

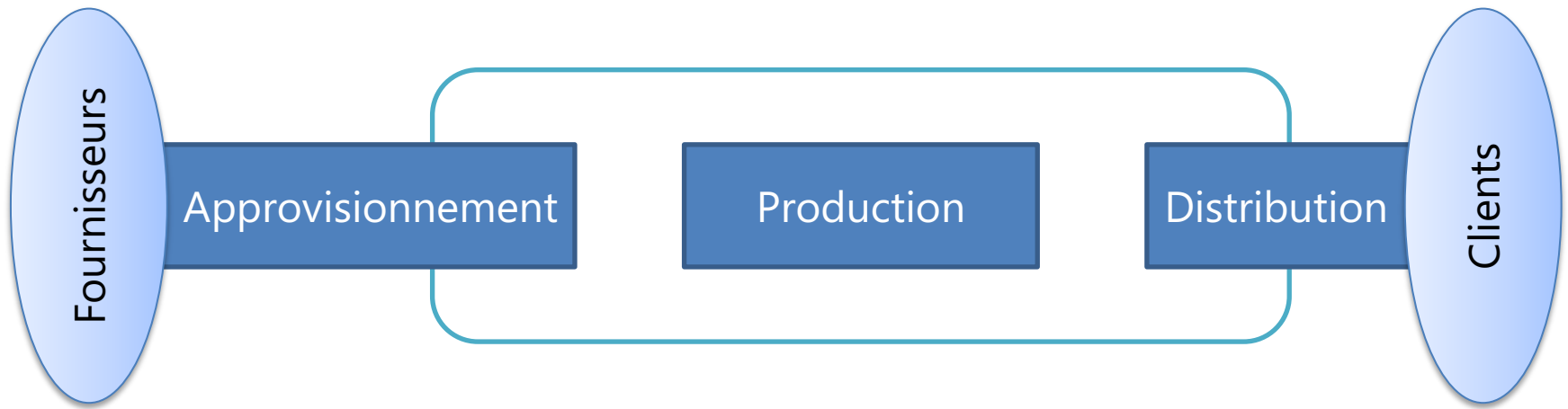
## I Le domaine de la Gestion Industrielle

Un vaste ensemble de domaines:

- La conception des produits vendus par l'entreprise
- La conception des processus de production permettant la fabrication de ces produits
- La gestion des flux physiques et des stocks à tous les niveaux
- Les technologies mises en œuvre dans les produits et dans les processus
- La politique d'achat des matières premières, sous-ensembles et composants
- La politique de mise en place des prestations de service
- La politique de qualité
- L'organisation du système de distribution
- Le management des ressources humaines mobilisées dans le domaine industriel et logistique

Les décisions relevant de la Gestion Industrielle se situent à deux niveaux:

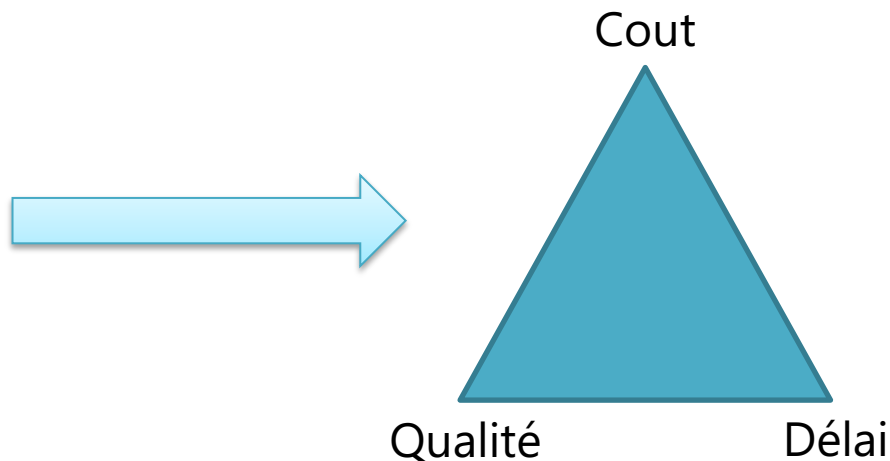
- *Au niveau stratégique et tactique:* définir et mettre en place les moyens et les ressources nécessaires à la réalisation des différentes tâches
- *Au niveau opérationnel:* gérer les flux des matières premières, des produits semi-finis et des produits finis pour atteindre les objectifs de productivité et de service préétablis.



**Figure 1: l'entreprise**

Le but d'une entreprise est de satisfaire son client.

Le client désire un bon produit, livré à temps et à un prix raisonnable.

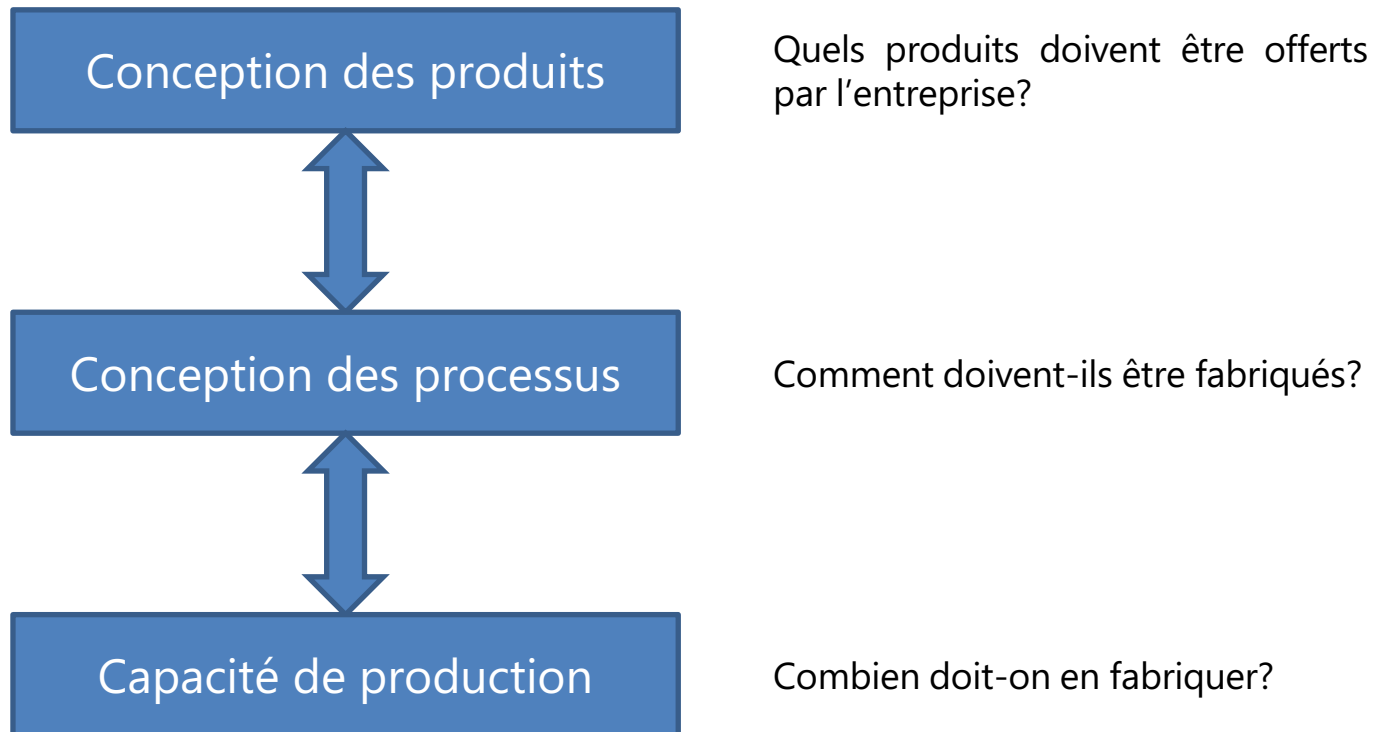


- Cout bas  $\Rightarrow$  grandes séries, « mauvaise » qualité et faible flexibilité.
- Haute qualité  $\Rightarrow$  augmentation des couts.
- Flexibilité élevée  $\Rightarrow$  augmentation des couts.

**Figure 2: positionnement stratégique de l'entreprise**

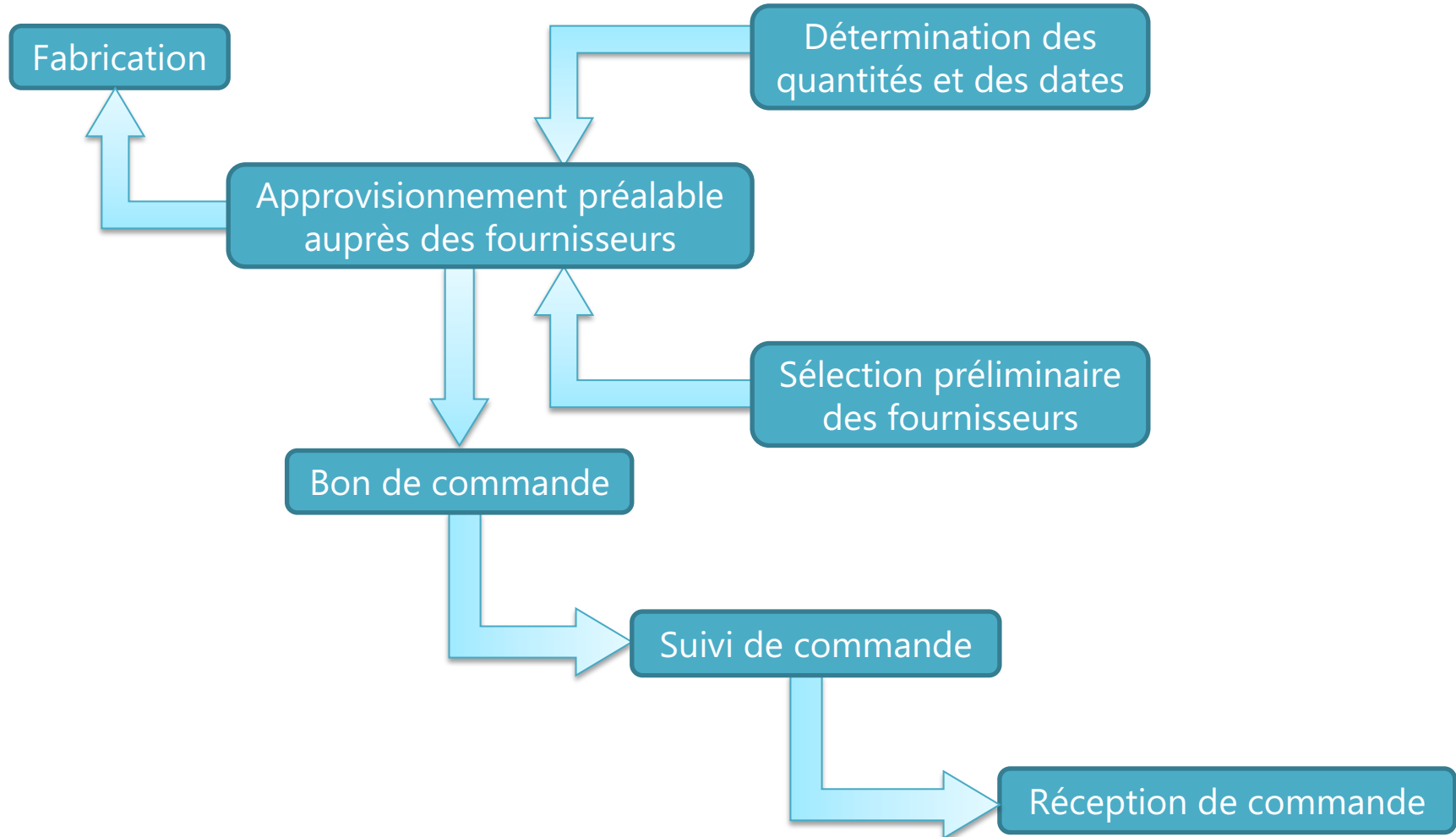
La satisfaction des besoins des clients passe par trois grandes étapes:

- La définition des produits offerts par l'entreprise
- La définition du processus de fabrication
- La définition du niveau de capacité



## II Processus d'achat, de fabrication et de distribution

### 1- Achats et approvisionnements



## **2- Fabrication**

Utiliser les ressources humaines et/ou matérielles de l'entreprise pour transformer les matières premières et composants en produits finis.

La fabrication est réalisée en plusieurs étapes, décrites par les *gammes opératoires*, entrecoupées par des passages en stock.

## **3- Distribution**

Objectif de l'entreprise: délivrer le produit au client, au bon moment, au bon endroit et dans la bonne quantité.

⇒ La distribution est au cœur du concept de *qualité de service* au client.

## **III Produits, ressources et données techniques**

Les informations quantitatives décrivant les étapes d'achat, de fabrication et de distribution s'appellent *les données techniques*.

- *Les nomenclatures* décrivent les matières et composants
- *Les gammes opératoires* décrivent les opérations nécessaires pour passer des matières premières au produit fini livré.

## IV Analyse typologique des produits et des ressources

### 1- Le concept de variété

La déclinaison d'un produit fini selon un grand nombre de variantes constitue le concept de *variété* d'un produit industriel.

La variété coûte cher à produire: en raison du grand nombre de références, le système devient plus difficile à gérer, car plus complexe.

Plus la variété est grande, plus les séries sont courtes, plus il faut changer souvent le réglage des machines et plus le personnel employé doit être polyvalent.

La variété peut provenir de:

- changements au niveau des matières et composants utilisés dans la fabrication (sans changer les opérations elles-mêmes).
- la mise en œuvre d'opérations différentes lorsqu'on change de produit (ce qui induit un processus de réglage lourd, voire même une véritable réorganisation des ressources)

## 2- Typologie des produits et des ressources

On peut classer les produits/ressources en familles suivants les critères suivants:

- Bien physique ou service
- Produit standard ou produit spécifique
- Produit simple ou produit complexe
- Produit à durée de vie longue et produit à durée de vie courte
- Taille des séries
- Organisation par technologies ou par produits
- Typologie des nomenclatures

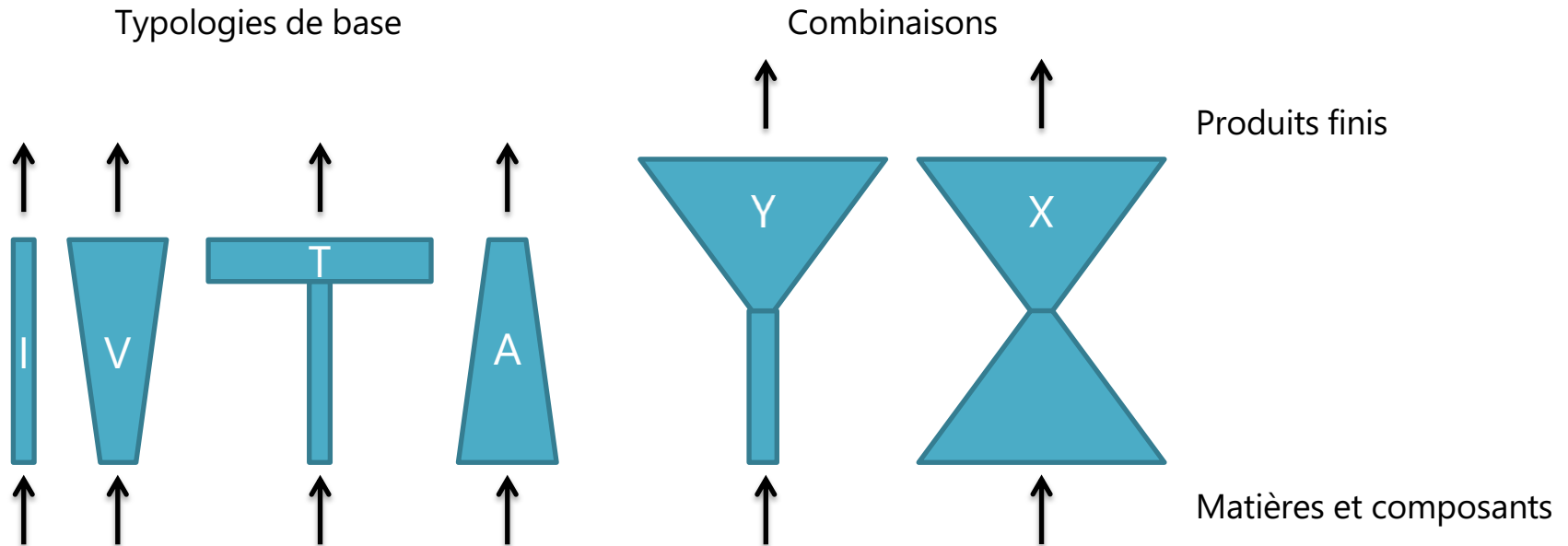


Figure 3: Principales formes de nomenclatures

### 3- Le Cout d'un produit

Distinction de couts fixes et de couts variables:

- Le *cout fixe* est indépendant des quantités approvisionnées, produites ou distribuées.
- Le *cout variable* dépend de ces quantités.

Le cout d'un produit est obtenu avec la procédure d'*implosion des couts* basée sur les nomenclatures et les gammes:

- On part du plus bas niveau de la nomenclature.
- Le cout d'un composé correspond à la somme pondérée des composants qui entrent dans sa composition et de son cout de fabrication.
- On remonte progressivement les niveaux de la nomenclature jusqu'à atteindre le produit visé.



## I Flux, processus et délais

### 1- Les processus

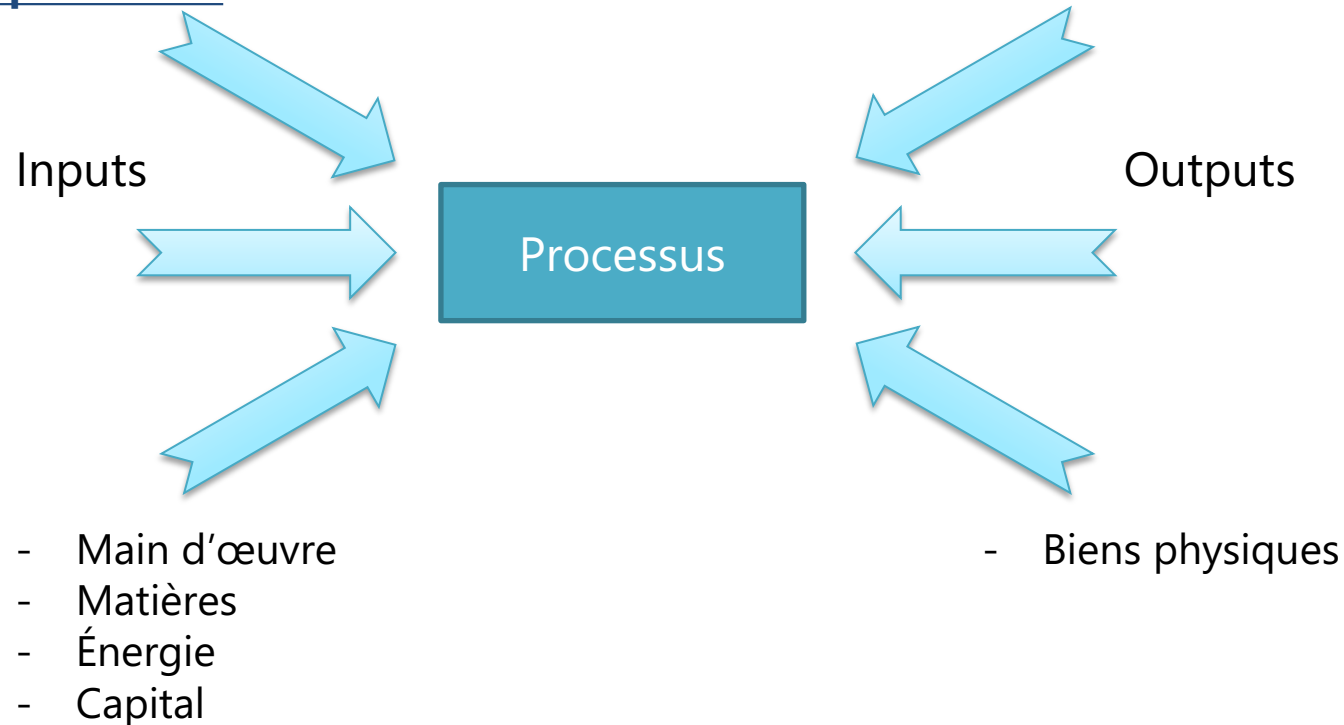


Figure 4: Les processus

Performance d'un processus  $\Rightarrow$  quantités nécessaires (en unités spécifiques ou en termes de couts) d'inputs pour réaliser l'objectif d'output.

Au niveau des flux, 3 indicateurs de mesure de performance s'imposent:

- Quantité de produits réalisés
- Quantité (ou valeur) des stocks de MP, composants et PF nécessaires pour faire fonctionner le système
- Les mesures de temps et délais dans le système

## **2- Le diagramme des flux**

⇒ Vision claire des flux

Il reprend tous les éléments importants du système industriel et logistique:

- fournisseurs
- ressources de natures industrielles et logistiques
- stocks entre les opérations et dans les magasins
- flux physiques entre les ressources
- flux d'informations permettant le pilotage des flux physiques

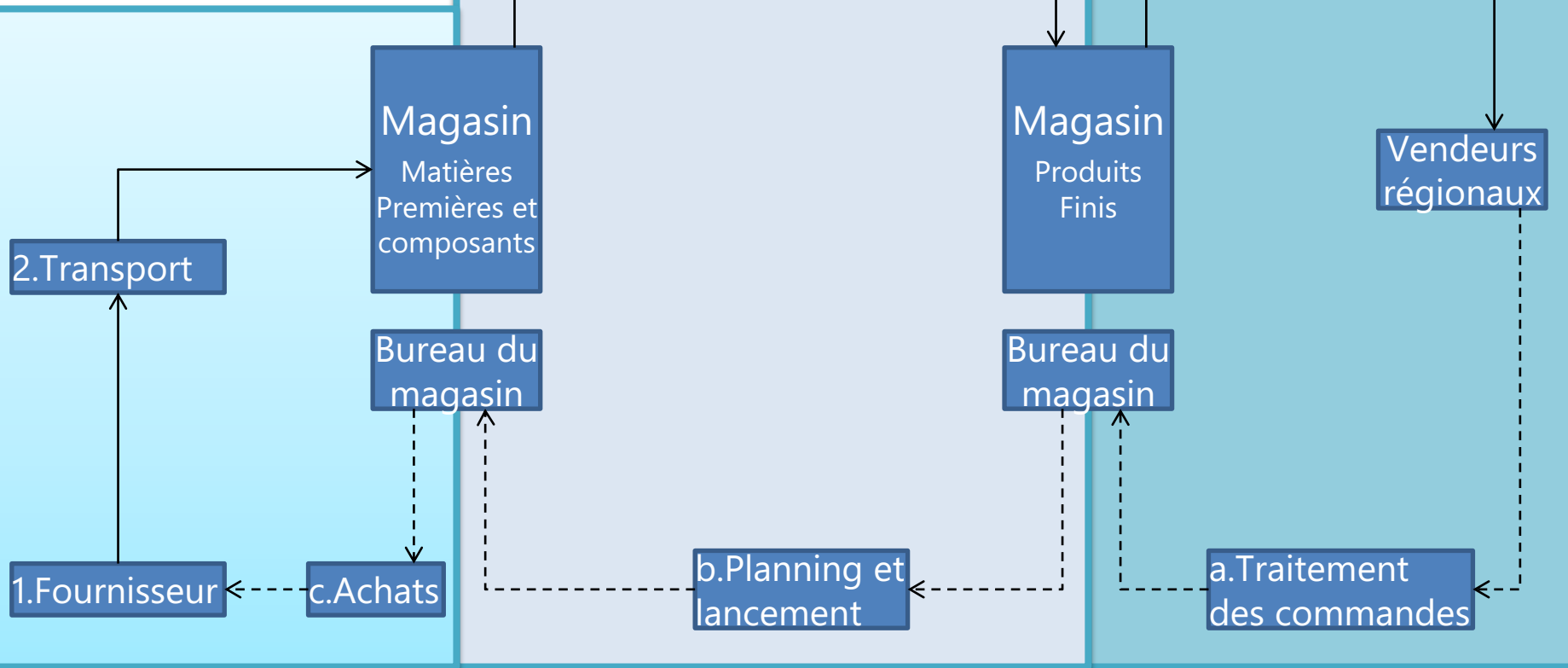
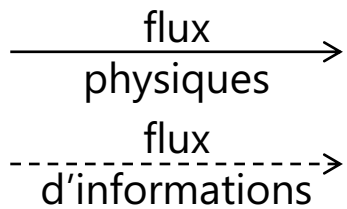


Figure 5: Exemple de diagramme de flux

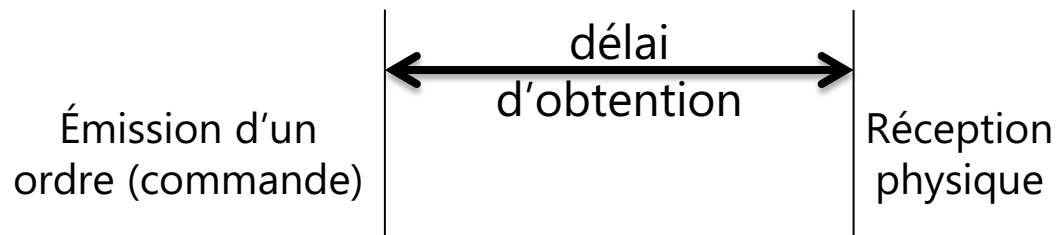
### 3- Les délais

Importance de l'aspect temporel:

⇒ Qualité de service aux clients: le délai entre la passation de commande et la réception du produit est un critère de différenciation important.

Trois types de délais peuvent être analysés:

- Le délai d'obtention d'une commande ou d'un ordre:



Exemple précédent:

délai d'obtention d'une commande pour un client = ?

⇒ délai de traitement + délai d'emballage + délai de transport

délai de réapprovisionnement du magasin des MP et composants = ?

⇒ délai d'achat + réaction du fournisseur + délai de transport

Durées en jours	Délai total	Temps opératoire	Délai d'attente
<b>Flux physiques</b>			
1- Fournisseur	20	2	18
2- Transport	5	1	4
3- Préparation	3	1	2
4- Fabrication	10	1	9
5- Contrôle qualité	5	1	4
6- Emballage	2	1	1
7- Transport	2	1	1
<b>Flux d'informations</b>			
a- Traitement des commandes	5	1	4
b- Planning et lancement	5	1	4
c- Achat	5	1	4



⇒ délai d'obtention d'une commande = 5 + 2 + 2 = 9 j

- Le délai d'écoulement: le temps que met le flux pour s'écouler entre 2 points du système logistique

Exemple précédent:

Le délai d'écoulement du flux physique depuis l'entrée en préparation à la sortie du contrôle qualité est de:  $3 + 10 + 5 = 18 \text{ j}$

- Le délai d'attente:


 - Non disponibilités de la ressource  
- Perturbation du processus par un aléa  temps de séjour d'un produit à un poste > temps opératoire

Une mesure de l'efficacité du système logistique:  $\text{ratio de fluidité} = \frac{\text{temps opératoire}}{\text{délai d'écoulement}}$

Exemple précédent:

Ratio de fluidité du flux physique depuis l'entrée en préparation jusqu'à la sortie du contrôle qualité =  $\frac{1+1+1}{3+10+5} = 16,7\%$

Exemple: Processus de production fonctionnant par lots de 100 pièces avec un temps opératoire de 1 mn/p

  $\text{ratio de fluidité} = \frac{1}{1+99} = 1 \%$

## II Flux et stocks

Stock: accumulation d'une différence de flux

Unités de mesure:

Temps d'écoulement = temps nécessaire à l'épuisement du stock en cas d'arrêt total du flux entrant

Rotation du stock = nombre de remplissages successifs du réservoir pendant une durée de référence

Délai d'écoulement entre A et B = 
$$\frac{\text{stock moyen entre A et B}}{\text{flux moyen entre A et B}}$$

Exemples:

Stock moyen = 1000 unités, ventes = 5000 unités  
⇒ rotation = 5 (/ an)

Multi-produits: valeur moyenne en stock =  $10^6$  TND, valeur annuelle de consommation des produits =  $10^7$  TND  
⇒ rotation = 10 (/ an)

Délai d'écoulement entre l'entrée des matières en stock et la livraison des produits aux clients = 3 mois en moyenne  
L'entreprise vend en moyenne 100 000 produits finis par mois  
⇒ ~ 300 000 articles (pièces, PF, PSF) dans l'usine

### III Typologie de gestion des flux

Souhaits des clients connus sur un horizon limité dépendant de la situation commerciale



Sélection d'un mode performant de gestion de flux



Satisfaction des délais de livraison souhaités par les clients

Caractéristique fondamentale: le rapport existant entre l'horizon et le délai nécessaire pour fournir le produit concerné

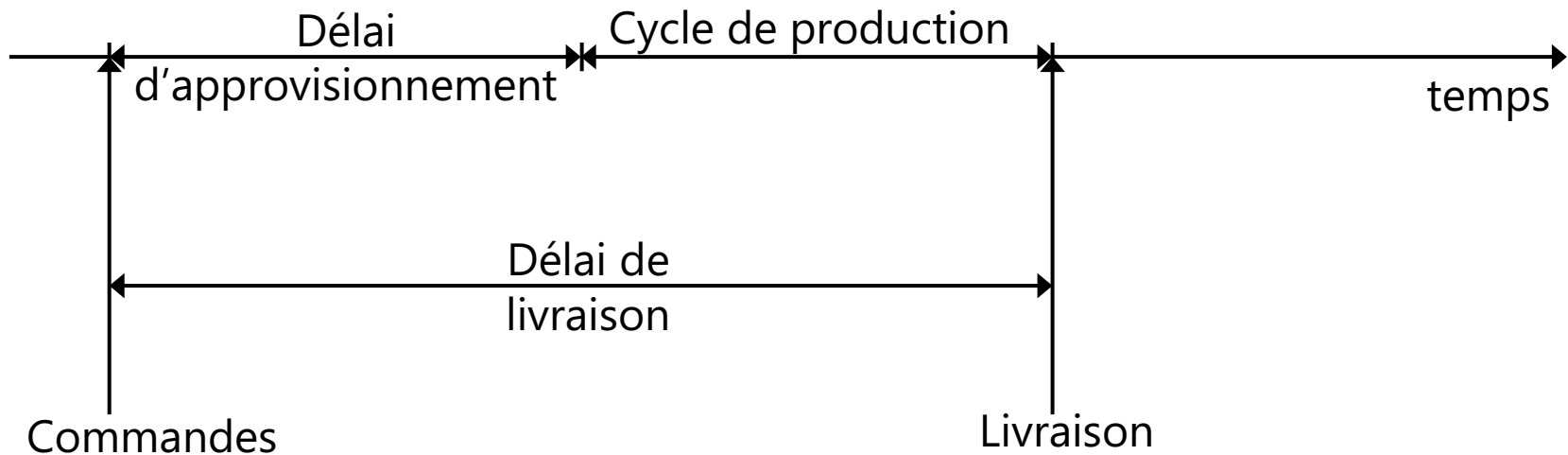




## 1- Gestion des flux à la commande

Tout ce qui est approvisionné et fabriqué est vendu.

On parle d'approvisionnement et de production à la commande (*Make\_to\_order*).



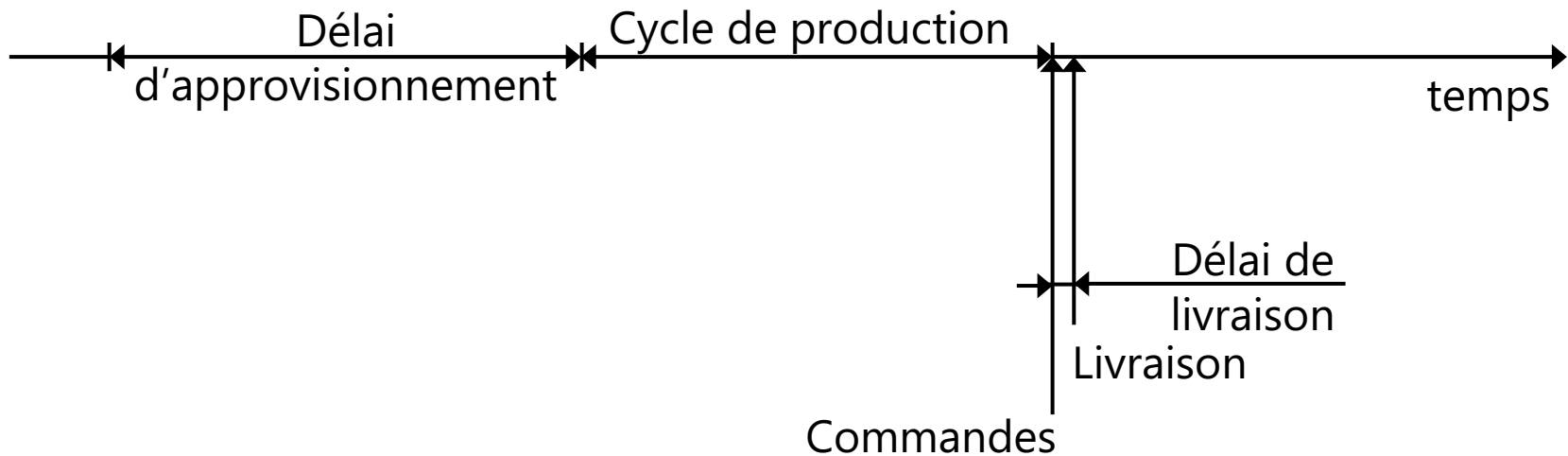
**Figure 6: Approvisionnement et fabrication à la commande**

- ⇒ Produits spécifiques souvent complexes, sur cahiers des charges comme des machines-outils spécifiques, des circuits électroniques spéciaux, ...
- + Pas de risque de produits invendus
- Délais de livraison longs

## 2- Gestion des flux par anticipation

Le fabricant produit avant d'avoir reçu la commande du client.

On parle de production par anticipation ou production sur stock (*Make\_to\_stock*).



**Figure 7: Production sur stock**

- ⇒ Produits de grande distribution
- + Délais de livraison réduits
- Risques car maintien d'un stock sans certitude de le vendre

### 3- Gestion des flux par anticipation partielle

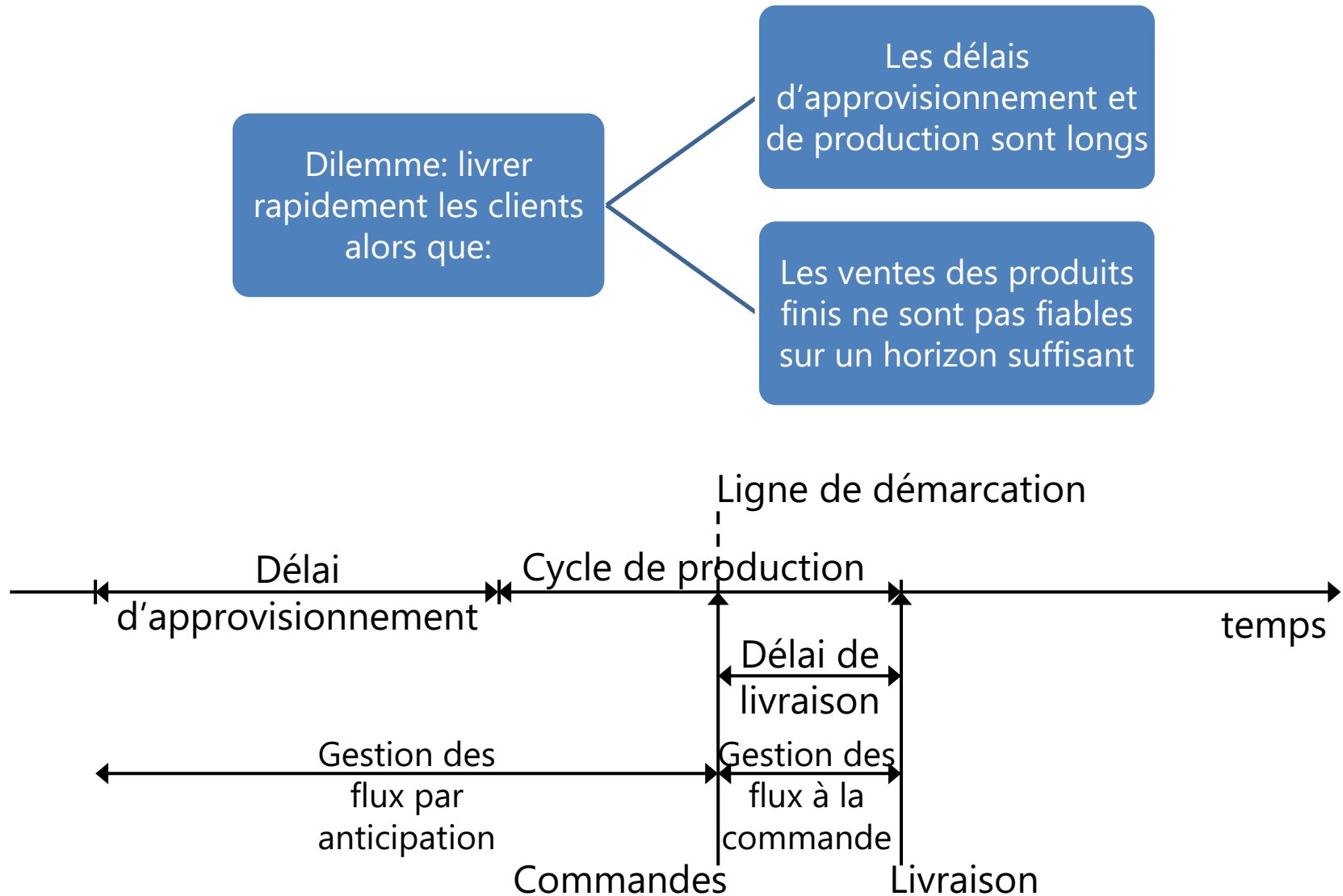


Figure 8: Gestion des flux par anticipation partielle

⇒ Produits dont la variété apparaît en fin de processus de production

Exemple: Produits à options (voitures, ordinateurs)

Le produit comporte une base standard (ou des modules standards) à partir de laquelle il est personnalisé à la demande du client.

⇒ Délai de livraison = temps d'assemblage

+ Risque limité car composants et Produits Semi-Finis utilisés dans de nombreux Produits Finis

⇒ On parle d'assemblage à la commande (*Assembly\_to\_order*) / différenciation retardée

## 4- Synthèse – pilotage de flux

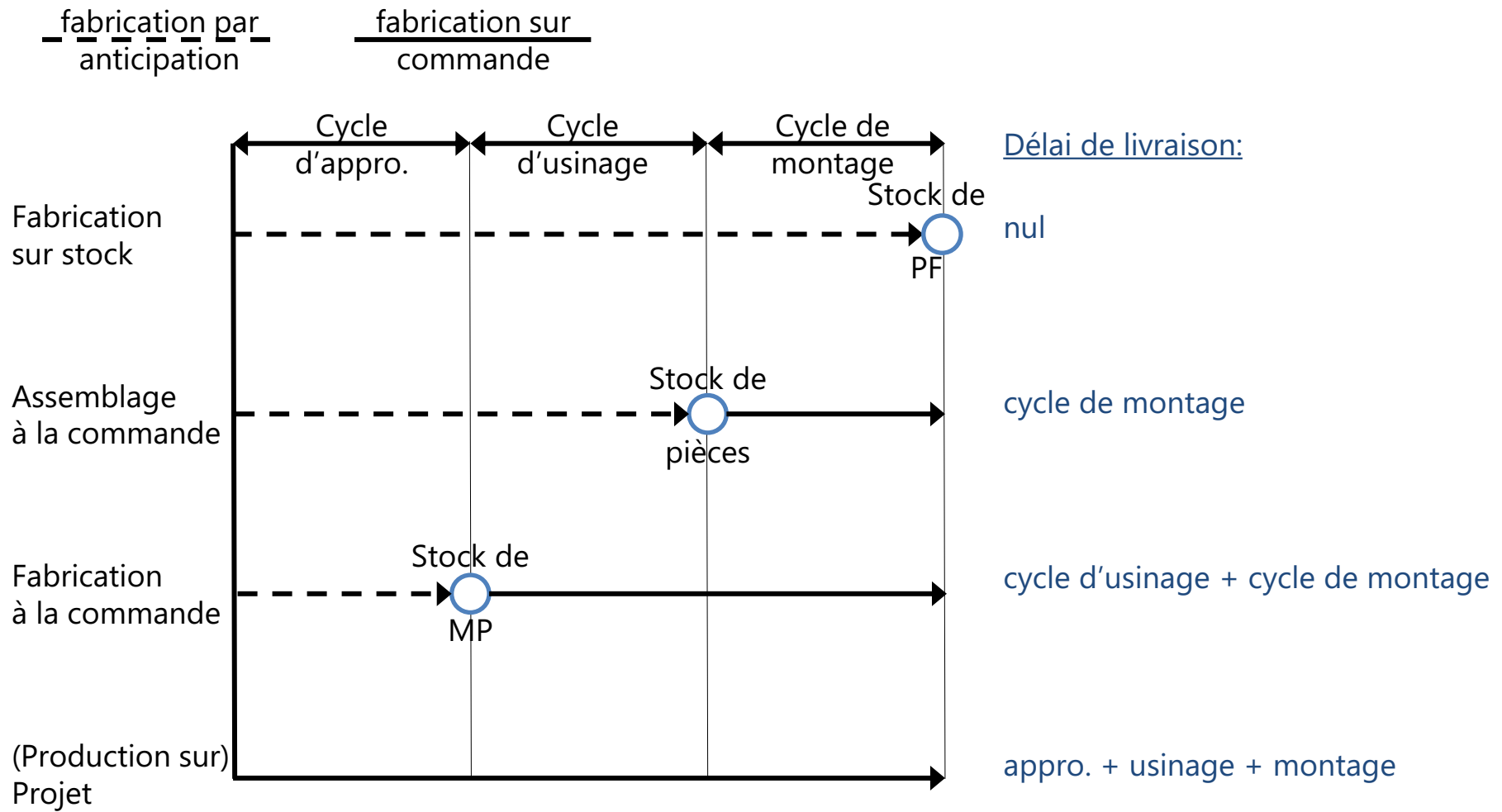
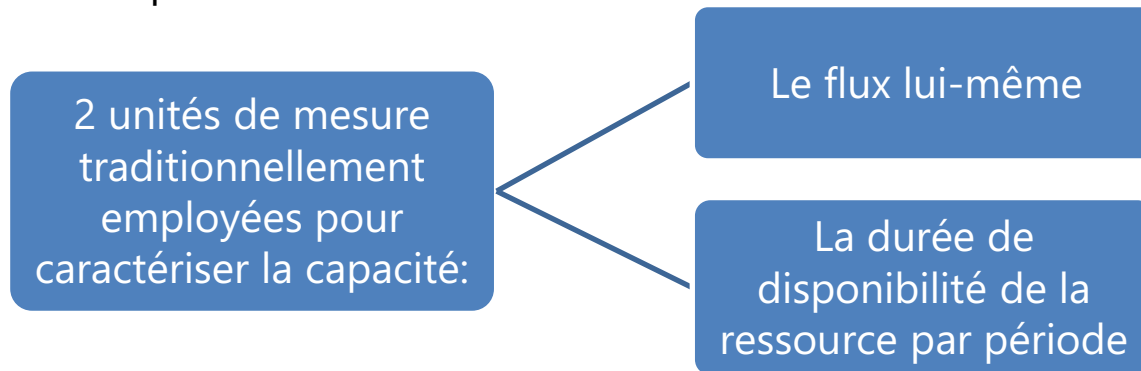


Figure 9: Synthèse – pilotage de flux

## I Capacité d'une ressource

### 1- Concept

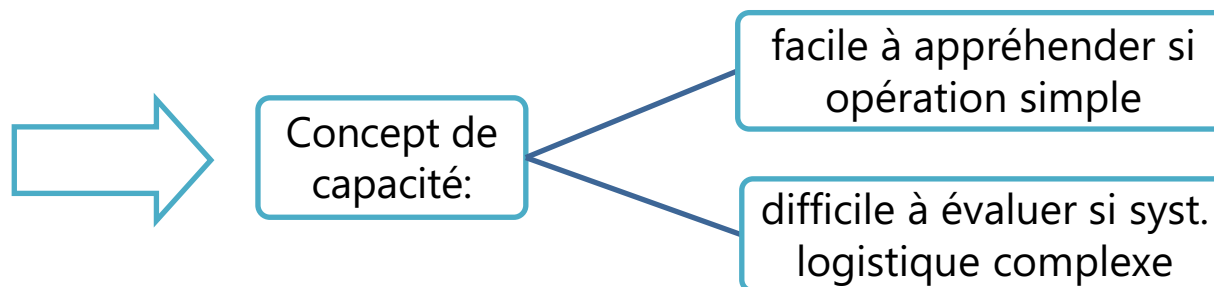
⇒ Mesure de son aptitude à traiter un flux



#### Exemple:

Chaine d'assemblage *Laguna*: capacité = 450 véhicules / jour

⇒ L'unité choisie ici est une mesure agrégée car ce flux journalier de 30 véh/h pendant 15h intègre plusieurs flux différents: *Laguna France* (35 véh/h), *Laguna Export* (30 véh/h), *Laguna V6* (5 véh/h), ...



Si les flux-produits ne sont pas suffisamment homogènes, l'unité choisie sera « la durée de disponibilité » de la ressource par période.

Exemple:

Atelier mécanique de précision produisant des centaines de pièces différentes selon des gammes spécifiques ⇒ utilisation de la *durée de disponibilité*, par exemple 40h/sem.

Suivant la complexité du système logistique, l'étendue de la gamme de produits et les objectifs poursuivis, on peut, typiquement, considérer une évaluation de:

- Capacité de production annuelle tous produits confondus
- Capacité de production mensuelle d'un atelier pour la famille de produits qui y est fabriquée
- Capacité de production hebdomadaire d'un poste en prenant comme unité de mesure le temps d'ouverture du poste

Exemple: Usine de fabrication de produits chocolatés

- Nombre de tonnes de produits fabriqués par an
- Nombre de tonnes de tablettes de chocolat fabriquées chaque mois sur la ligne correspondante
- Nombre hebdomadaire d'heures de disponibilité du poste d'emballage des tablettes

## 2- Le TRG (Taux de Rendement Global)

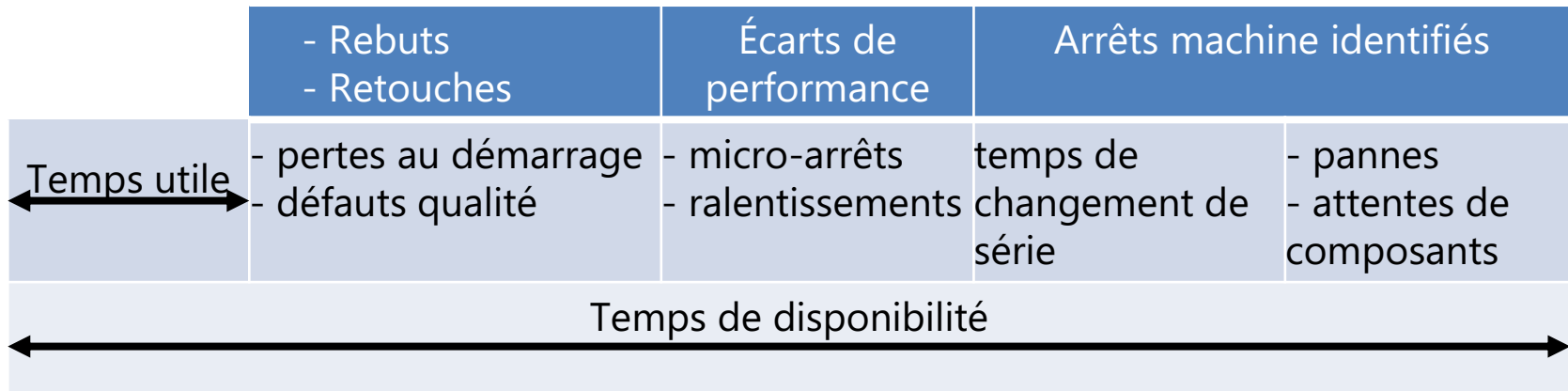
La capacité effective d'une ressource peut être inférieure à la capacité théorique, ou nominale, pour diverses raisons (entretien préventif, panne, absence d'opérateurs, pièces produites défectueuses, ...)

Une mesure de l'efficacité est faite par le TRG:

- Rapport entre le temps réellement utilisé par la ressource pour réaliser des produits de bonne qualité et le temps disponible

Ou encore

- Rapport entre les bonnes pièces produites et les pièces qui auraient pu être produites à la cadence nominale



Détermination du TRG

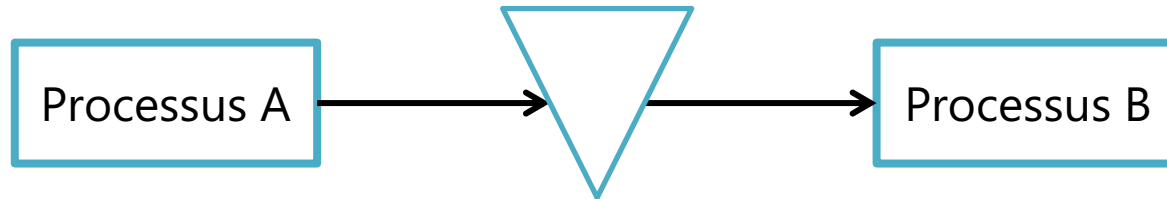


Exemple: 2 produits A et B, 10 mn de réglage, 1 mn de temps de fabrication unitaire

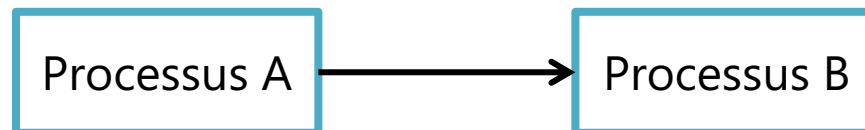
Taille de lot	Temps de prod. de A	Réglage A $\rightarrow$ B	Temps de prod. de B	Réglage B $\rightarrow$ A	TRG
10	10	10	10	10	50 %
100	100	10	100	10	91 %

## II La capacité d'un réseau de ressources

Lorsque des ressources multiples sont mises en œuvre, elles peuvent être découplées les unes des autres par des stocks intermédiaires.

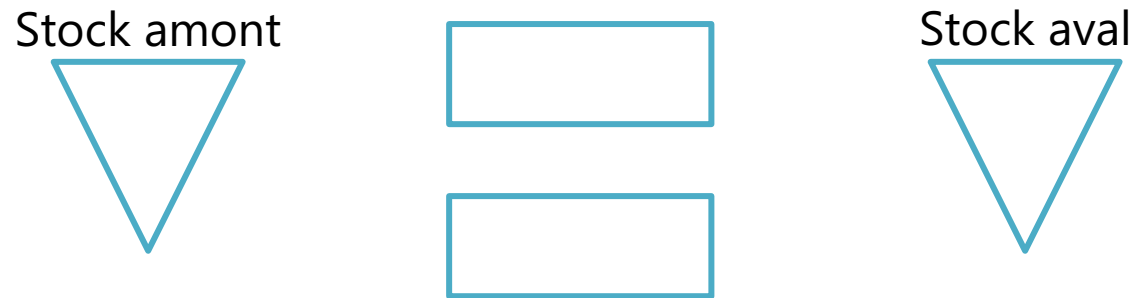


Le stock rend les ressources indépendantes.



L'absence de stock rend les ressources dépendantes.

## 1- Les processus en parallèle



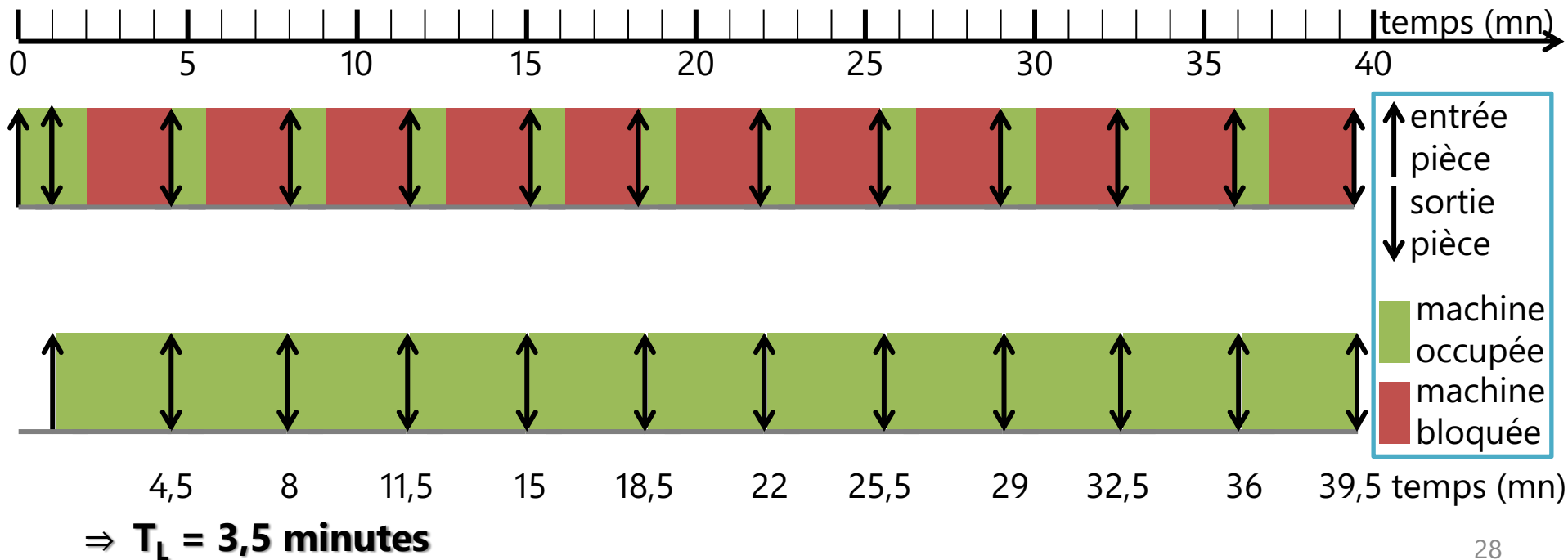
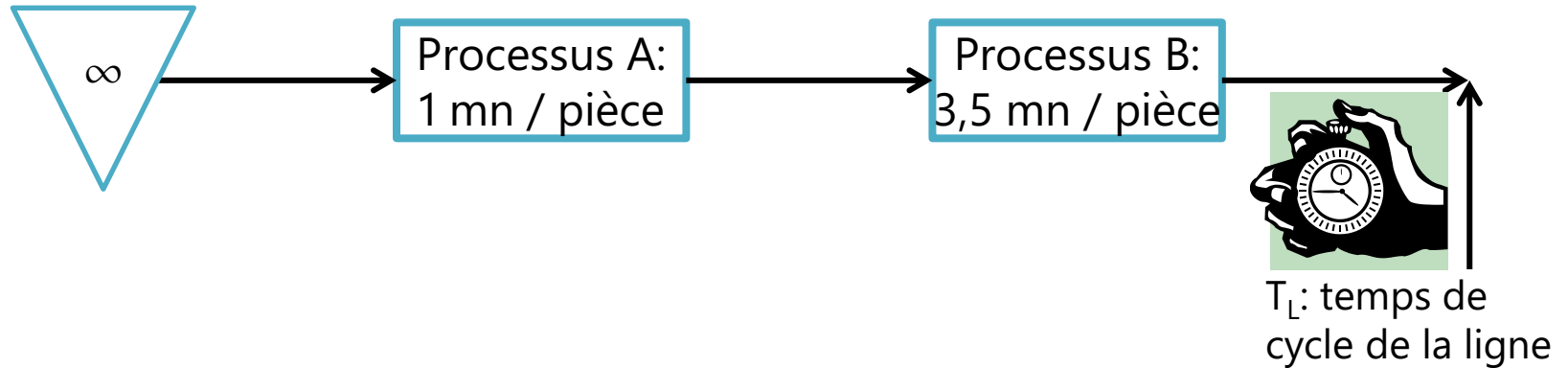
Les capacités en parallèle s'additionnent.

Exemple: 2 centres d'usinage identiques travaillant chacun 111 h / mois

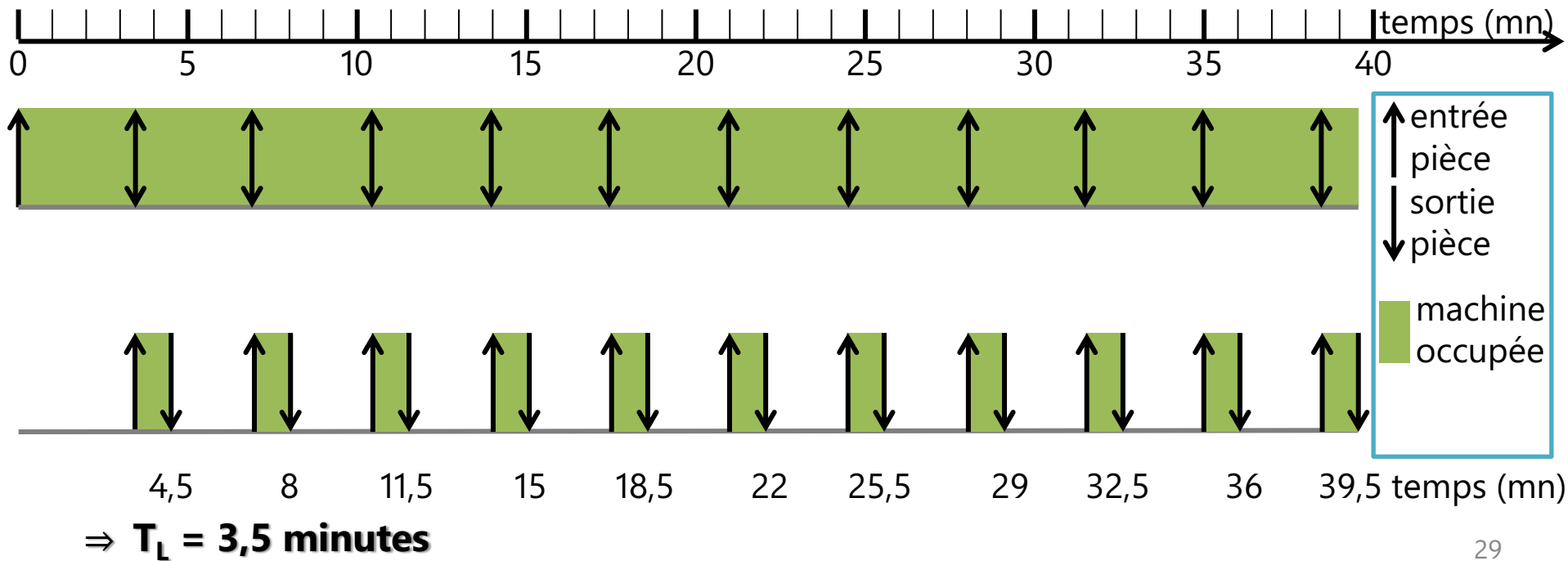
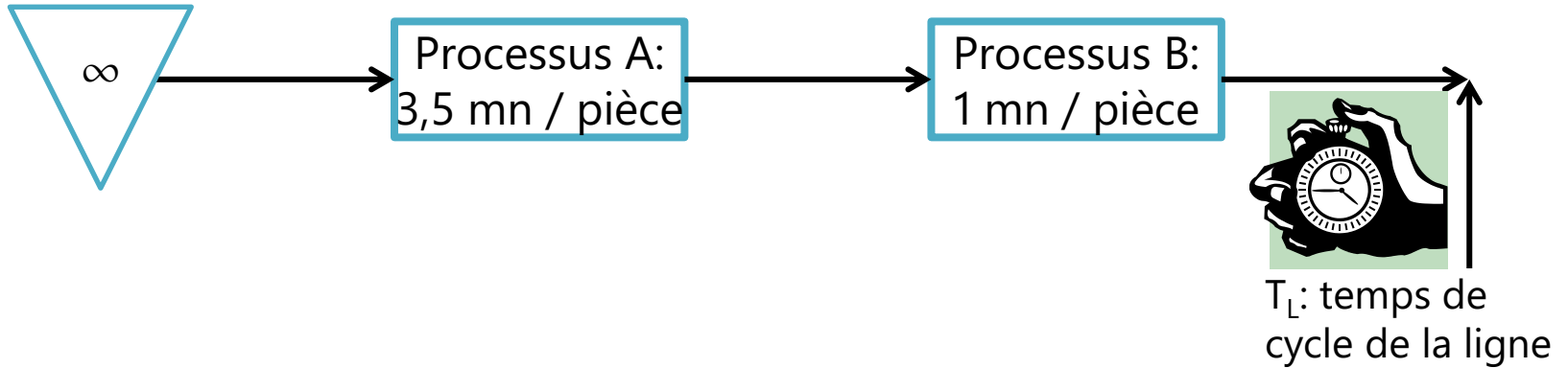
⇒ Capacité totale = 222 h / mois

## 2- Processus goulets et non-goulets

Exemple: 2 processus A et B, sans stock intermédiaire



Exemple: 2 processus A et B, sans stock intermédiaire



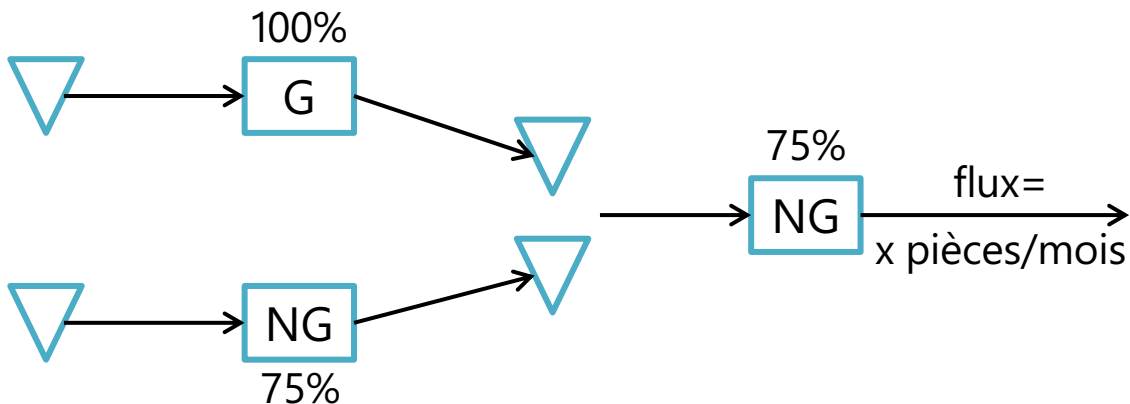
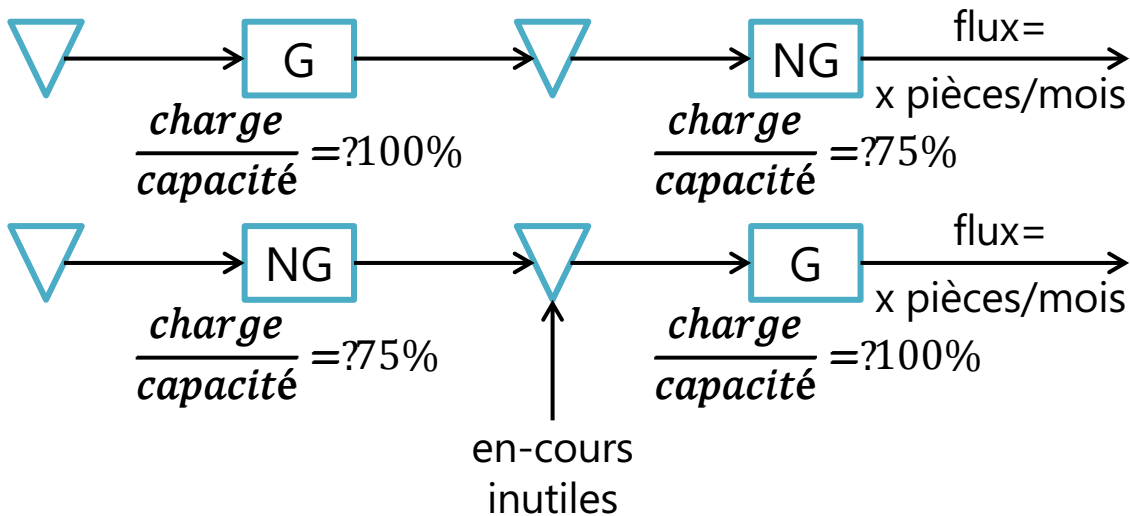
Le flux réalisable est limité par la capacité du processus goulet (ressource goulet).

⇒ Distinction de 2 familles de ressources: *goulets* et *non-goulets*.

Exemple:

Demande ~ charge de travail de 150 h/mois du processus NG (capacité=200h/mois).

Demande ~ charge de travail de 200 h/mois du processus G (capacité=200h/mois).



### III Équilibre entre charges et capacités

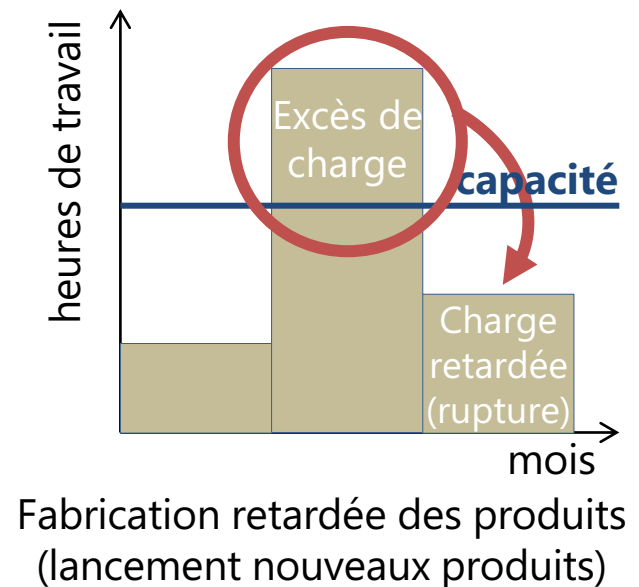
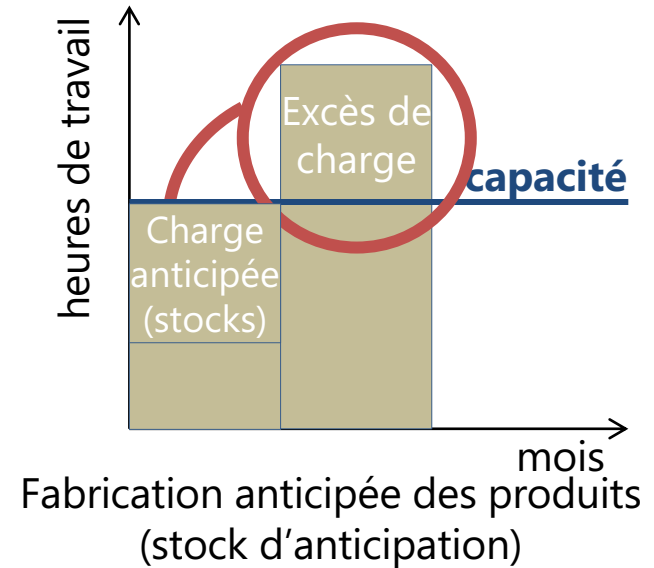
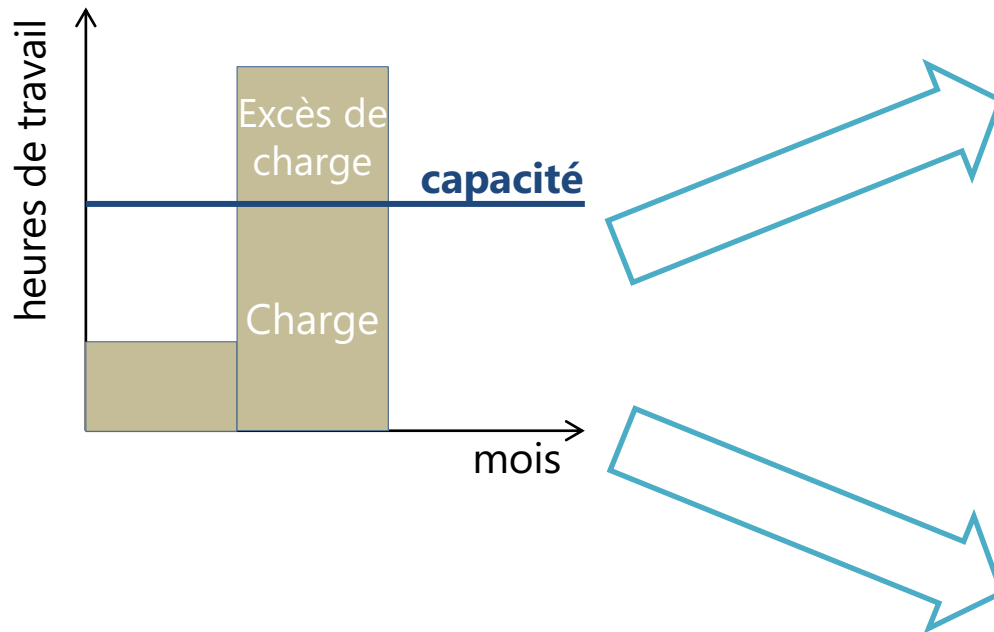


Figure 10: Équilibrage charge - capacité

Exemple: Usine de fabrication de produits cosmétiques + entrepôt associé

L'objectif de flux à réaliser est de *120 000 unités/jour*. La marge bénéficiaire est de *5€/unité vendue*.

Les fluctuations de charge sont de l'ordre de  $\pm 5\%$  pour la fabrication et de  $\pm 10\%$  pour la distribution et le transport.

Fabrication:

*cadence = 7 pièces / mn*

Actuellement, *35 postes* sont disponibles. Il est possible d'aller jusqu'à *40 postes*.  
Compte tenu des différents arrêts, un poste travaille *7h30 / jour*.

Distribution:

*50 commandes reçues / jour* en moyenne

Au total, *640 palettes* à expédier / jour

Manutentionnaires: PF  $\Rightarrow$  picking  $\Rightarrow$  conditionnement en palettes  $\Rightarrow$  chargement dans le camion

En moyenne, un manutentionnaire traite *10 palettes / h*, *7h30 / jour*

Actuellement, il existe *12 manutentionnaires*

Flotte = *10 camions*

En moyenne, un camion transporte *16 palettes* à la fois.

Les temps de chargement et de déchargement sont de *15 mn*

Durée moyenne du trajet aller-retour = *1h30*

Conducteur: *8h / jour*

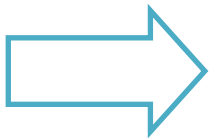


### Exemple – suite:

- Calcul des ratios charges/capacités moyens:

Ressource	Cadence / h	Nbre ressources	Heures / j	Capacité	Charge	Ratio
Fabrication	420 pièces	35	7,5	262,5 h/j	285,7 h/j	1,09
Manutention	10 palettes	12	7,5	90 h/j	64,0 h/j	0,71
Transport	8 palettes	10	8	80 h/j	80,0 h/j	1,00

### Calcul des capacités et des charges



- Atelier de fabrication = ressource goulet
- Ressource de transport (ratio=1): à la moindre fluctuation de flux  $\Rightarrow$  goulet

### Exemple – suite:

- Mise en œuvre de variables d'action pour réaliser l'équilibrage en moyenne:

La fabrication: ressource goulet

$$\text{flux réalisable} = \frac{120\,000}{1,09} = 110\,250 \text{ unités / } j$$

⇒ Perte de *9 750 unités / j*

⇒ Perte de marge potentielle = *48 750 € / j*

⇒ Toute heure de fabrication supplémentaire sur un poste permettrait un gain de  
 $420 * 5 = 2\,100 \text{ €}$

⇒ On passe à *38 postes* de fabrication

⇒ Équilibre réalisé.

Approche alternative:

Réduire les temps d'arrêt des postes pour récupérer de la capacité: globalement, chaque minute d'arrêt évitée sur un poste induit une marge supplémentaire de *35 €*.

### Exemple – suite:

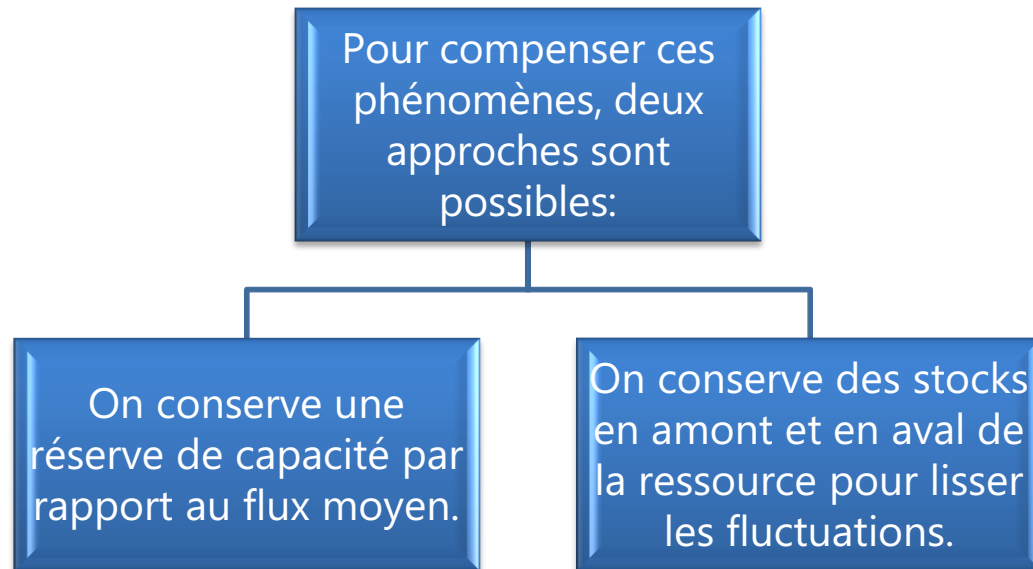
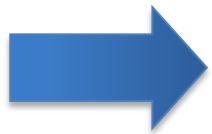
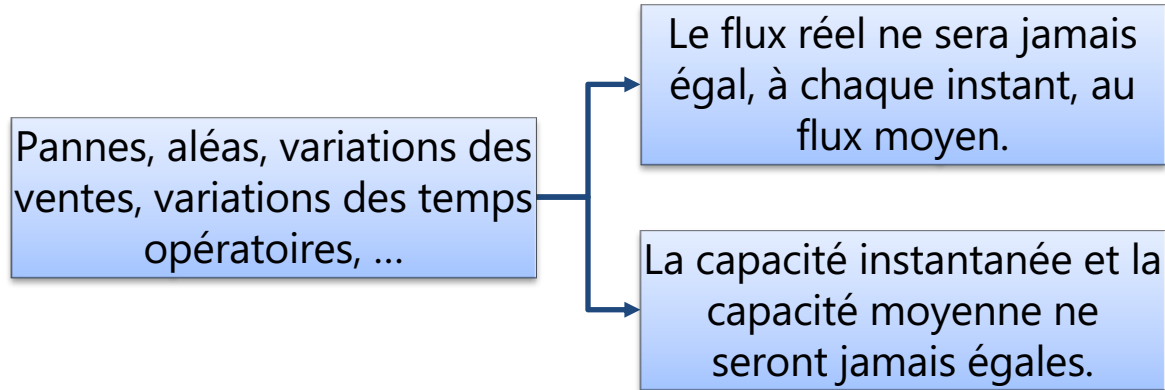
La manutention: capacité en excès de ~ 30 %

⇒ On peut imaginer de réduire le nombre d'opérateurs à ce poste puisque:  
*9 opérateurs* constitueraient un effectif suffisant.

Ressource	Cadence / h	Nbre ressources	Heures / j	Capacité	Charge	Ratio
Fabrication	420 pièces	38	7,5	285 h/j	285,7 h/j	1,00
Manutention	10 palettes	9	7,5	67,5 h/j	64,0 h/j	0,95
Transport	8 palettes	10	8	80 h/j	80,0 h/j	1,00

## Exemple – suite:

- Protections contre les fluctuations du flux:



### Exemple – suite:

Le choix dépend des couts de mise en œuvre et de l'impact sur le système général:

- Lorsque les ressources sont très couteuses (généralement le cas des ressources goulets), la mise en œuvre de capacité excédentaire peut s'avérer impossible en termes de rentabilité.
  - ⇒ On préfère lisser les fluctuations à l'aide de stocks.
  - ⇒ Dégradation inévitable des délais d'écoulement, du ratio de fluidité et des couts liés aux stocks.
- Pour des ressources dont le cout est plus faible:
  - ⇒ On préfère une capacité excédentaire.

On pourrait envisager de laisser s'accumuler en amont de la ressource *Transport* un stock de commandes préparées.

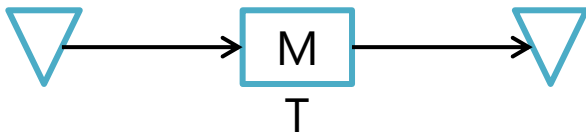
⇒ *Transport* fonctionne en permanence à flux maximal.

On pourrait, de plus, accroître la capacité de la *Fabrication* à 40 postes et la *Manutention* à 10 opérateurs afin de pouvoir traiter instantanément les fluctuations de charge.

## IV Détermination de la capacité de production

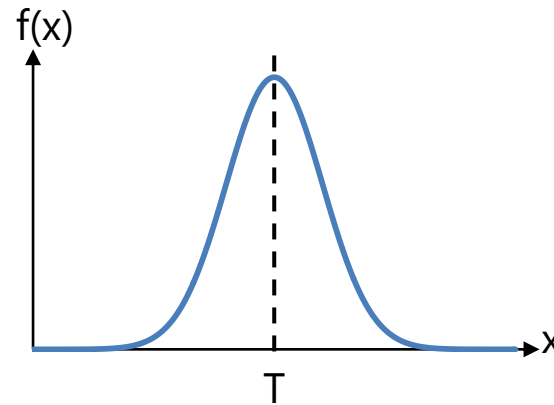
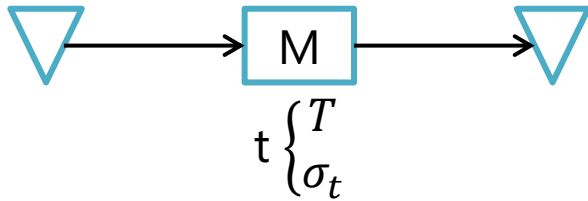
- Temps de cycle de la ligne: temps moyen entre la production de 2 pièces successives:  $T_L$
- Taux de production de la ligne: nombre moyen de pièces produites par la ligne par unité de temps:  $P_L = \frac{1}{T_L}$
- Taux d'utilisation de chaque machine: pourcentage de temps moyen pendant lequel la machine est utilisée:  $U_i$

### 1- Machine unique – cas déterministe



- Temps de cycle de la ligne:  $T_L = T$
- Taux de production de la ligne:  $P_L = \frac{1}{T}$

## 2- Machine unique – cas stochastique



$t$ : Variable aléatoire représentant le temps de traitement

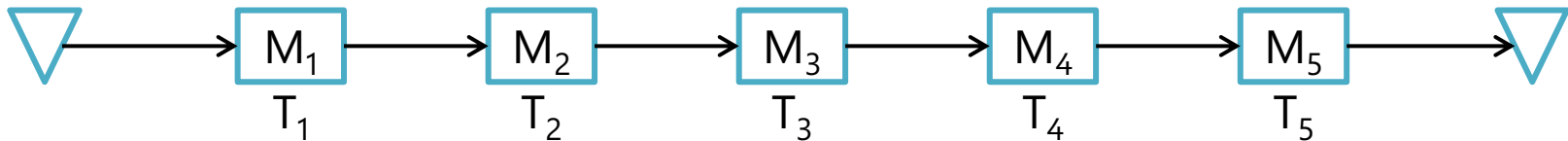
$$T = E[t]$$

Temps de cycle de la ligne:  $T_L = T = E[t]$

Taux de production de la ligne:  $P_L = \frac{1}{T} = \frac{1}{E[t]}$

### 3- Ligne de production – cas déterministe

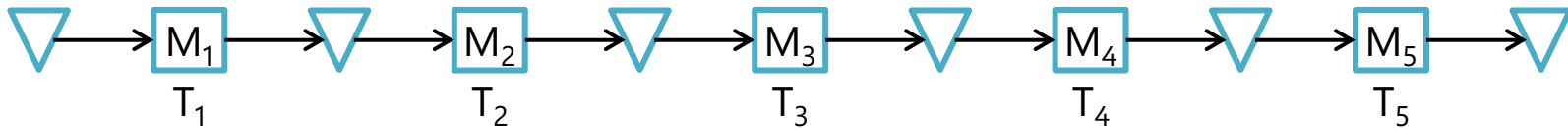
#### a- Ligne déterministe sans stocks intermédiaires



- Temps de cycle de la ligne:  $T_L = \text{Max}\{T_i\}$
- Taux de production de la ligne:  $P_L = \frac{1}{T_L} = \frac{1}{\text{Max}\{T_i\}} = \text{Min}\{\frac{1}{T_i}\}$
- Taux d'utilisation de de chaque machine:  $U_i = \frac{T_i}{\text{Max}\{T_i\}} = T_i P_L$ 
  - ⇒ Machine critique (bottleneck machine):  $U_i = 1$
  - ⇒ Périodes de non-alimentation ou périodes de blocage pour les autres machines
- Cas particulier d'une ligne équilibrée:  $T_i = T, T_L = T, P_L = \frac{1}{T}, U_i = 1 \forall i$

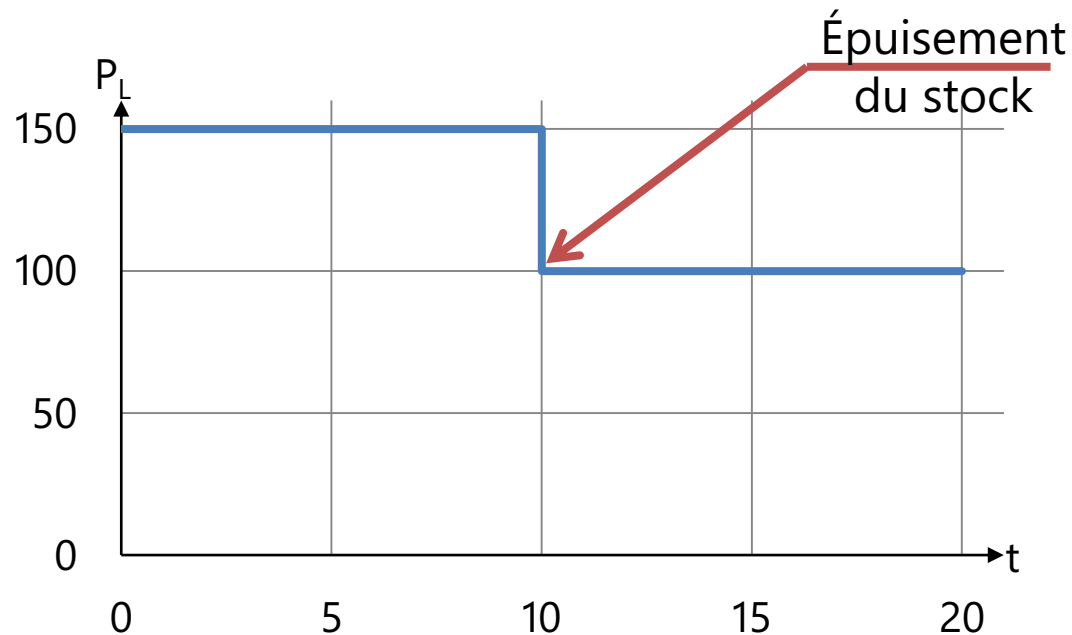
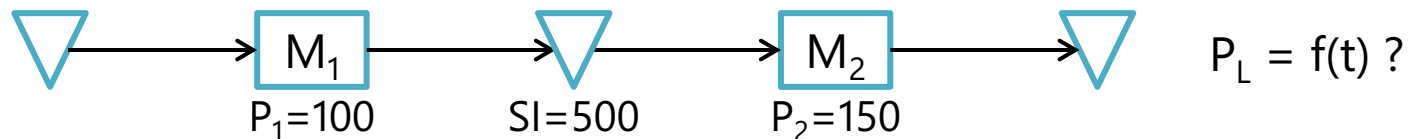


## b- Ligne déterministe avec stocks intermédiaires



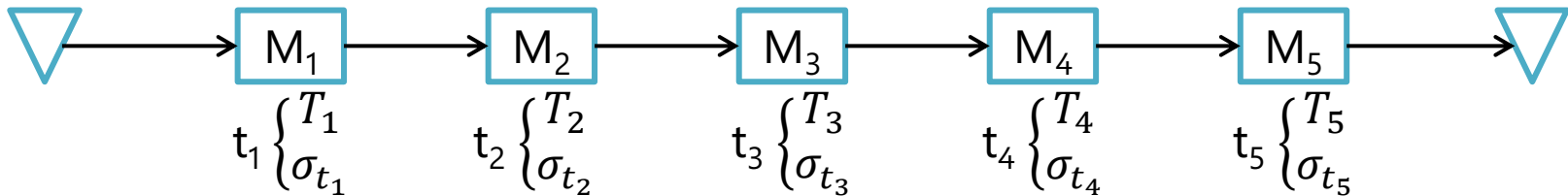
Effet des Stocks Intermédiaires sur le taux de production: aucun effet car après un temps suffisamment long, les stocks intermédiaires s'épuisent et la ligne est cadencée par la machine la plus lente.

Exemple:



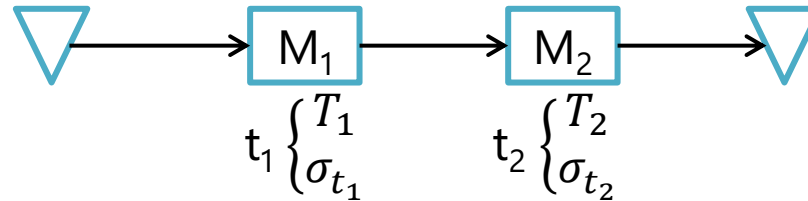
## 4- Ligne de production – cas stochastique

### a- Ligne stochastique sans stocks intermédiaires



- Temps de cycle de la ligne:  $T_L \geq \text{Max}\{T_i\}$
  - Taux de production de la ligne:  $P_L = \frac{1}{T_L} \leq \frac{1}{\text{Max}\{T_i\}}$
- ⇒ Phénomènes de non-alimentation et de blocage plus importants qui existent même pour des lignes équilibrées
- ⇒ Notion de machine critique moins évidente

## \* Ligne stochastique avec deux machines et sans stocks intermédiaires



$t_L$  : V.A. représentant le temps de cycle de la ligne avec  $T_L = E[t_L]$

$t_L = \text{Max}\{t_1, t_2\} \rightarrow T_L = E[\text{Max}\{t_1, t_2\}]$

La ligne ne peut pas faire mieux que chacune des machines à part:

$$\begin{cases} E[\text{Max}\{t_1, t_2\}] \geq E[t_1] \\ E[\text{Max}\{t_1, t_2\}] \geq E[t_2] \end{cases} \rightarrow E[\text{Max}\{t_1, t_2\}] \geq \text{Max}\{E[t_1], E[t_2]\}$$

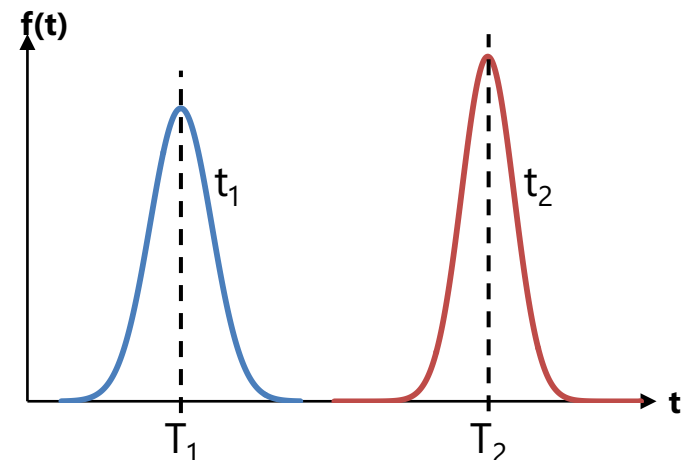
$$\rightarrow P_L = \frac{1}{T_L} = \frac{1}{E[\text{Max}\{t_1, t_2\}]} \leq \frac{1}{\text{Max}\{E[t_1], E[t_2]\}}$$



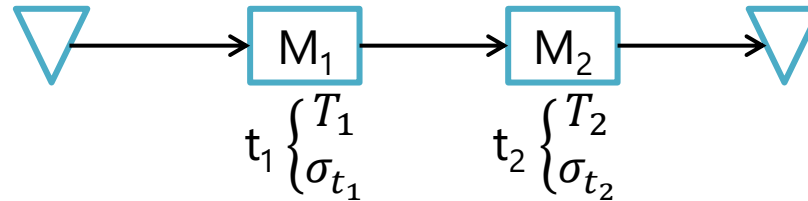
**$P_L(\text{cas stochastique}) \leq P_L(\text{cas déterministe})$**

L'égalité n'a lieu que si:

- $t_1 < t_2 \forall$  les réalisations des V.A.  $t_1$  et  $t_2$   
ou bien
- $t_1 > t_2 \forall$  les réalisations des V.A.  $t_1$  et  $t_2$



## Exemple



Pour la machine  $i$ :

- Le temps de traitement nominal d'une pièce a une durée fixe égale à  $X_i$ .
- Pendant le traitement de chaque pièce, il peut se produire un aléa. Dans ce cas, la pièce subit un traitement supplémentaire d'une durée constante  $Y_i$ .
- L'aléa se produit avec une probabilité  $a_i$ .

Nous supposons que les V.A. sont indépendantes.

⇒ Le temps de cycle moyen de la machine  $i$  est égal à  $X_i + a_i Y_i$

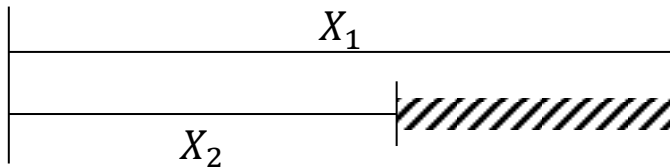
⇒ Le taux de production de la machine  $i$  isolée est  $P_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{X_i + a_i Y_i}$

## Exemple – suite

Supposons que  $X_1 + Y_1 > X_2$  et  $X_2 + Y_2 > X_1$ .

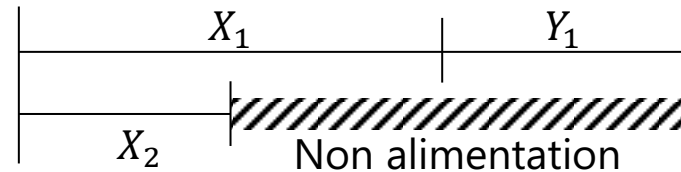
Nous pouvons distinguer quatre cas possibles:

Avec une probabilité  $(1 - a_1) \cdot (1 - a_2)$



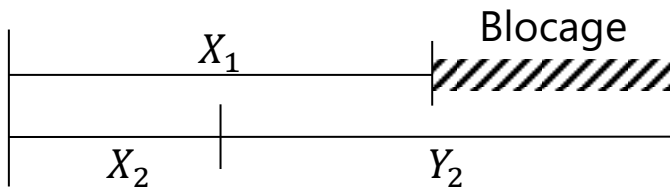
$$t_L = \text{Max}(X_1, X_2)$$

Avec une probabilité  $a_1 \cdot (1 - a_2)$



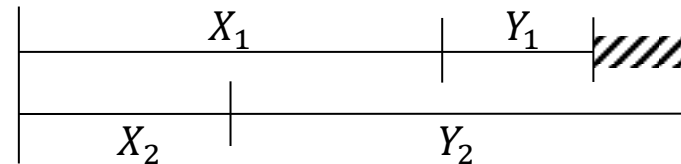
$$t_L = X_1 + Y_1$$

Avec une probabilité  $(1 - a_1) \cdot a_2$



$$t_L = X_2 + Y_2$$

Avec une probabilité  $a_1 \cdot a_2$



$$t_L = \text{Max}(X_1 + Y_1, X_2 + Y_2)$$

## Exemple – suite

$$\rightarrow T_L = (1 - a_1)(1 - a_2)Max(X_1, X_2) + a_1(1 - a_2)(X_1 + Y_1) + (1 - a_1)a_2(X_2 + Y_2) + a_1a_2Max(X_1 + Y_1, X_2 + Y_2)$$

Cas particulier: Les temps de traitement des 2 machines suivent les mêmes lois.

$$\rightarrow X_i = X, Y_i = Y \text{ et } a_i = a$$

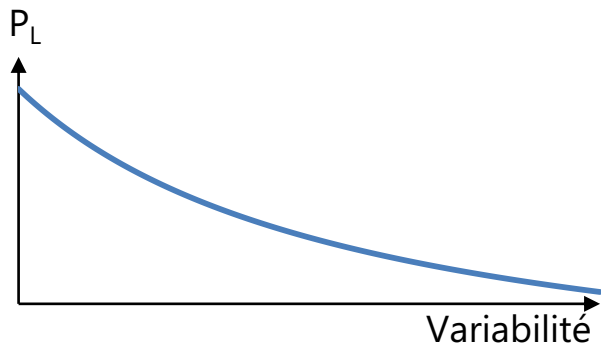
$$\rightarrow T_L = X + a(2 - a)Y$$

$$\rightarrow P_L = \frac{1}{X + a(2 - a)Y} \leq \frac{1}{X + aY} \quad \begin{array}{c} \text{borne supérieure} \\ \text{cas déterministe} \end{array}$$

Application numérique:  $X = 1, Y = 10 \text{ et } a = 0,1$

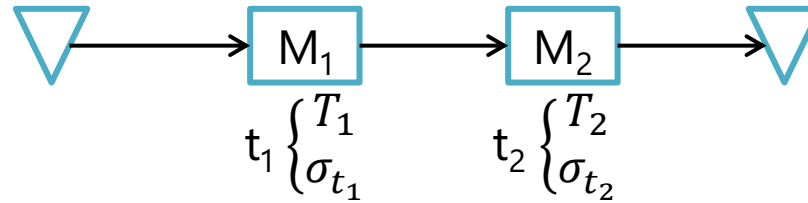
$\rightarrow$  Machine en isolation:  $T_i = 2 \rightarrow P_i = 0,5 \text{ et } Min(P_1, P_2) = 0,5$  ( $P_L$  du cas déterministe)

$\rightarrow$  ligne en production:  $T_L = 2,9 \rightarrow P_L = 0,345 < Min(P_1, P_2) \rightarrow$  perte de 31% en productivité par rapport au cas déterministe !



Les aléas de production ne font que diminuer la capacité de production de la ligne: la variabilité rend les phénomènes de blocage et de non-alimentation plus fréquents.

## Exercice



Considérons le cas suivant:

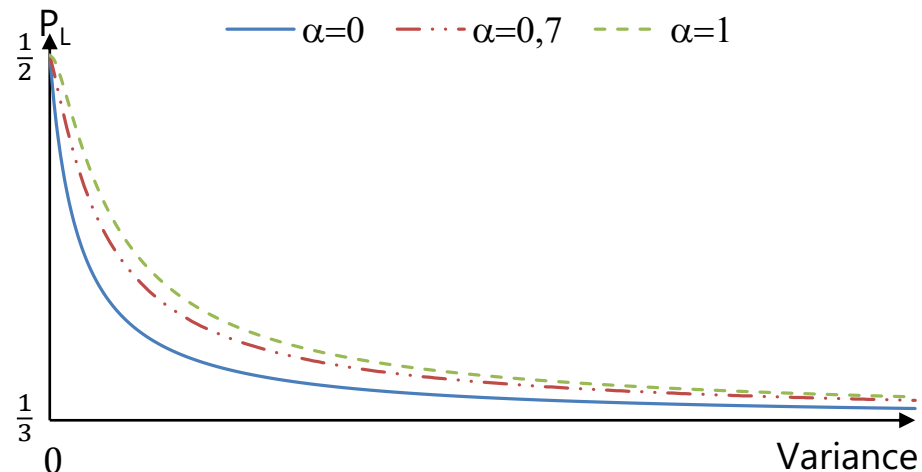
$$\begin{cases} X_1 = 1, X_2 = 1 - \alpha \quad (\alpha \leq 1) \\ a_1 = a_2 = a \\ Y_1 = Y_2 = Y \\ a Y = 1 \end{cases}$$

1. Déterminer  $T_L$  en fonction de  $Y$  et de  $\alpha$
2. Calculer la variance  $V_i = \sigma_{t_i}^2$  du temps de traitement  $t_i$
3. En déduire l'expression de  $P_L$  en fonction de la variance.
4. Comment évolue  $P_L$  en fonction de la variance ?

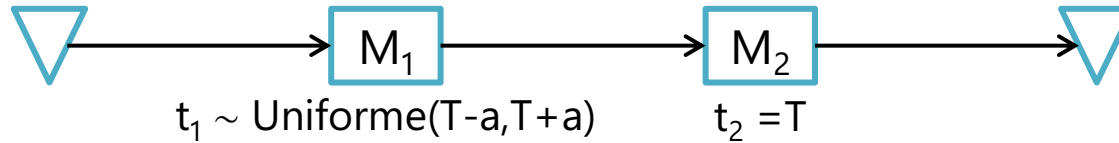


$$T_L = 3 - \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y} \left( 1 - \frac{1}{Y} \right) \alpha$$

$$V_i = Y - 1$$



## Exemple



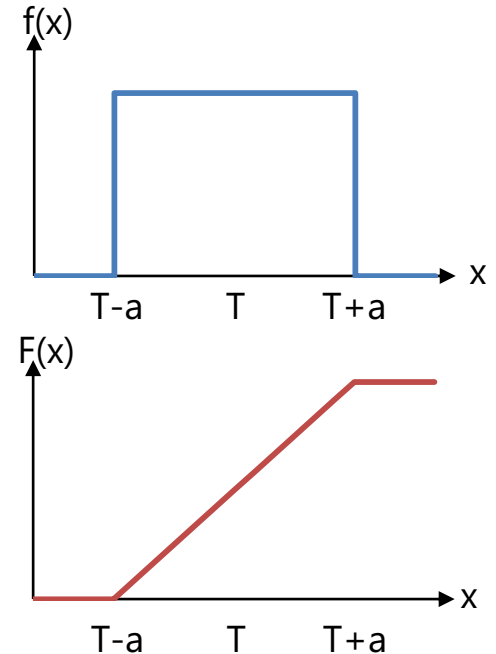
### Rappel – loi Uniforme

- Fonction densité:  $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2a} & \text{si } x \in [T-a, T+a] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

- Fonction cumulative:  $F(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < T-a \\ \frac{x-(T-a)}{2a} & \text{si } x \in [T-a, T+a] \\ 1 & \text{si } x > T+a \end{cases}$

- Moyenne:  $E[t] = T$

- Variance:  $\sigma_t^2 = \frac{a^2}{3}$





### Exemple – suite

$$T_L = E[t_1 | t_1 \geq t_2] \cdot P[t_1 \geq t_2] + E[t_2 | t_2 > t_1] \cdot P[t_2 > t_1]$$

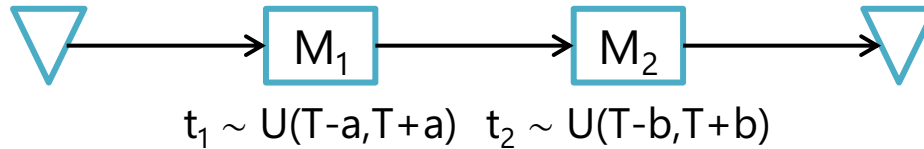
$$= \frac{\int_T^{+\infty} x \cdot f_{t_1}(x) \cdot dx}{P[t_1 \geq T]} \cdot P[t_1 \geq T] + T \cdot P[t_1 < T]$$

$$= \int_T^{+\infty} x \cdot f_{t_1}(x) \cdot dx + T \cdot \frac{1}{2}$$

$$= \dots$$

$$\rightarrow T_L = T + \frac{a}{4}$$

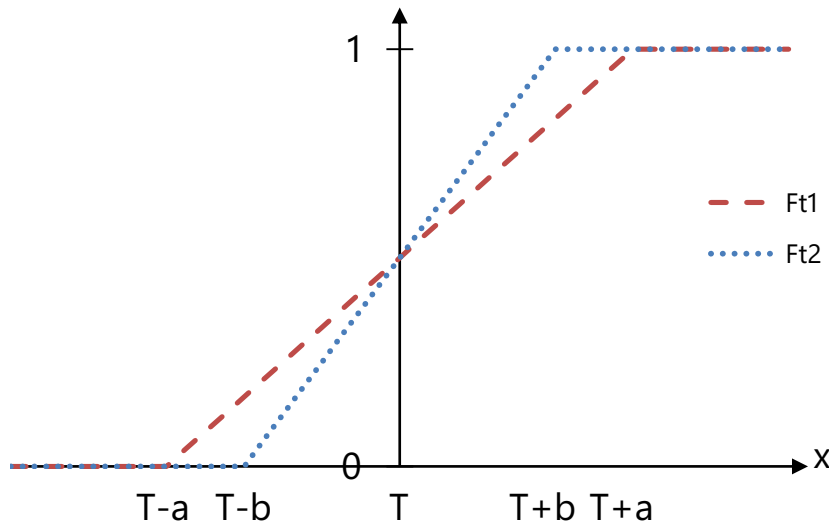
## Exemple



Hypothèse: pour simplifier les calculs, nous supposons que  $b \leq a$ .

Soit la V.A.  $t$  définie par:  $t = \text{Max}(t_1, t_2)$

$$\begin{aligned} F_t(x) &= P(t \leq x) = P(\text{Max}(t_1, t_2) \leq x) = P(\{t_1 \leq x\} \cap \{t_2 \leq x\}) \\ &= P(t_1 \leq x) \cdot P(t_2 \leq x) \quad \leftarrow t_1 \text{ et } t_2 \text{ sont indépendantes} \\ &= F_{t_1}(x) \cdot F_{t_2}(x) \end{aligned}$$



$$\rightarrow F_t(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq T - b \\ \frac{x - (T - a)}{2a} \frac{x - (T - b)}{2b} & \text{si } x \in [T - b, T + b] \\ \frac{x - (T - a)}{2a} & \text{si } x \in [T + b, T + a] \\ 1 & \text{si } x \geq T + a \end{cases}$$

## Exemple – suite

$$T_L = E[t] = \int_0^{+\infty} x \cdot f_t(x) \cdot dx, \text{ avec } f_t(x) = F_t'(x)$$

→ ...

$$\rightarrow T_L = T + \frac{a}{4} + \frac{b^2}{12a}$$

Cas particuliers:

- $b \rightarrow 0: T_L \rightarrow T + \frac{a}{4}$

→ Nous retrouvons le résultat de l'exemple précédent.

- $a=b$ : Les temps de traitement des 2 machines suivent les mêmes lois.

→  $T_L = T + \frac{a}{3} > T_L(b \rightarrow 0) = T + \frac{a}{4}$  à cause de l'augmentation de la variabilité

## **b- Ligne stochastique avec deux machines et avec stock intermédiaire**

Intérêt de placer des stocks intermédiaires:

- Découpler le fonctionnement des machines et, donc, diminuer les phénomènes de non-alimentation et de blocage des machines.
- ⇒ Les machines sont plus indépendantes dans leur fonctionnement, ce qui améliore le taux de production de la ligne.

Hypothèse: chaîne de montage d'un produit unique.

Objectifs:

- Détermination de la charge de travail
- Détermination du nombre nécessaire d'opérateurs
- Répartition des opérations de fabrication entre les opérateurs

## **I Processus opératoire du produit ou service concerné**

Avant d'organiser une ligne de production, il faut disposer des informations suivantes:

- La séquence opératoire de réalisation du produit, précisant les opérations élémentaires retenues, leurs temps opératoires, etc.
- Le diagramme d'antériorité des opérations.
- L'activité moyenne de la main d'œuvre et son évolution au cours du temps: ratio entre le rythme de travail effectif et le rythme considéré comme normal.

## Exemple

opération	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Temps unitaire (en $10^{-3}$ heure)	26	29	23	16	27	20	11	21	16	30	21	10

Gamme de fabrication d'un anorak

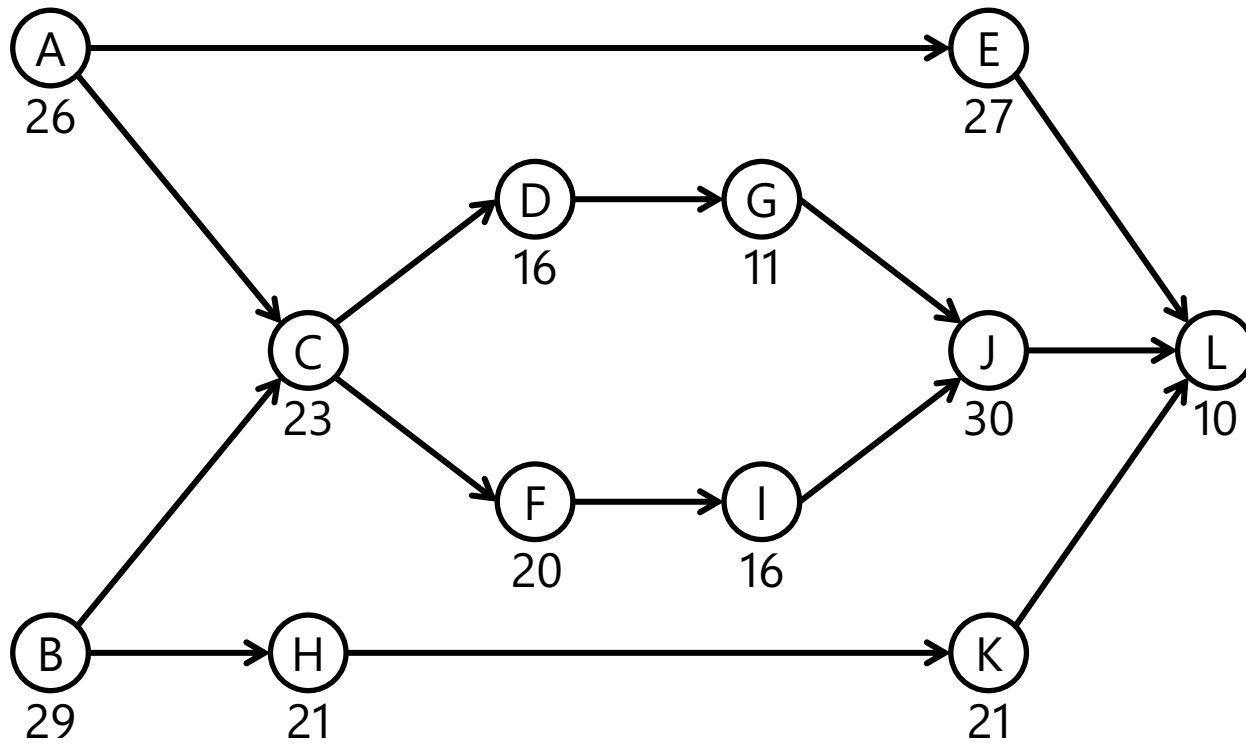


Diagramme d'antériorité des opérations

## II Évaluation du nombre nécessaire d'opérateurs

Soient  $t_i$  le temps opératoire de l'opération  $i$  et  $Q$  la quantité à produire sur une période de référence.

La charge de travail prévisionnelle est donc :  $Q \sum_i t_i$

La capacité de production est donnée par :  $N.H.A$

avec :

- $N$ : le nombre d'opérateurs.
- $H$ : la durée de travail effectif sur la même période de référence.
- $A$  : activité moyenne probable qui représente la vitesse relative des opérateurs par rapport à la vitesse théorique utilisée pour estimer le temps.

L'égalité entre la charge et la capacité conduit au nombre théorique de postes nécessaires:

$$N = \frac{Q \sum_i t_i}{A H}$$

## Exemple – suite

L'objectif de production est de *200 produits par jour*.

1. Déterminer la charge de travail correspondant à l'objectif de production.

$$\Rightarrow Q \sum_i t_i = 200 \times 0,25 = 50 \text{ heures.}$$

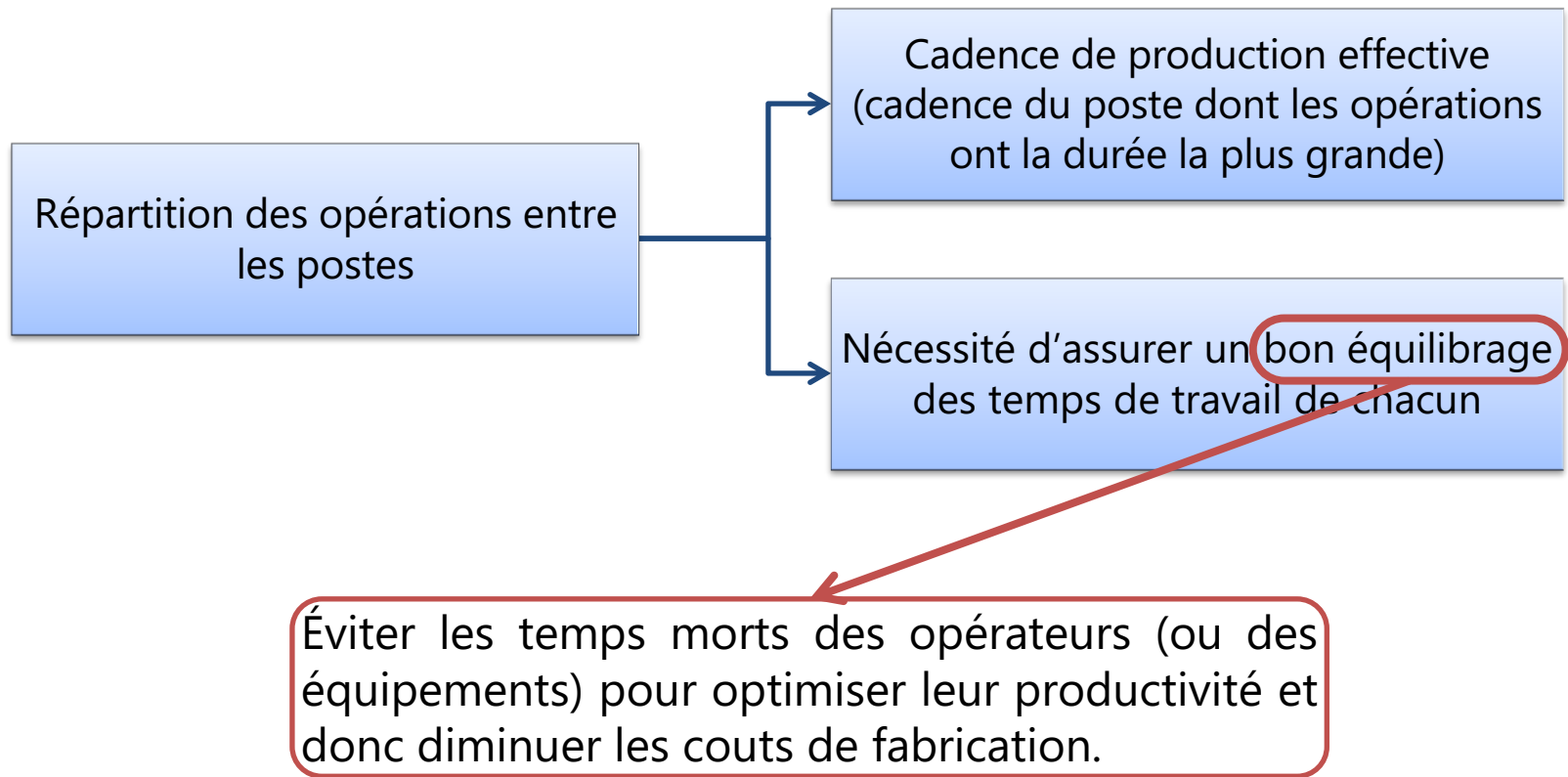
2. L'horaire de travail des ouvriers est de *8 heures par jour*. Déterminer le nombre d'ouvriers nécessaire dans le cas où ceux-ci travaillent à une cadence normale et dans le cas où il travaillent à un niveau d'activité de 130% (par la suite, on retient cette activité de 130%).

$$\Rightarrow A = 100 \% \Rightarrow N = 50/8 = 6,25 \Rightarrow N = 7 \text{ ouvriers}$$

$$A = 130 \% \Rightarrow N = 50/10,4 = 4,81 \Rightarrow N = 5 \text{ ouvriers}$$



### III L'équilibrage des postes sur une chaîne de production



➡ Répartir les différentes opérations entre les  $N$  postes de telle sorte que :

- Les contraintes d'antériorités techniques entre les opérations soient respectées.
- Tous les postes de travail se voient attribuer des opérations dont le temps total par poste soit à peu près le même.

## Exemple – suite

Une répartition possible des opérations entre les 5 *postes* est la suivante :

Poste	Opérations	Temps opératoires ( $10^{-3}$ h)	Temps morts ( $10^{-3}$ h)
1	A, B	42,31	$42,31 - 42,31 = 0$
2	C, H	33,85	$42,31 - 33,85 = 8,46$
3	D, F, I	40	$42,31 - 40 = 2,31$
4	E, K	36,92	$42,31 - 36,92 = 5,39$
5	G, J, L	39,23	$42,31 - 39,23 = 3,08$

⇒ La cadence de production est d'une pièce toutes les  $42,31 \cdot 10^{-3}$  h.

⇒ Le total des temps morts pour une pièce est de  $19,23 \cdot 10^{-3}$  h.

⇒ Le poste 1 de la chaîne est le poste « *goulet* ».

Difficulté de parvenir à une répartition égale des tâches.

⇒ L'équilibrage est rarement atteint.

Mesure de la qualité d'équilibrage:

$$perte\ d'équilibrage = \frac{N C_m - \sum_i t_i}{N C_m} = \frac{\sum(\text{temps morts})}{N C_m}$$

avec  $C_m$  le temps opératoire du poste le plus chargé.

Un équilibrage correct doit correspondre à une perte d'équilibrage située entre 0 et 5 %.

Il est possible de parvenir d'emblée à cet objectif. En revanche, en cas d'équilibrage imparfait, plusieurs solutions existent :

- Décision d'affecter sur le poste le plus chargé un opérateur dont le niveau d'activité moyen est supérieur à celui qui a servi d'hypothèse au calcul.
- Dédoublement du poste le plus chargé.
- Modification du processus opératoire en essayant, en particulier, de décomposer les opérations les plus longues qui posent les principaux problèmes d'équilibrage.
- Changement du nombre de postes envisagé et réalisation d'un deuxième équilibrage.

## Exemple – suite

$$\text{perte d'équilibrage} = 9,09 \%$$

- ⇒ Obtention d'un assez mauvais résultat pour un équilibrage.
  - ⇒ Il est envisageable de sélectionner des opérateurs travaillant à une allure supérieure (à celle qui a servi d'hypothèse pour le calcul) pour les postes les plus chargés et des opérateurs plus lents (des débutants par exemple) sur les postes les moins chargés.
  - Supposons par exemple que deux opérateurs ont une activité moyenne de *140 %*, deux opérateurs ont une activité moyenne de *120 %* et un opérateur a une activité moyenne de *130 %*.
  - ⇒ L'activité moyenne des opérateurs reste égale à *130 %*.
- Quelle est la perte d'équilibrage envisageable en gardant les mêmes répartition des postes ?

### Exemple – suite

Poste	Opérations	Temps opératoires ( $10^{-3}$ h)	Temps morts ( $10^{-3}$ h)
1	A, B	39,29	0,71
2	C, H	36,67	3,33
3	D, F, I	37,14	2,86
4	E, K	40	0
5	G, J, L	39,23	0,77

$$perte\ d'équilibrage = 3,84\ \% < 5\ \%$$

## IV L'optimisation de l'équilibrage

Lorsqu'il y a plusieurs opérations, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour trouver une solution satisfaisante.

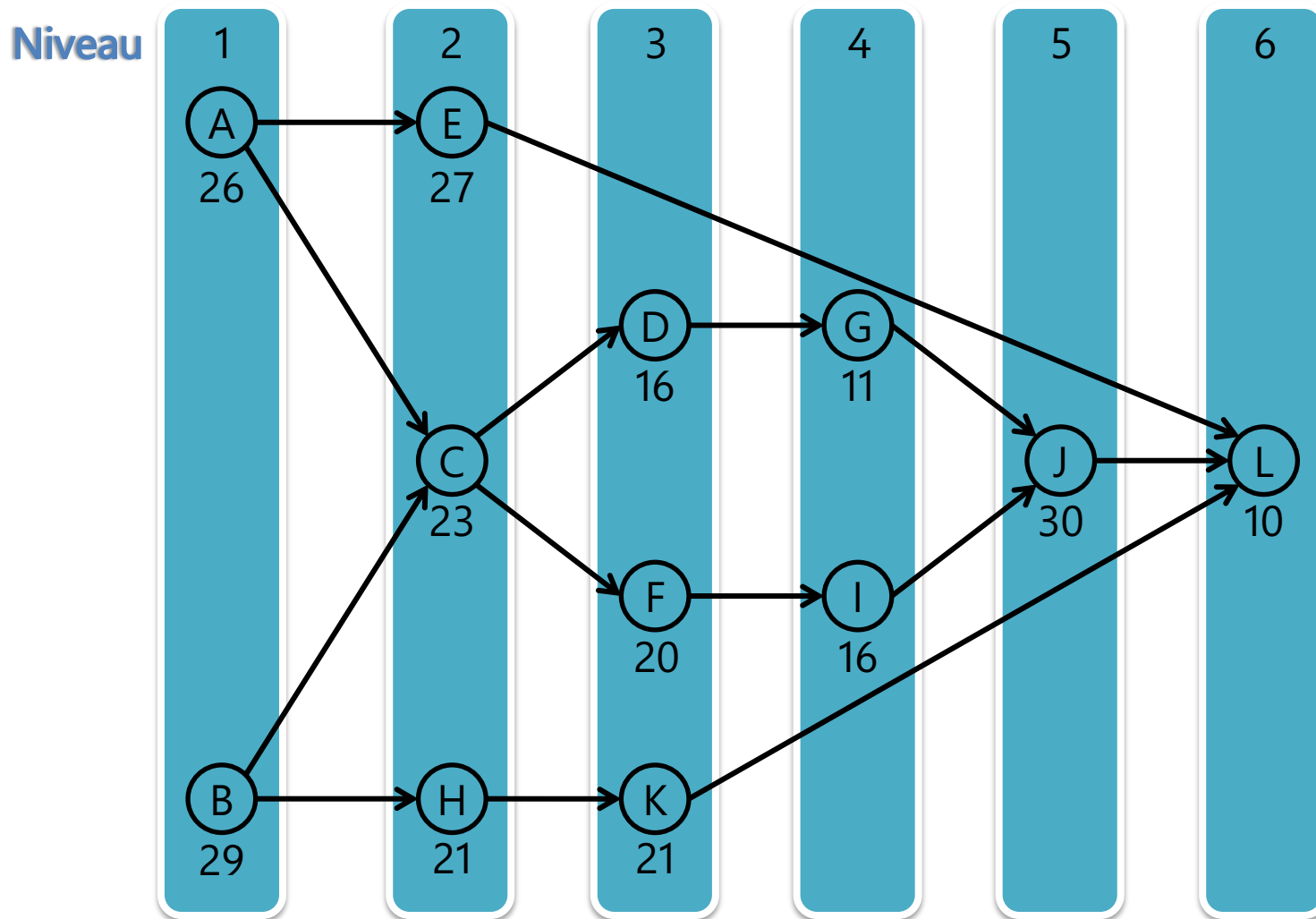
### 1- Heuristique de Kilbridge et Webster

- Classer les opérations par niveaux.
- Les opérations avec les niveaux les plus bas sont assignées en priorité.
- En cas d'égalité, choisir l'opération avec le temps opératoire le plus long.
- Le temps opératoire à chaque poste ne doit pas dépasser le *temps de cycle maximum*.

### Exemple – suite

$$\text{temps de cycle maximum} = \frac{H}{Q} = 40.10^{-3} \text{ heures}$$

## Exemple – suite



Classement par niveaux

### Exemple – suite

Poste	Opérations	Temps opératoires ( $10^{-3}$ h)	Temps morts ( $10^{-3}$ h)
1	B, C	40	0
2	A, H	36,15	3,85
3	E, K	36,92	3,08
4	D, F, I	40	0
5	G, J, L	39,23	0,77

$$perte\ d'équilibrage = 3,85\ \% < 5\ \%$$



## 2- Heuristique de Helgeson et Bernie

- Calculer le *poids positionnel* de chaque opération.
- Effectuer un tri décroissant de la liste des opérations selon le poids positionnel.
- Les opérations avec les poids positionnels les plus élevés sont assignées en priorité.
- En cas d'égalité, choisir l'opération avec le temps opératoire le plus long.
- Le temps opératoire à chaque poste ne doit pas dépasser le *temps de cycle maximum*.

avec :

$$\text{Poids positionnel}(\text{opération}) = \text{durée}(\text{opération}) + \text{durée de tous ses successeurs}$$

### Exemple – suite

Opération	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Poids positionnel (10 <sup>-3</sup> heure)	138	152	97	52	28	58	39	40	43	31	24	8

Calcul du poids positionnel

### Exemple – suite

Poste	Opérations	Temps opératoires ( $10^{-3}$ h)	Temps morts ( $10^{-3}$ h)
1	B, C	40	0
2	A, F	35,38	4,62
3	D, G, I	33,08	6,92
4	H, J	39,23	0,77
5	E, K	39,23	3,08
6	L	7,69	32,31

⇒ Nécessité de mettre en place un sixième poste.

*perte d'équilibrage = 23,85 % !*

## Exemple

Opération	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Préalables	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temps opératoire	20 s	17 s	12 s	16 s	16 s	22 s	18 s	23 s	9 s	19 s

- Déterminer une répartition possible avec 4 postes.
- Déterminer une répartition possible avec 3 postes.

# Références bibliographiques

- Gérard Baglin, Olivier Bruel, Alain Garreau, Laoucine Kerbache, Christian van Delft et Michel Greif, Management industriel et logistique, Economica, 2007.
- Vincent Giard, Gestion de la production et des flux, Economica, 2003.