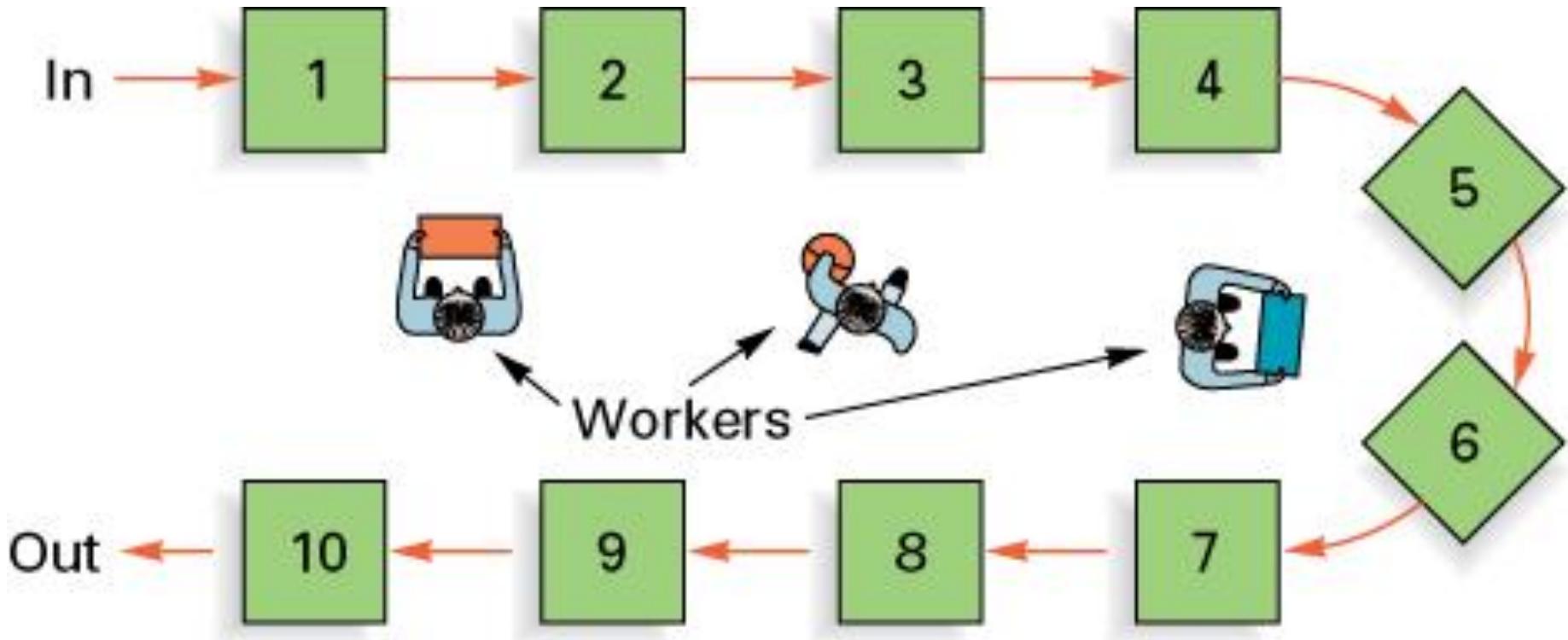
# Comment améliorer l'équilibrage d'une ligne

---

- Division du travail au maximum possible en opérations élémentaires
- Pré assemblage des composants
- Stations parallèles
- Cellule en U

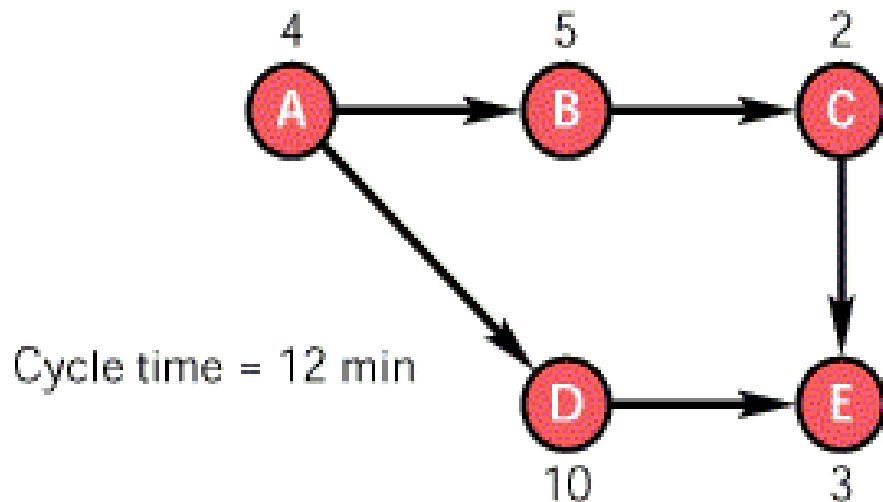
# cellule en U améliore l'efficacité

- Optimisation du travail des opérateur
- Meilleur équilibrage ( $\Rightarrow$  équilibrage dynamique)



# Cellule en U améliore l'efficacité

Precedence diagram:

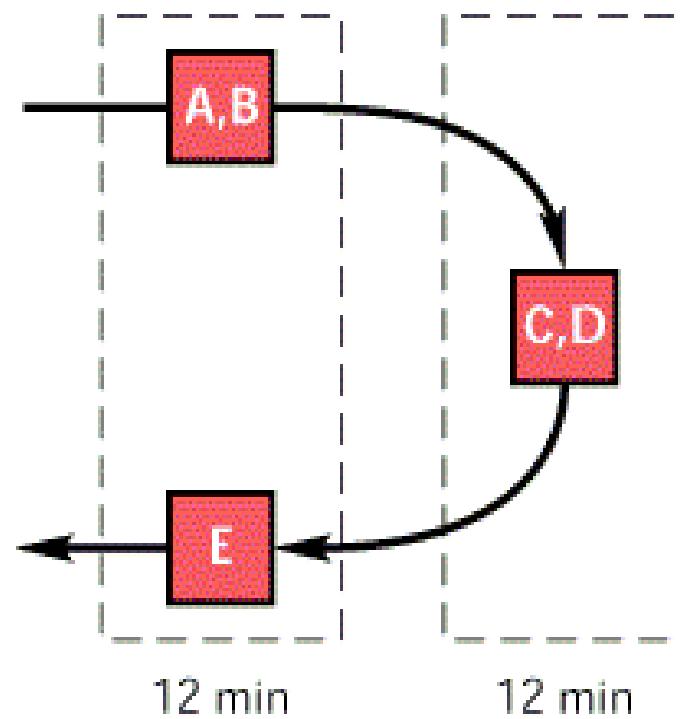


(a) Balanced for a straight line



$$\text{Efficiency} = \frac{24}{3(12)} = \frac{24}{36} = .6666 = 66.7\%$$

(b) Balanced for a U-shaped line



$$\text{Efficiency} = \frac{24}{2(12)} = \frac{24}{24} = 100\%$$

# A Manufacturing Cell with Worker Paths

Source: J.T. Black, "Cellular Manufacturing Systems Reduce Setup Time, Make Small Lot Production Economical." *Industrial Engineering* (November 1983).

Paths of three workers moving within cell

Material movement

## Key:

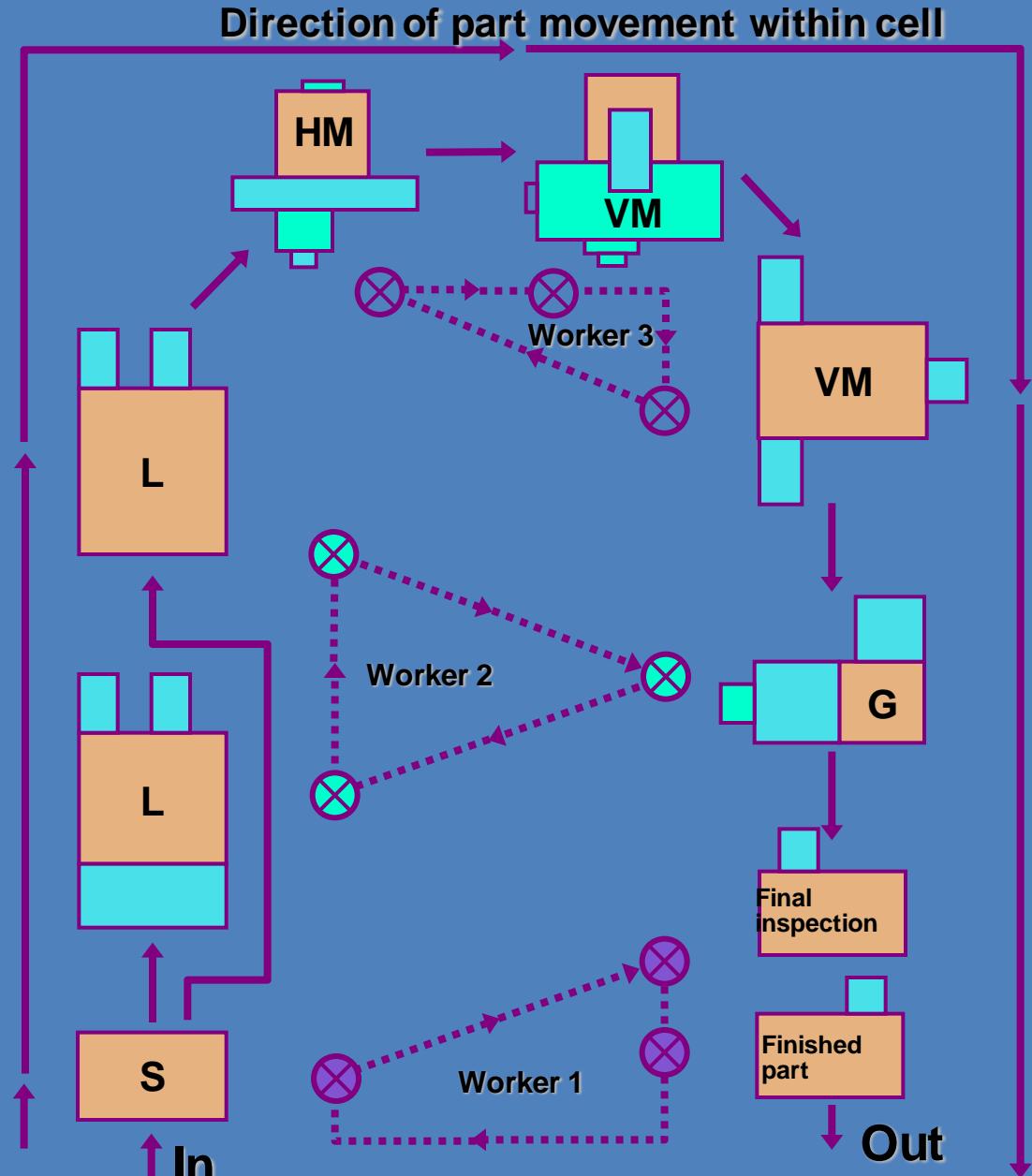
S = Saw

L = Lathe

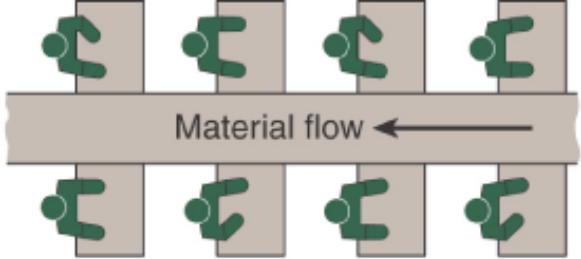
HM = Horizontal milling machine

VM = Vertical milling machine

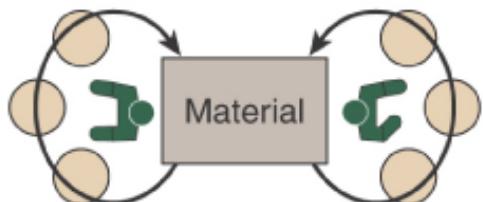
G = Grinder



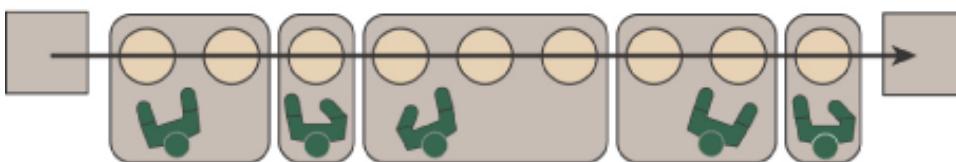
# Amélioration de la flexibilité de la ligne d'assemblage



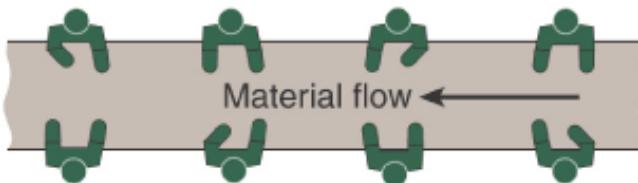
Bad: Operators caged. No chance to trade elements of work between them.  
(subassembly-line layout common in American plants)



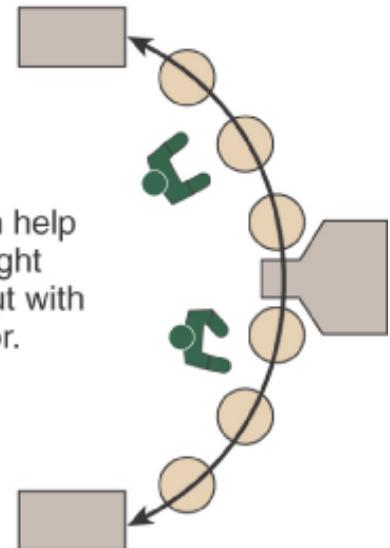
Bad: Operators birdcaged. No chance to increase output with a third operator.



Bad: Straight line difficult to balance.



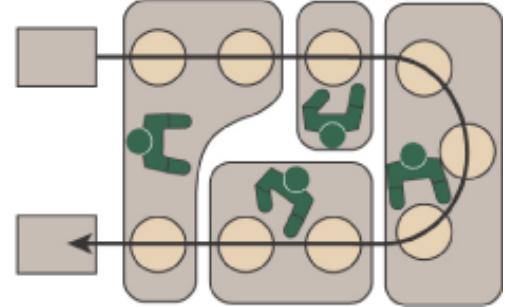
Better: Operators can trade elements of work. Can add and subtract operators. Trained ones can nearly self-balance at different output rates.



Better: Operators can help each other. Might increase output with a third operator.



Better: One of several advantages of U-line is better operator access. Here, five operators were reduced to four.



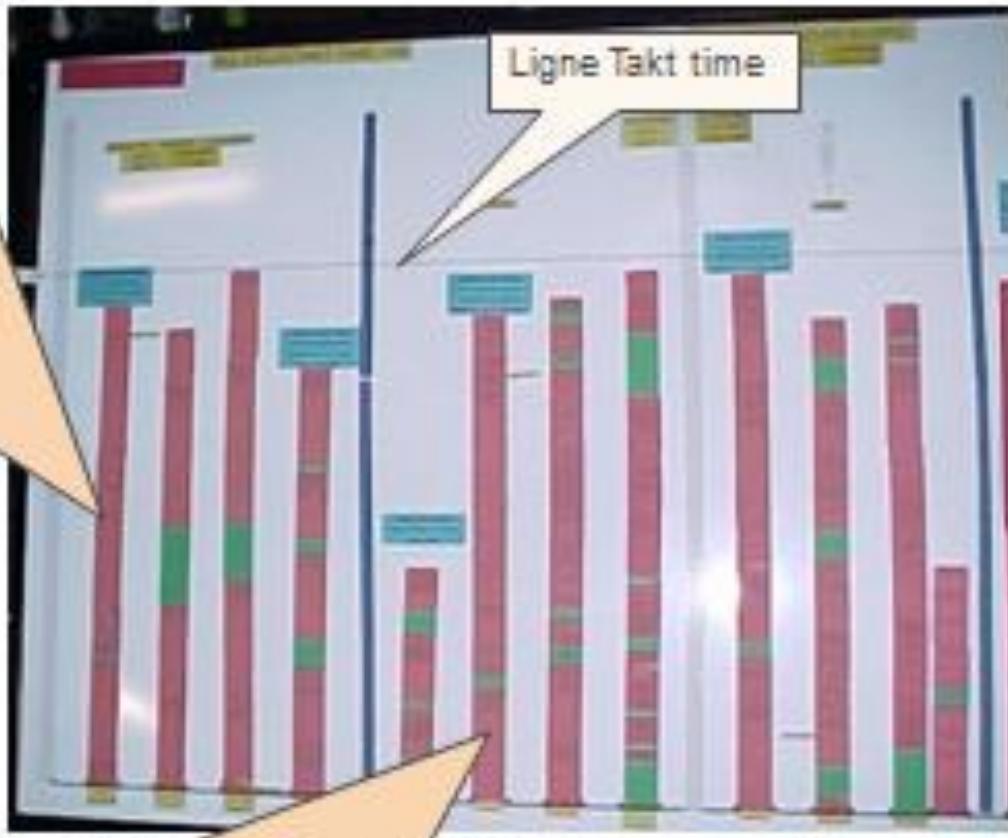
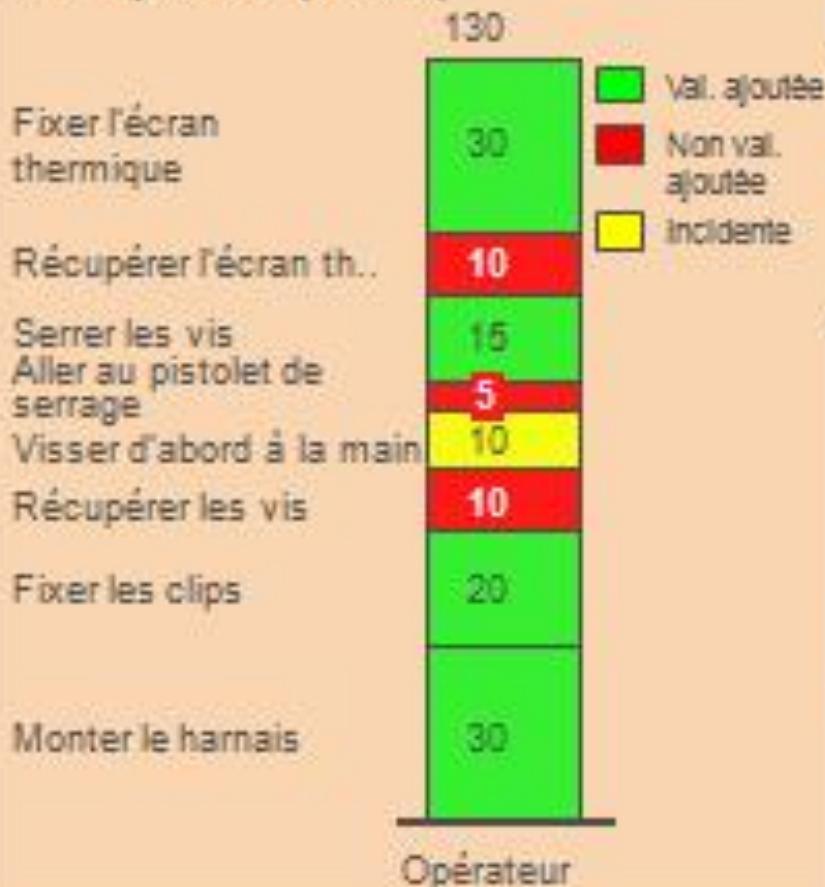
# Exemple Style Med

---



# Graphes de YAMAZUMI

Exemple d'une charge de travail détaillée d'un opérateur (en sec.)



Les fiches papier (ex : Post-It) définissent une tâche donnée, avec description succincte du travail correspondant, et leur taille représente le Temps de Cycle\* (vert pour tâche à VA, rouge pour NVA et jaune pour tâches annexes)

\* Les temps de cycle utilisés doivent être les temps de cycle minimum répétables

# Étude d'équilibrage des lignes d'assemblage

---

- ✓ Les étapes d'une étude d'équilibrage de ligne
- ✓ Les contraintes d'antériorités
- ✓ Matrice et Graphe d'antériorité

# Problème d'équilibrage des lignes d'assemblage

---

- Le problème d'équilibrage des lignes est N-P difficile (non Polynomial difficile)  
(c-à-d qu'il n'existe aucune méthode d'optimisation). Le problème est résolu par des approches heuristiques qui ne garantissent pas l'optimalité.  
Ces Heuristiques sont basées sur le bon sens et non pas sur des preuves mathématiques. Elles ne garantissent donc pas une solution optimale, mais donnent de bons résultats qui approchent la solution optimale

# Étapes d'une étude d'équilibrage de ligne (1/2)

---

1. Diviser le travail en éléments de travail indivisibles (**opérations**);
2. établir leurs durées
3. Établir les **contraintes d'antériorités**;
4. Calculer le **Temps de cycle** (Takt Time) requis: on va travailler avec  $Tm=Tc-Tr$ ; Tr est le temps de repositionnement
5. Calculer le nombre de stations minimal requis n (théorique), et l'efficacité d'équilibrage maximale.
6. Établir le graphe des antériorités
7. En utilisant une **approche heuristique**, affecter les opérations aux stations de travail telles que :
  - *La charge de travail de chaque station est inférieure ou égale au temps menant;*
  - *Toutes les contraintes d'antériorité sont respectées.*
8. Calculer l'efficacité d'équilibrage obtenue
  - *On peut essayer d'autres méthodes et les comparer pour obtenir un meilleur résultat*

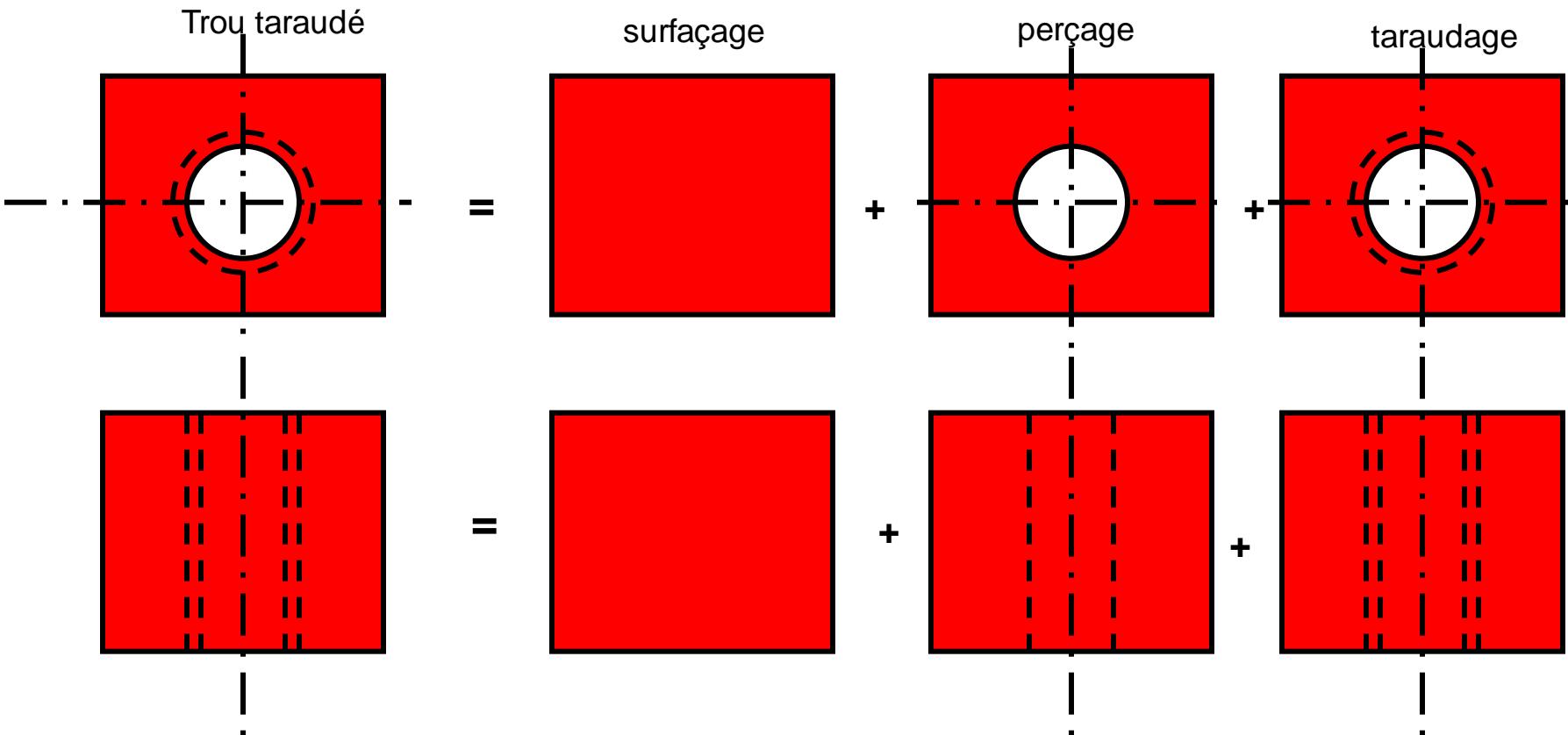
# Durées des opérations

---

- Opérations manuelles
  - Cf cours étude des temps
    - *Estimations : analytique , historique*
    - *Le chronométrage*
    - *Les standards des temps (MOST, ...)*
    - *Méthode des observations instantanées*
    - ...
- Opérations d'usinage :
  - Durées technologiques d'usinage ...

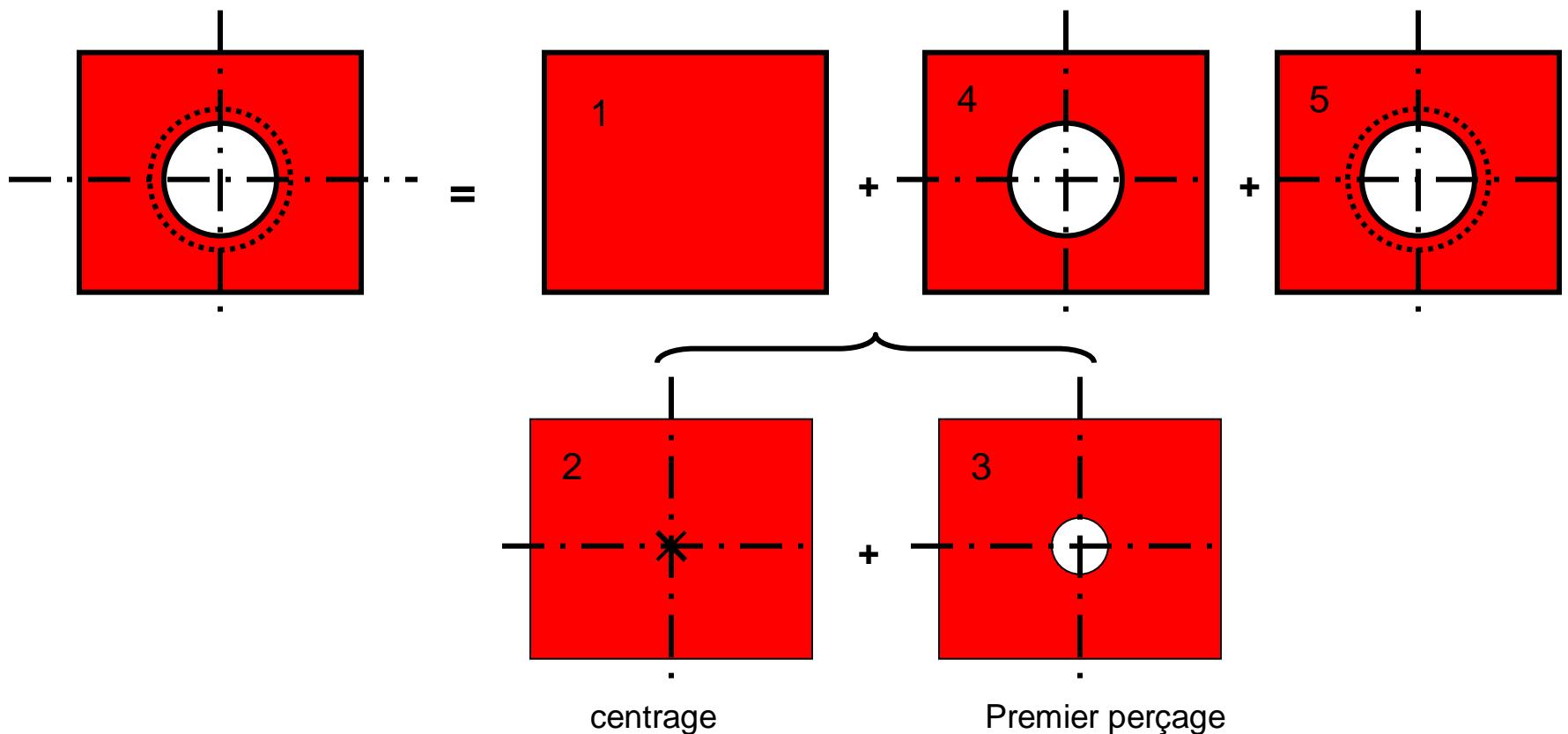
# Les contraintes d'antériorité

- Exemple fabrication: ordre « logique des opérations »;



# Les contraintes d'antériorité

- Ça peut être encore plus compliqué



# Équilibrage d'une ligne : exemple simple

- L'entreprise « AAA » fonctionne 8Hr par jour (480 minutes), La demande journalière est 1200 p/jr, La gamme de production de ce produit est donnée dans le tableau suivant, Définir les postes de travail de la ligne de production

| opération | Durée d'opération (min) | antériorités     |
|-----------|-------------------------|------------------|
| a         | <b>0.20</b>             | -                |
| b         | <b>0.37</b>             | <b>a</b>         |
| c         | <b>0.21</b>             | <b>a</b>         |
| d         | <b>0.18</b>             | <b>a</b>         |
| e         | <b>0.19</b>             | <b>c &amp; d</b> |
| f         | <b>0.39</b>             | <b>b &amp; e</b> |
| g         | <b>0.36</b>             | <b>f</b>         |
| Total     | <b>Twc = 1.90</b>       |                  |

# Matrice des antériorités

---

- Méthode systématique pour établir le graphe des antériorités

|   | a | b | c | d | e | f | g |  |  |  |  |  |
|---|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|
| a |   |   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |
| b |   |   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |
| c |   |   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |
| d |   |   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |
| e |   |   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |
| f |   |   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |
| g |   |   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |

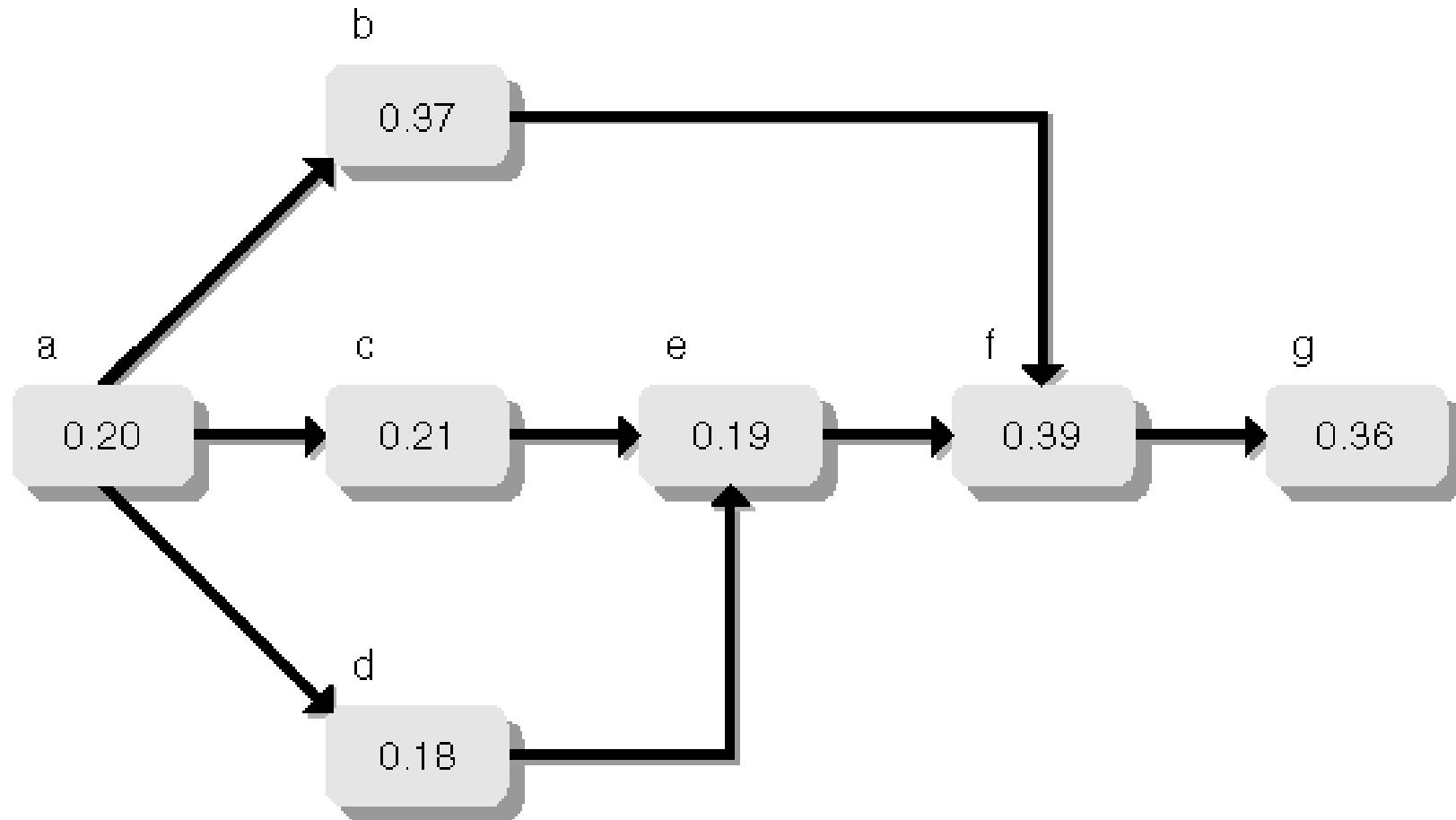
# Matrice des antériorités

---

- Résultat

|   | a | b | c | d | e | f | g | etape1 | etape2 | etape3 | etape4 | etape5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| a |   |   |   |   |   |   |   | 0      |        |        |        |        |
| b | 1 |   |   |   |   |   |   | 1      | 0      |        |        |        |
| c | 1 |   |   |   |   |   |   | 1      | 0      |        |        |        |
| d | 1 |   |   |   |   |   |   | 1      | 0      |        |        |        |
| e |   |   | 1 | 1 |   |   |   | 2      | 2      | 0      |        |        |
| f |   | 1 |   |   | 1 |   |   | 2      | 2      | 1      | 0      |        |
| g |   |   |   |   |   | 1 |   | 1      | 1      | 1      | 1      | 0      |

# Graphe des antériorités



# Calculs

---

Tc : Temps de cycle

$$Tc = (8 \times 60) / 1200 = 0.4 \text{ min/pièce}$$

Donc le Nombre minimal des stations de travail  
de la ligne

$$n = Twc / Tc$$

$$= \min \text{ integer } \geq (1.9 \text{ min} / 0.4 \text{ min})$$

= 5 stations

# Méthode Largest-candidate rule

---

- PROCEDURE

étape 1: classer toutes les opérations dans l'ordre décroissant des durées  $t_i$ .

étape 2: commencer par le haut et choisir une opération qui satisfait les contraintes d'antériorités et dont la somme avec les autres durées des opérations de la station n'excède pas le temps menant  $T_m$ .

Étape 3: Appliquer l'étape 2 jusqu'à ce que aucune autre opération ne peut être ajoutée sans dépasser  $T_m$ .

Étape 4: répéter l'étape 2 et 3 pour les autres stations jusqu'à l'affectation de toutes les opérations.

# Affectation des opérations aux postes

On suppose le Temps de repositionnement  $Tr=0$

Donc le Temps Menant  $Tm = Tc - Tr$

$Tm$  sera la limite à respecter pour toutes les stations

$Ts = \max(\sum Ti) \leq Tm$

$Tm$  = limite imposée,  $Ts$  temps obtenu

On suppose dans cet exemple  $Tr = 0$

| Nr° Poste | Temps disponible | Operations eligible | Convient? | Affectation de l'op | Temps Perdu |
|-----------|------------------|---------------------|-----------|---------------------|-------------|
| 1         | <b>0.4</b>       | <b>A</b>            | <b>A</b>  | <b>A</b>            | <b>0.20</b> |
|           | <b>0.2</b>       | <b>B,C,D</b>        | <b>D</b>  | <b>D</b>            | <b>0.02</b> |
| 2         | <b>0.4</b>       | <b>B,C</b>          | <b>B</b>  | <b>B</b>            | <b>0.03</b> |
| 3         | <b>0.4</b>       | <b>C</b>            | <b>C</b>  | <b>C</b>            | <b>0.19</b> |
|           | <b>0.19</b>      | <b>E</b>            | <b>E</b>  | <b>E</b>            | <b>0.00</b> |

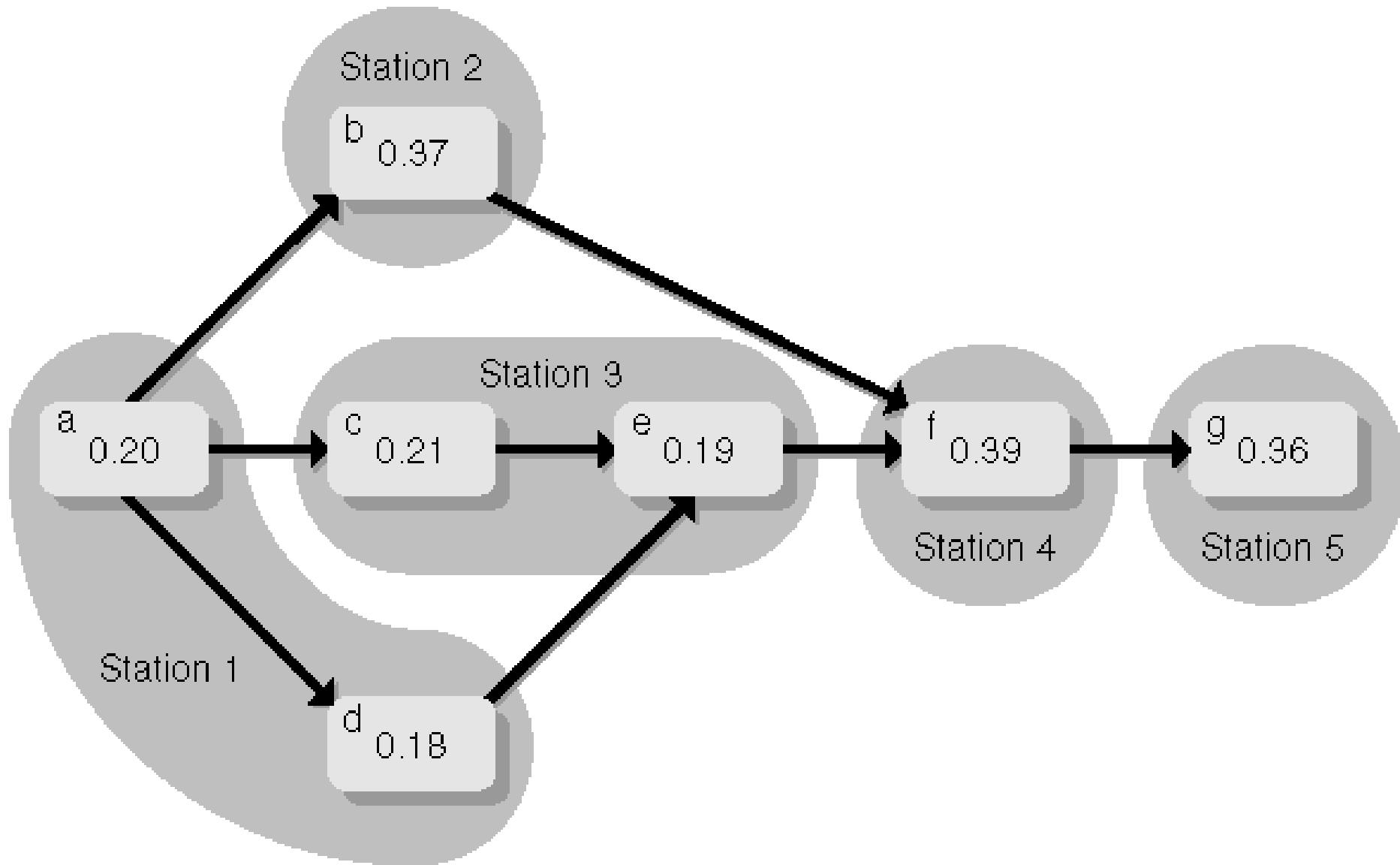
# Affectation des opérations aux postes (suite)

| Nr° Poste | Temps disponible | Operations eligible | Convient ? | Affectation de l'op | Temps Perdu |
|-----------|------------------|---------------------|------------|---------------------|-------------|
| 4         | <b>0.4</b>       | <b>F</b>            | <b>F</b>   | <b>F</b>            | <b>0.01</b> |
| 5         | <b>0.4</b>       | <b>G</b>            | <b>G</b>   | <b>G</b>            | <b>0.04</b> |

**Nb station obtenu m = n (théorique) = 5**

**Efficacité d'équilibrage Eb = 1.9 / (5 x 0.4) = 95%**

# Définition des stations



# III- Équilibrage des lignes : Quelques Algorithmes classiques pour SALBP

---

- ✓ SALB1 & SALB2
- ✓ Méthode Helgeson & Birnie
- ✓ Méthode Kilbridge & Wester
- ✓ Méthode COMSOAL

# SALBP

---

- SALBP : Simple Assembly Line Balancing Problem
- Caractéristiques:
  - a. Tous les paramètres d'entrée sont connus avec certitude;
  - b. Une opération ne peut être partagée entre plusieurs stations
    - (*opération = élément de travail indivisible*)
  - c. Il existe un ordre partiel sur les opérations
    - (*contraintes d'antériorités*)
  - d. Toutes les opérations doivent être exécutées
  - e. Toutes les stations sont en mesure d'exécuter n'importe quelle opération
    - *Conception d'une nouvelle ligne Transfert (fabrication)*
    - *Assemblage : opérations manuelles → flexibilité*

# SALBP : Caractéristiques (suite)

---

- f. Les temps opératoires sont indépendants des stations sur lesquelles les opérations sont exécutées et des tâches qui précédent;
- g. Toutes les opérations peuvent être exécutées sur n'importe quelle station;
- h. Les stations sont visitées dans un ordre donné
  - *Fabrication en ligne* ;
- i. Un seul produit est concerné par la ligne considéré
  - *SALB : Ligne simple!*
- j. Soit le Temps de Cycle (cadencement) est imposé, ou bien le nombre de station maximal

# SALB1 & SALB2

---

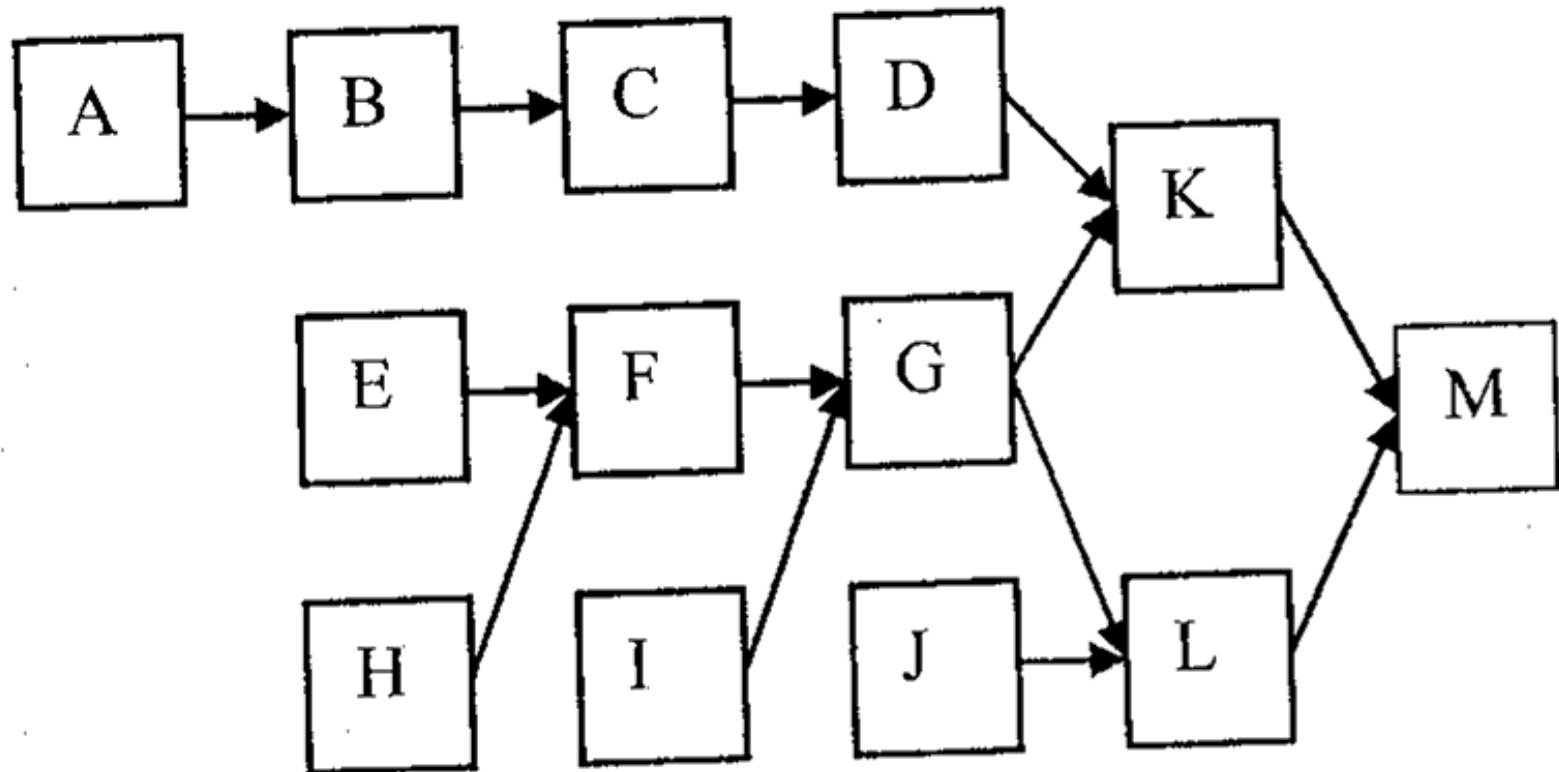
- Algorithmes basés sur le bon sens
  - Solutions non optimisés !
- 
- SALB1 :
    - *Hypothèse : Temps de cycle (cadencement) connu*
    - *On cherche : nombre de stations*
  - SALB2 :
    - *Hypothèse : Nombre de stations maximal imposé*
    - *On cherche : temps de cycle*

# EXEMPLE : les données

✓ On donne les temps opératoires (min) et la liste des antériorités

| Opérations            | A  | B  | C    | D       | E | F    | G    | H  | I | J  | K    | L    | M    |
|-----------------------|----|----|------|---------|---|------|------|----|---|----|------|------|------|
| Temps opératoires     | 10 | 15 | 18   | 10      | 5 | 6    | 14   | 12 | 9 | 15 | 15   | 20   | 4    |
| Prédécesseurs directs |    | A  | B, A | C, B, A |   | E, H | F, I |    |   |    | D, G | G, J | K, L |

# EXEMPLE : graphe d'antériorités



# Algorithme SALB1 : cas où le cadencement est imposé

1. On pose  $i = 1$ .
  - En sortie de programme,  $i$  contiendra le nombre de stations nécessaires
2. Construire  $Q$  :
  - $Q = \text{ensemble des opérations qui n'ont pas de prédécesseurs ou dont les prédécesseurs ont déjà été placés}$
3. Examiner les éléments de  $Q$  dans l'ordre décroissant de leur durée, et sélectionner la première opération de  $Q$  qui peut être prise en charge par la station  $i$ ;
4. Si une telle opération existe :
  1. L'affecter à  $i$  ;
  2. Remettre à jour le temps opératoire disponible dans  $i$ ;
  3. S'il reste des opérations à affecter, retourner en 2, sinon, fin de programme
5. Si aucune opération n'a été sélectionnée, faire  $i=i+1$  et retourner en 3

# Application de SALB1 à l'exemple

---

- Appliquer SALB1 à l'exemple tel que le cadencement  $T_c$  imposé : 50 min
- On suppose que le temps de repositionnement  $T_r = 0$  donc  $T_m = 50$  min
- Calculer l'efficacité d'équilibrage obtenue, qu'est ce que vous en pensez?

# Algorithme SALB2 : cas où le nombre maximal de stations est imposé (1/3)

1. Introduire le nombre N de stations souhaitées
2. Poser n = N
  - La variable n contiendra le nombre de stations non encore utilisées;
3. Poser R= {ensemble des opérations}
  - R contiendra l'ensemble des opérations non encore affectées;
4. Calculer la charge moyenne Cm des stations non utilisées:
  - $C_m = (\text{somme des temps opératoires des opérations de } R) / \text{Max}(n,1)$
  - Au premier passage, n = N;
5. Poser  $C^* = C_m$  et  $C_d = C_m$ 
  - $C^*$  sera la période associée au cadencement et  $C_d$  sera la période de travail disponible dans la station en cours de traitement
6. Chercher l'ensemble  $S \subset R$  des opérations sans prédecesseur ou dont tous les prédecesseurs ont été affectés à une station. Si cet ensemble est vide, fin de programme
7. Classer les opérations de S par ordre décroissant des temps opératoires.

# Algorithme SALB2 (suite 2/3)

8. Explorer les opérations de S dans l'ordre précédent:
  1. Si tous les temps opératoires rencontrés sont supérieurs à Cd, c-à-d si aucune opération ne peut être affectée à la station en cours de traitement:
    - a. **Faire  $n = n-1$**
    - b. **Calculer  $C_m$**
    - c. ***Si  $C_m > C^*$ , recommencer les calculs avec  $C_m$  comme nouvelle période de cadencement (Temps menant). Pour cela:***
      - i. **Faire  $C^*=C_m$  tq  $C^*$  est la nouvelle période associée au cadencement**
      - ii. **Faire  $C_d = C^*$  tq  $C_d$  est le temps dont on peut disposer sur la station 1**
      - iii. **Poser  $n = N$**
      - iv. **Poser  $R = \{\text{ensemble des opérations}\}$**
      - v. **Aller à l'étape n° 6**
    - d. ***Si  $C_m < C^*$ , passer à la station suivante***
      - i. **Faire  $C_d=C^*$**
      - ii. **Aller en 6**

# Algorithme SALB2 (suite 3/3)

2. S'il existe au moins une opération de la suite dont le temps opératoire est inférieur ou égal à Cd, alors affecter à la station la première opération rencontrée qui satisfait cette condition
  - a. **Faire**  $Cd = Cd - \{\text{temps opératoire de l'opération affectée}\}$
  - b. **Éliminer l'opération affectée de R**
  - c. **Aller en 6**

- Appliquer SALB2 à l'exemple tel que le nombre maximal de stations est 5
- Calculer l'efficacité d'équilibrage obtenue, qu'est ce que vous en pensez?

# Méthode d'HELGESON & BIRNIE (H&B)

---

- Méthode RPW : Ranked Positionnal Weight
- PROCEDURE
  - construction d'un graphe d'antériorité
  - calcul des Indices de position (IP) par opération
  - classement des opérations selon l'indice de position (IP)
  - détermination du temps de cycle théorique et du nombre minimal de stations
  - affectation des opérations aux différentes stations par regroupement en commençant par la dernière station
  - calcul du temps de cycle et de la perte d 'équilibrage

# Exemple H&B

---

Données :

les opérations (éléments de travail indivisible) + leurs durées + les contraintes d' antériorités (précédences)

Temps de cadencement (Temps de cycle Tc) : dépend de la demande par période de temps

Temps de repositionnement (transfert poste à poste) Tr  
On en déduit le Temps menant

$$Tm = Tc - Tr = 1.0 \text{ min}$$

# Exemple H&B

On suppose que les opérations seront faites en série (et non en parallèle)  
C'est le cas des lignes de fabrication !

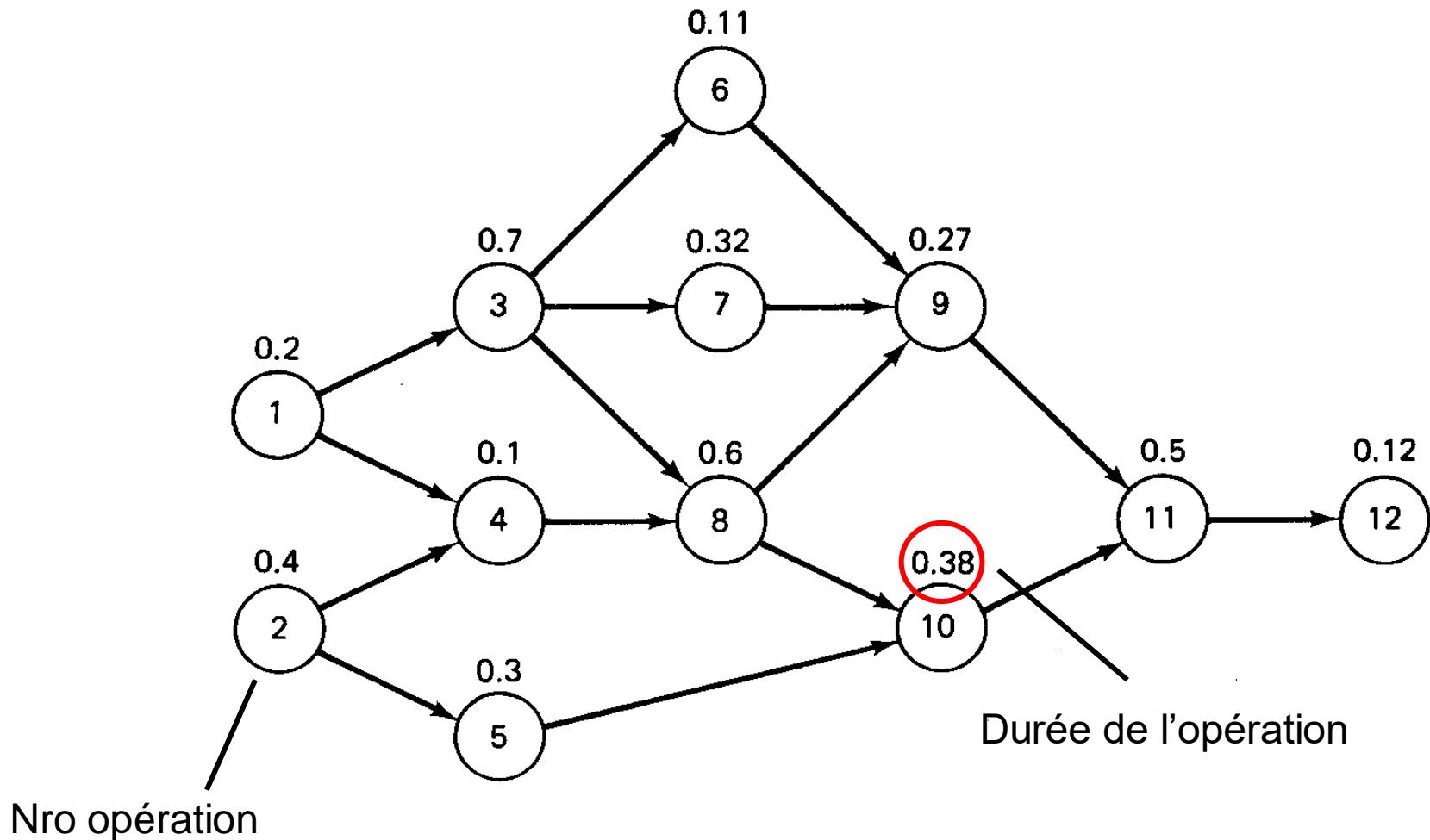
| No. | Description de l'opération           | Durées des opérations (min) | Précérences (antériorités) |
|-----|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1   | Place frame on workholder and clamp  | 0.2                         | —                          |
| 2   | Assemble plug, grommet to power cord | 0.4                         | —                          |
| 3   | Assemble brackets to frame           | 0.7                         | 1                          |
| 4   | Wire power cord to motor             | 0.1                         | 1, 2                       |
| 5   | Wire power cord to switch            | 0.3                         | 2                          |
| 6   | Assemble mechanism plate to bracket  | 0.11                        | 3                          |
| 7   | Assemble blade to bracket            | 0.32                        | 3                          |
| 8   | Assemble motor to brackets           | 0.6                         | 3, 4                       |
| 9   | Align blade and attach to motor      | 0.27                        | 6, 7, 8                    |
| 10  | Assemble switch to motor bracket     | 0.38                        | 5, 8                       |
| 11  | Attach cover, inspect, and test      | 0.5                         | 9, 10                      |
| 12  | Place in tote pan for packing        | 0.12                        | 11                         |

# Exemple H&B : matrice des antériorités

---

|    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 9  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 11 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 12 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

# Exemple H&B: Graphe des antériorités



# Exemple H&B : Calcul Indice de position IP

---

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

# Exemple H&B : Calcul Indice de position IP

|    | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6    | 7    | 8   | 9    | 10   | 11  | 12   | IP   |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| 1  | 0,2 |     |     |     |     |      |      |     |      |      |     |      | 0,2  |
| 2  |     | 0,4 |     |     |     |      |      |     |      |      |     |      | 0,4  |
| 3  | 0,2 |     | 0,7 |     |     |      |      |     |      |      |     |      | 0,9  |
| 4  | 0,2 | 0,4 |     | 0,1 |     |      |      |     |      |      |     |      | 0,7  |
| 5  |     | 0,4 |     |     | 0,3 |      |      |     |      |      |     |      | 0,7  |
| 6  | 0,2 |     | 0,7 |     |     | 0,11 |      |     |      |      |     |      | 1,01 |
| 7  | 0,2 |     | 0,7 |     |     |      | 0,32 |     |      |      |     |      | 1,22 |
| 8  | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,1 |     |      |      | 0,6 |      |      |     |      | 2    |
| 9  | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,1 |     | 0,11 | 0,32 | 0,6 | 0,27 |      |     |      | 2,7  |
| 10 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,1 | 0,3 |      |      | 0,6 |      | 0,38 |     |      | 2,68 |
| 11 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,1 | 0,3 | 0,11 | 0,32 | 0,6 | 0,27 | 0,38 | 0,5 |      | 3,88 |
| 12 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,1 | 0,3 | 0,11 | 0,32 | 0,6 | 0,27 | 0,38 | 0,5 | 0,12 | 4    |

# Exemple H&B : Classement par IP

---

Par ordre décroissant des IP

| N° Op | IP   | durée opération |
|-------|------|-----------------|
| 12    | 4    | 0,12            |
| 11    | 3.88 | 0,5             |
| 9     | 2,7  | 0,27            |
| 10    | 2.68 | 0,38            |
| 8     | 2    | 0,6             |
| 7     | 1,22 | 0,32            |
| 6     | 1,01 | 0,11            |
| 3     | 0,9  | 0,7             |
| 4     | 0,7  | 0,1             |
| 5     | 0,7  | 0,3             |
| 2     | 0,4  | 0,4             |
| 1     | 0,2  | 0,2             |

# Exemple H&B : définition des stations de travail

Limite  $T_m = 1.0$

| N° station | description de la tâche | durée de l'opération | durée cumulée Dc de la tâche | Reste : $T_m - Dc$ |
|------------|-------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|
| 1          | 12                      | 0,12                 | 0,12                         | 0,88               |
|            | 11                      | 0,5                  | 0,62                         | 0,38               |
|            | 9                       | 0,27                 | 0,89                         | 0,11               |
| 2          | 10                      | 0,38                 | 0,38                         | 0,62               |
|            | 8                       | 0,6                  | 0,98                         | 0,02               |
| 3          | 7                       | 0,32                 | 0,32                         | 0,68               |
|            | 6                       | 0,11                 | 0,43                         | 0,57               |
| 4          | 3                       | 0,7                  | 0,7                          | 0,3                |
|            | 4                       | 0,1                  | 0,8                          | 0,2                |
| 5          | 5                       | 0,3                  | 0,3                          | 0,7                |
|            | 2                       | 0,4                  | 0,7                          | 0,3                |
|            | 1                       | 0,2                  | 0,9                          | 0,1                |

# Exemple H&B : calcul efficacité d'équilibrage

---

- $E_b = T_{wc} / (m * T_s)$ 
  - Nombre de station obtenu =  $m = 5$
  - $T_s$  obtenu = 0.98 min (attention,  $T_s$  n'est pas égal à  $T_m$ )
  - $T_{wc} = 4$  min
- $E_b = 4 \text{ min} / 5 \text{ min} = 82 \%$

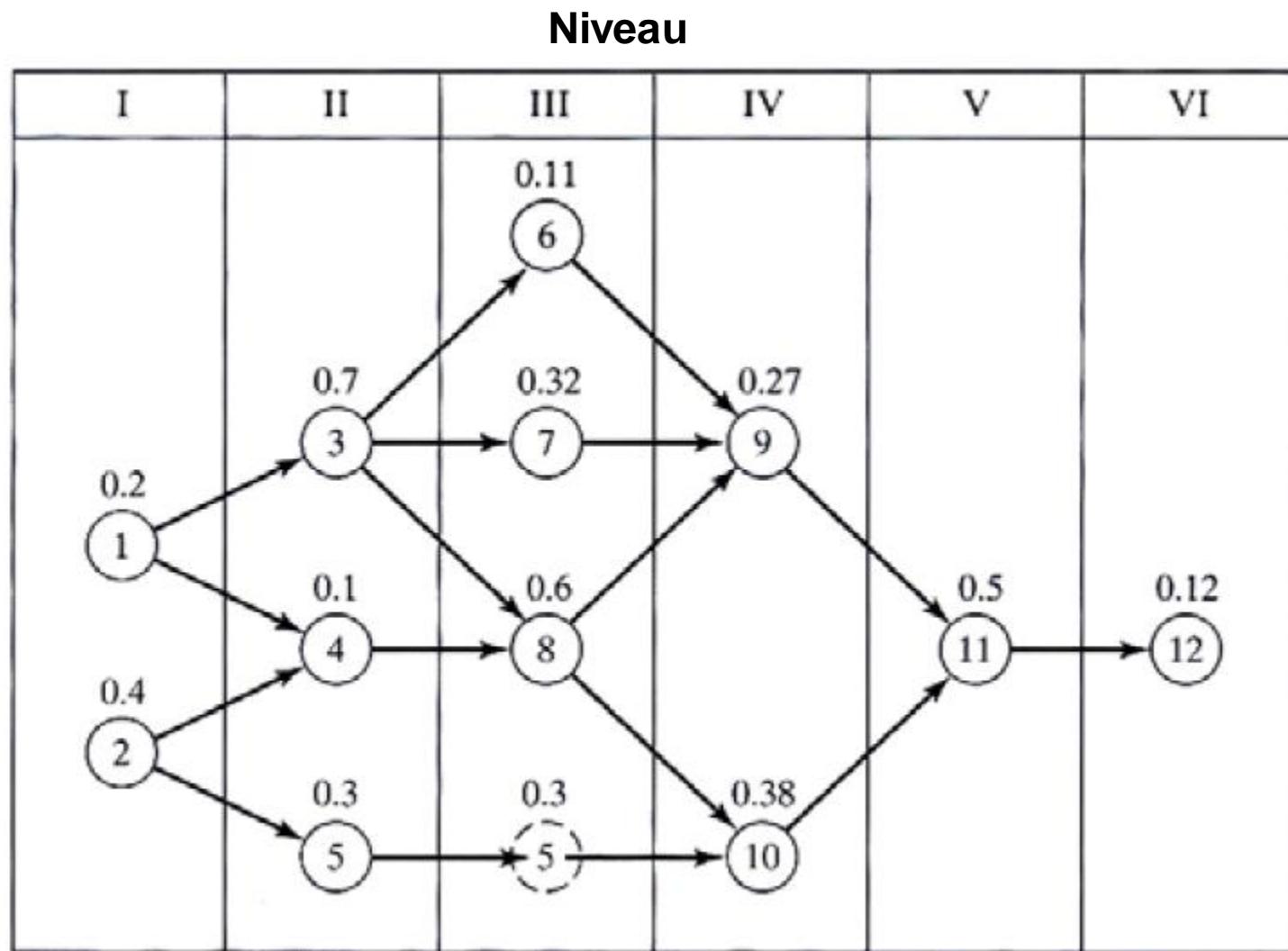
# Méthode Kilbridge & Wester (K&W)

---

- Les opérations sont organisées en niveaux. Le premier niveau contient les opérations sans prédecesseur, le second niveau contient les opérations dont les prédecesseurs appartiennent au niveau 1, le troisième niveau contient les opérations dont les prédecesseurs appartiennent au niveau 2, et ainsi de suite jusqu'à épuisement de toutes les opérations.
- Les affectations au stations sont alors effectuées dans l'ordre croissant des niveaux de manière à minimiser les périodes de disponibilité des stations. Les opérations du même niveau sont organisées par ordre décroissant de leurs durées.
- Bien entendu, il est toujours possible d'aller puiser dans le niveau supérieur pour compléter la charge d'une station, à condition que l'opération choisie au niveau supérieur n'ait pas de prédecesseur non affecté au niveau courant.

# Exemple K&W

- Décomposition en niveaux selon la méthode K&W ( $T_m = 1 \text{ min}$ )



# Exemple K&W

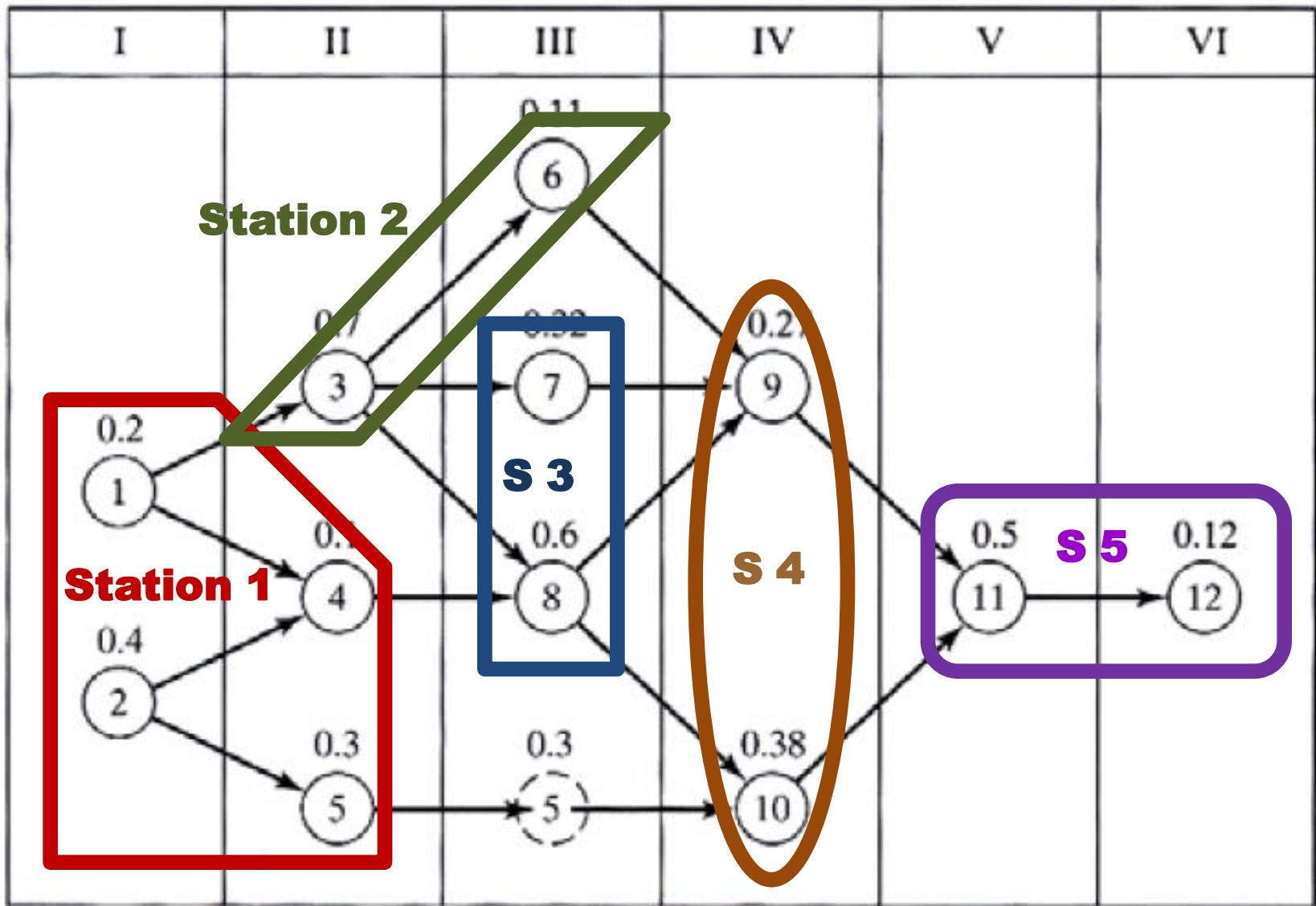
---

| N° opération | Niveau  | Tsi (min) | antériorité |
|--------------|---------|-----------|-------------|
| 2            | I       | 0.4       | -           |
| 1            | I       | 0.2       | -           |
| 3            | II      | 0.7       | 1           |
| 5            | II, III | 0.3       | 2           |
| 4            | II      | 0.1       | 1,2         |
| 8            | III     | 0.6       | 3,4         |
| 7            | III     | 0.32      | 3           |
| 6            | III     | 0.11      | 3           |
| 10           | IV      | 0.38      | 5,8         |
| 9            | IV      | 0.27      | 6,7,8       |
| 11           | V       | 0.5       | 9,10        |
| 12           | VI      | 0.12      | 11          |

# Exemple K&W : affectation des opérations aux stations

| N° station | N° opération | niveau | Tsi (min) | Durée station (min) |
|------------|--------------|--------|-----------|---------------------|
| 1          | 2            | I      | 0.4       |                     |
|            | 1            | I      | 0.2       |                     |
|            | 5            | II     | 0.3       |                     |
|            | 4            | II     | 0.1       | 1.0                 |
| 2          | 3            | II     | 0.7       |                     |
|            | 6            | III    | 0.11      | 0.81                |
| 3          | 8            | III    | 0.6       |                     |
|            | 7            | III    | 0.32      | 0.92                |
| 4          | 10           | IV     | 0.38      |                     |
|            | 9            | IV     | 0.27      | 0.65                |
| 5          | 11           | V      | 0.5       |                     |
|            | 12           | VI     | 0.12      | 0.62                |

# Exemple K&W : solution



# APPLICATION de H&B et K&W

---

On veut concevoir une ligne d'assemblage. On donne les opérations à réaliser, les durées en secondes et les contraintes d'antériorité. La ligne fonctionnera 7Hrs par jour. La production requise est 1680 unités par jour. L'efficacité de la ligne est supposée 100%.

1. Etablir le graphe des antériorités pour cette ligne d'assemblage ;
2. Trouver le temps de cycle (cadencement)de cette ligne ;
3. Trouver le nombre minimal (idéal) requis de stations de cette ligne ;
4. En utilisant la méthode de Kilbridge et Wester, trouver le nombre de stations réel requis et l'affectation réelle des opérations aux différentes stations.
5. Calculer l'efficacité d'équilibrage obtenue.
6. Refaire la question 4 avec la méthode d'Helgeson et Birnie.

# APPLICATION de H&B et K&W

| Opération | Durée (secondes) | antériorités  |
|-----------|------------------|---------------|
| 1         | 14               | AUCUNE        |
| 2         | 10               | 1             |
| 3         | 15               | 2             |
| 4         | 15               | 2             |
| 5         | 03               | AUCUNE        |
| 6         | 05               | 5             |
| 7         | 13               | 6             |
| 8         | 14               | 6             |
| 9         | 14               | 6             |
| 10        | 06               | 3, 4, 7, 8, 9 |
| 11        | 07               | 10            |
| 12        | 03               | 11            |
| 13        | 04               | 12            |
| 14        | 07               | 13            |

# Critère de choix de la meilleure solution

---

- La meilleure solution est , à priori, celle qui aboutit au nombre minimal de stations pour une productivité donnée, c'est-à-dire une période de cadencement connue. Cependant, plusieurs solutions peuvent aboutir au même nombre de stations avec une répartition différente des opérations dans les stations. Il est donc possible d'introduire un critère secondaire pour affiner le choix. Ce critère peut être, par exemple, la minimisation du coefficient de déviation maximale (CDM) qui conduit à une charge plus uniforme des différentes stations engagées.
- Le CDM est le maximum des périodes d'inactivité dans les différentes stations.
- Nous pourrions également choisir comme critère secondaire une diversité d'opérations équivalentes dans chaque station pour assurer un effort d'adaptation équivalent pour tous les travailleurs.

# Coefficient de déviation Maximale CDM

---

- Il mesure l'écart maximal (en pourcentage) entre la charge des stations et leur capacité

$$CDM = 100 * \frac{\left( \max_{i \in S} (T_s - T_{si}) \right)}{T_s}$$

- Tels que

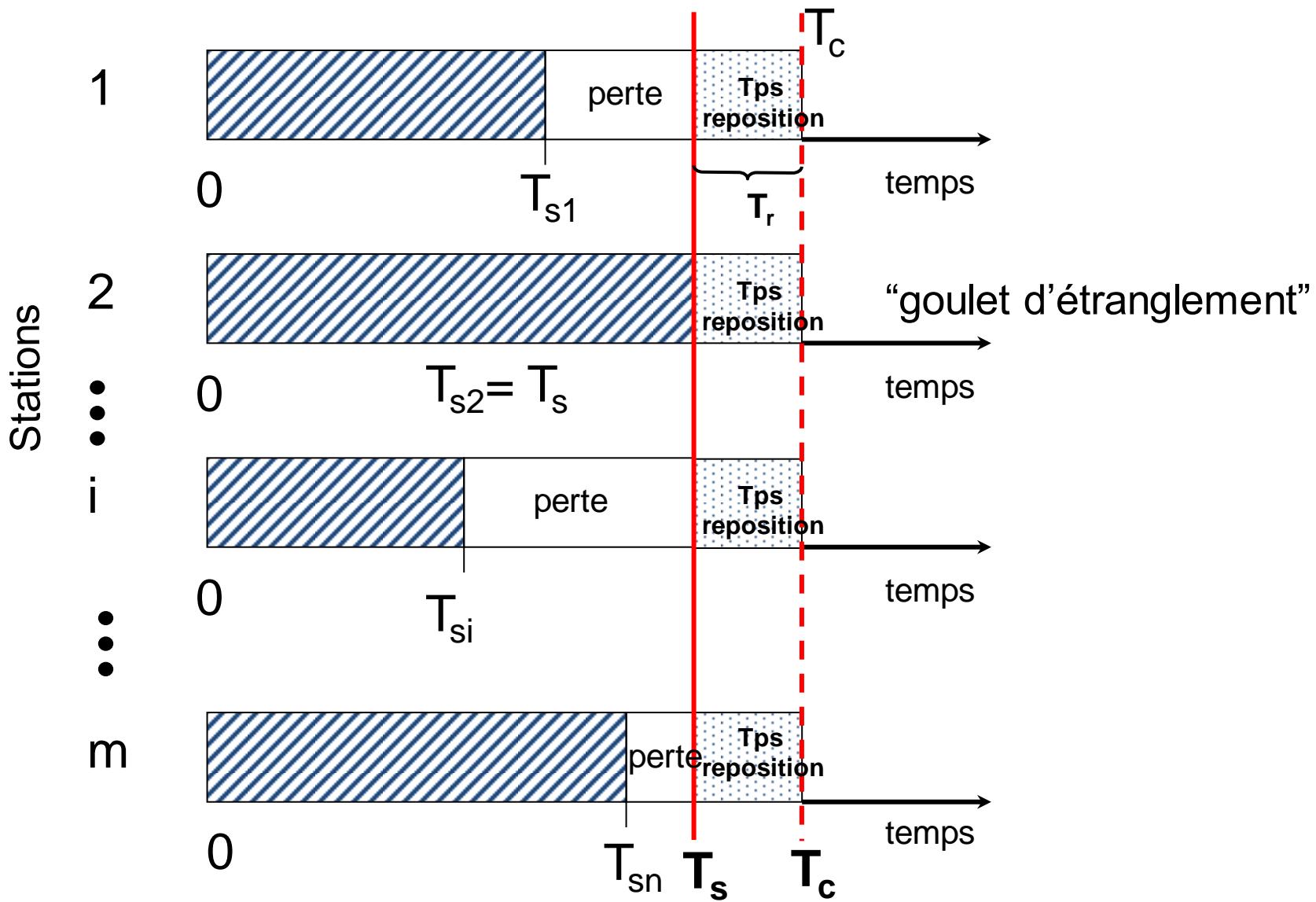
$T_s$  = Temps de la station la plus lente (obtenu)

$T_{si}$  = temps de la station N°i

S = {ensemble des stations}

- Remarque :** Le CDM est , à lui seul, un critère qui tend généralement à minimiser le nombre de stations pour une période de cadencement donnée. En effet, minimiser CDM conduit à minimiser, en général, le total des temps d'inactivité dans les stations et , par voie de conséquence, le nombre de stations utilisées. (Dans le cas où la période de cadencement (Takt) est imposée.

# Rappel : $T_s$ et temps des stations $T_{si}$



# Méthode COMSOAL

---

- COMSOAL = *Computer Method for sequencing operations for assembly lines*  
*(méthode informatique pour ordonner les opérations d'une ligne d'assemblage)*
- *C'est une amélioration de SALB1*
  - *Les opérations non encore affectées, et qui, soit n'ont pas de prédecesseur direct, soit ont des prédecesseurs directs qui sont tous affectés, sont choisies au hasard, avec une probabilité égale à l'inverse du nombre d'opérations concernées par ce choix;*
  - *L'algorithme est relancé un grand nombre de fois, et la meilleure solution est conservée.*
    - *Le choix aléatoire des opérations candidates à l'affectation permet en effet de générer des solutions qui peuvent être différentes à chaque lancement. Le nombre de lancements décidés peut être, par exemple, égal à 1000.*

# Algorithme COMSOAL

1. Pour  $k = 1$  à  $M$  ( $M$  est le nombre de placements testés) faire:
  1. On pose  $i = 1$ 
    - En sortie de programme,  $i$  contendra le nombre de stations nécessaires
  2. On pose  $P^* = P$  et  $i^* = 1$ 
    - $P$  est le temps menant  $T_m$  (associé au cadencement),  $i^*$  prendra comme valeur le nombre minimal de stations à la sortie de l'algorithme
  3. Construire  $Q$ 
    - $Q$  = ensemble des opérations dont les temps opératoires sont inférieurs au temps disponible sur la station en cours, et qui n'ont pas de prédécesseur ou dont les prédécesseurs ont déjà été placés
  4. Si  $Q = \emptyset$  aller à l'étape 1-9
    - On désignera par  $S$  la solution obtenue à l'issue du traitement courant, c-à-d la répartition des opérations dans les stations
  5. Choisir un élément  $q$  de  $Q$  au hasard. Soit  $t_q$  la durée de l'opération  $q$
  6. Affecter  $q$  à la station  $i$

# Algorithme COMSOAL

7. Poser  $P^* = P^* - tq$
8. Retourner à l'étape 1-3
9. Calculer CD : coefficient de déviation maximale
10. Si  $k=1$ 
  - a. Faire  $CD^* = CD$  et  $i^* = i$
  - b. Faire  $S^* \leftarrow S$  (on stocke la solution dans  $S^*$ )
11. Si ( $k>1$ ) et [ $\{i < i^*\}$  ou  $\{(CD < CD^*) \text{ et } (i = i^*)\}$ ] alors:
  - a. Faire  $CD^* = CD$  et  $i^* = i$
  - b. Faire  $S^* \leftarrow S$  (on stocke la solution dans  $S^*$ )
2. Fin de boucle k
3. Imprimer  $S^*$  et les critères  $i^*$  et  $CD^*$  correspondants

Remarque : la qualité de la solution est, en probabilité, d'autant plus grande que le nombre d'itérations (la valeur du paramètre M de l'algorithme) est grand

# Application de l'algorithme COMSOAL

- On donne
  - La période liée au cadencement :  $T_m = 50$  unités de temps

| Opérations            | A  | B    | C | D    | E  | F | G       | H | I    | J  | K | L  | M | N    |
|-----------------------|----|------|---|------|----|---|---------|---|------|----|---|----|---|------|
| Temps opératoires     | 10 | 7    | 8 | 9    | 17 | 5 | 8       | 8 | 14   | 15 | 8 | 13 | 4 | 22   |
| Prédécesseurs directs |    | A, J | B | C, K | C  | C | F, D, L | E | G, H |    | J | K  | L | I, M |

# Application de l'algorithme COMSOAL

A la première itération, la solution obtenue conduisait à 4 stations et à un coefficient de déviation maximale de  $(28/50) \times 100 = 56\%$ , comme l'indique le tableau 6.2. L'importance de ce coefficient s'explique par le fait que la station 4 a dû être ouverte pour accueillir l'opération « orpheline » N.

| Stations | Opérations affectées | Temps non utilisé |
|----------|----------------------|-------------------|
| 1        | A, J, K, B, C        | 2                 |
| 2        | F, E, L, M, D        | 2                 |
| 3        | G, H, I              | 20                |
| 4        | N                    | 28                |

Tableau 6.2. Solution à la première itération

# Application de l'algorithme COMSOAL

L'affectation des opérations est schématisée dans la figure 6.1.

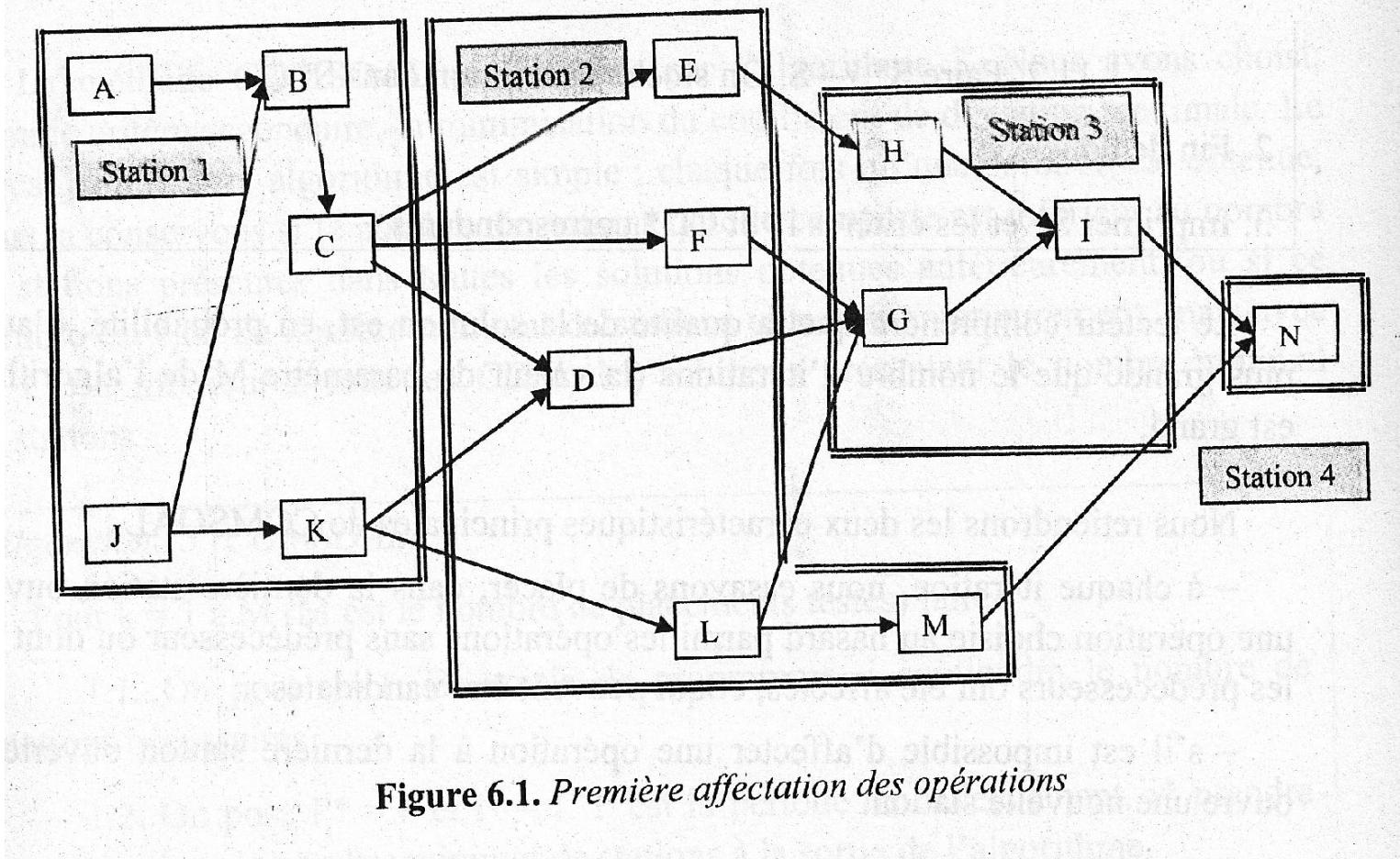


Figure 6.1. Première affectation des opérations

# Application de l'algorithme COMSOAL

La première et dernière amélioration a lieu à l'itération 11. Elle est importante puisque seulement 3 stations (au lieu de 4 précédemment) sont sollicitées. Sur l'ensemble des trois stations, seules deux unités de temps restent inutilisées. Comme la somme des temps non utilisés est inférieure à la période de cadencement, nous pouvons affirmer que la solution obtenue est optimale. La borne inférieure du nombre de stations est égale à 3. Cela confirme notre conclusion. Le tableau 6.3 donne la solution obtenue à l'issue de cette ultime amélioration. Le coefficient de déviation maximale est alors de  $(1/50) \times 100 = 2\%$ . La répartition des opérations sur les trois stations est représentée dans la figure 6.2.

| STATIONS | OPÉRATIONS AFFECTÉES | TEMPS NON UTILISÉ |
|----------|----------------------|-------------------|
| 1        | A, J, K, L, M        | 0                 |
| 2        | B, C, E, H, D        | 1                 |
| 3        | F, G, I, N           | 1                 |

Tableau 6.3. Dernière amélioration à l'itération 11

# Bibliographie : Les lignes d'assemblage

---

- (Dolgui & Proth, 2006) Dolgui A., Proth J-M., « les systèmes de production modernes », [2 volumes], ed. Lavoisier. 2006.
- (Groover, 2001) Groover. M., P., “Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing”, 2ième édition, Prentice-Hall, Inc., New Jersey 2001
- (Groover, 2007) Groover. M., P., Fundamentals of Modern Manufacturing : Materials Processes and systems, 3rd ed. John Wiley & Sons. Inc, 2007.