

Gestion de Production et Logistique

Cyril Briand – briand@laas.fr

- UE KEAX9TB1 Aspects organisationnels et humains**
- Durée : 10h C/TD**
- Objectifs**
 - Comprendre le contexte lié à la fonction logistique
 - Intégrer les diverses facettes de gestion de la chaîne logistique
 - Identifier et résoudre des problèmes de logistiques classiques : planification, gestion de stock, ordonnancement
- Références**
 - GIARD, Gestion de la production, Economica, 2003, 3ème édition
 - MARCHAL, Supply Chain Management : logistique globale, 2018, 2ème édition, Ed. Ellipses

1. Introduction



Définition

□ Définition 1

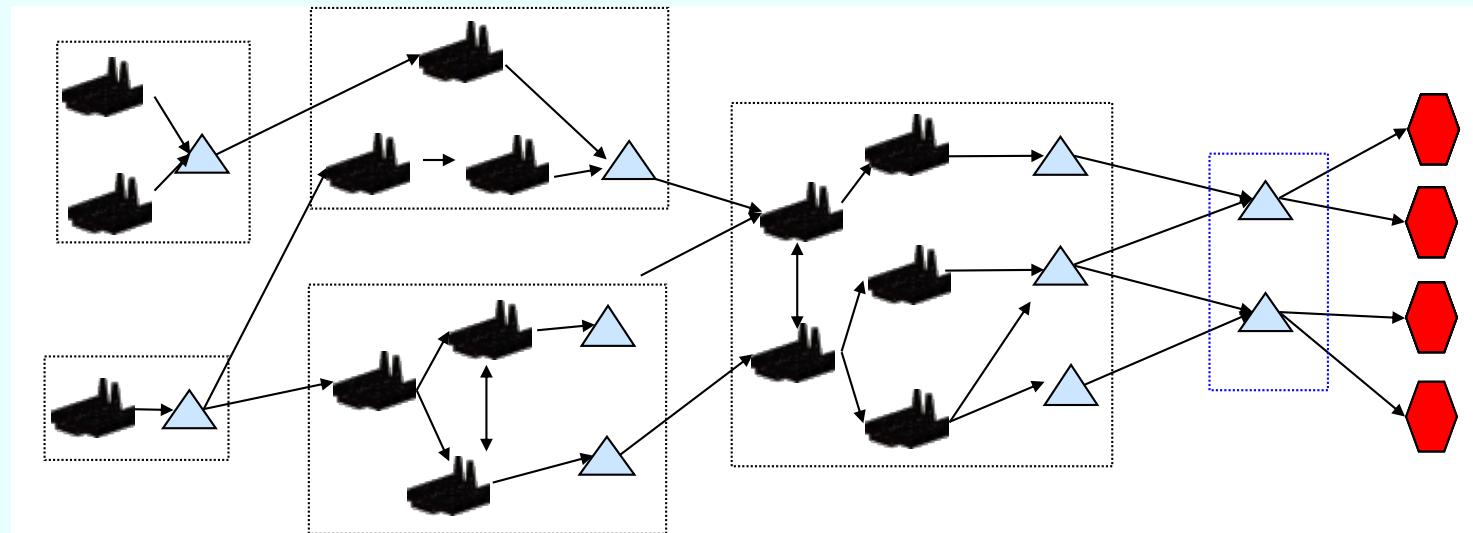
- La logistique est l'activité qui a pour objet de gérer les flux physiques, et les données (informatives, douanières et financières) s'y rapportant, dans le but de mettre à disposition les ressources correspondant à des besoins (plus ou moins) déterminés en respectant les conditions économiques et légales prévues, le degré de qualité de service attendu, les conditions de sécurité et de sûreté réputées satisfaisantes - wikipedia

□ Définition 2

- Planning, execution, and control of the procurement, movement, and stationing of personnel, material, and other resources to achieve the objectives of a campaign, plan, project, or strategy. It may be defined as the 'management of inventory in motion and at rest -
<http://www.businessdictionary.com/definition/logistics.htm>
- It includes a huge amount of different processes
 - Warehousing, ordering, transportation, picking, packing, disposal, delivery, inventory, merge in transit, routing, recycling, expediting, ...

Industrie et chaîne logistique

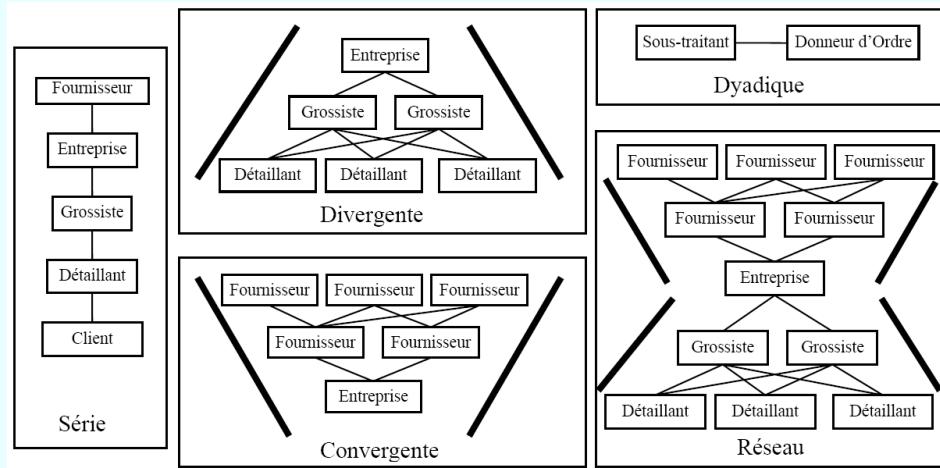
- La satisfaction du consommateur est le résultat de la performance d'un **enchaînement de processus**, allant des fournisseurs aux clients, **dépassant les frontières juridiques de l'entreprise** ...



- Chaine logistique : Réseau d'entreprises ou d'organisations indépendantes qui participent, en amont et en aval, aux différents processus et activités qui créent de la valeur sous forme de produits et de services pour les consommateurs finaux [Christopher 92].
- Différents types de maillon : fournisseur, producteur, assembleur, distributeur, client, sous-traitant, ...

Structures de chaîne logistique

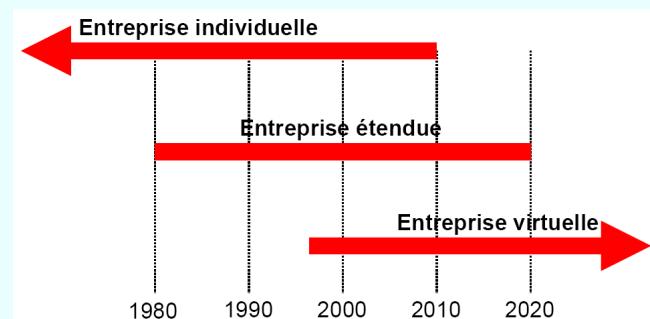
□ Plusieurs structures de chaînes logistiques



Rem : Une même entreprise se situe au carrefour de plusieurs chaînes logistiques => Réseau logistique

□ Quelques définitions

- **Réseaux d'entreprises** : ensemble d'entreprises en relation pour répondre à un besoin précis, non obligatoirement orienté sur le processus d'élaboration d'un produit fini (ex : centrale d'achat / de vente).
- **Entreprise étendue** : réseau d'entreprises partageant un système de gestion permettant l'interopérabilité des entreprises impliquées
- **Entreprise virtuelle** : réseau temporaire d'entreprises indépendantes (souvent concurrentes) qui se regroupent pour exploiter les opportunités du marché



Gestion de la chaîne logistique

Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management en anglais - SCM)

- Gestion intégrée de l'ensemble des flux de matières, de l'approvisionnement en matières premières, de la transformation en produits finis, à la distribution et l'expédition aux clients
- Volonté d'optimiser tous les flux en intégrant les clients et les fournisseurs
- Prise en compte de la totalité du cycle de vie du produit

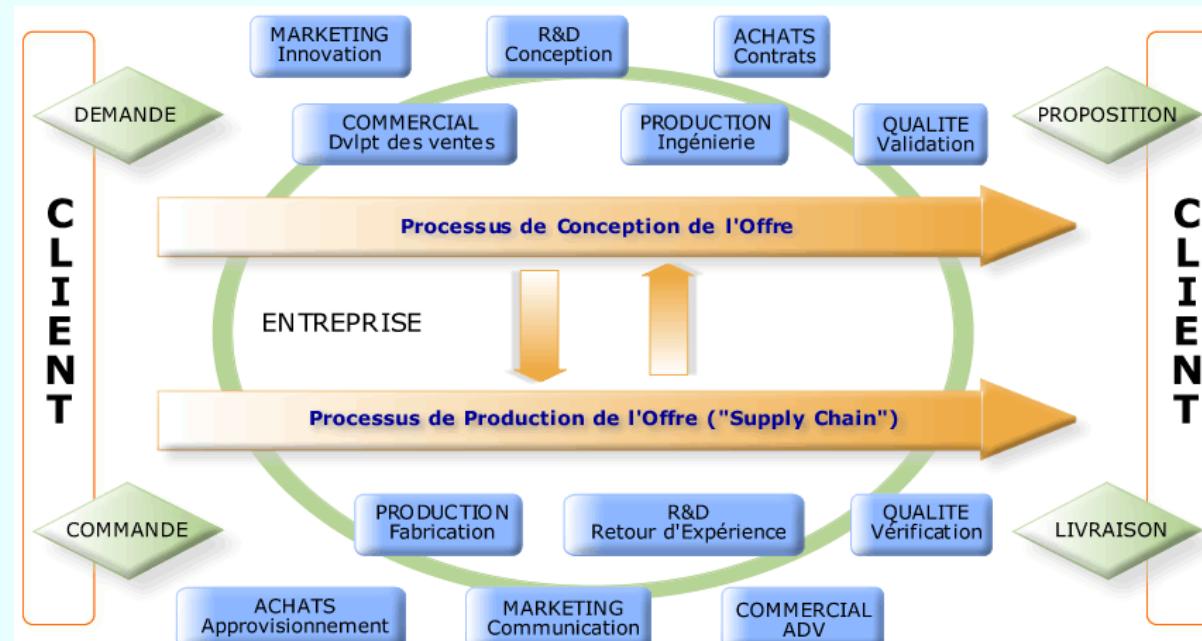
Liens avec le système d'information de l'entreprise et en particulier avec le progiciel de gestion intégré (PGI) ou (ERP pour Enterprise Resource Planning en anglais) de l'entreprise s'il existe ;

- Un PGI mobilise un grand nombre de données et de flux d'informations associés, convenablement organisés et mis à disposition par le biais d'un stockage approprié sous forme de BDD ;
- Il offre une palette de traitements et d'applications logicielles, en phase avec les besoins particuliers des opérateurs logistiques (la notion de tracabilité ou de suivi en temps réel fournissant de bons exemples des exigences à servir).

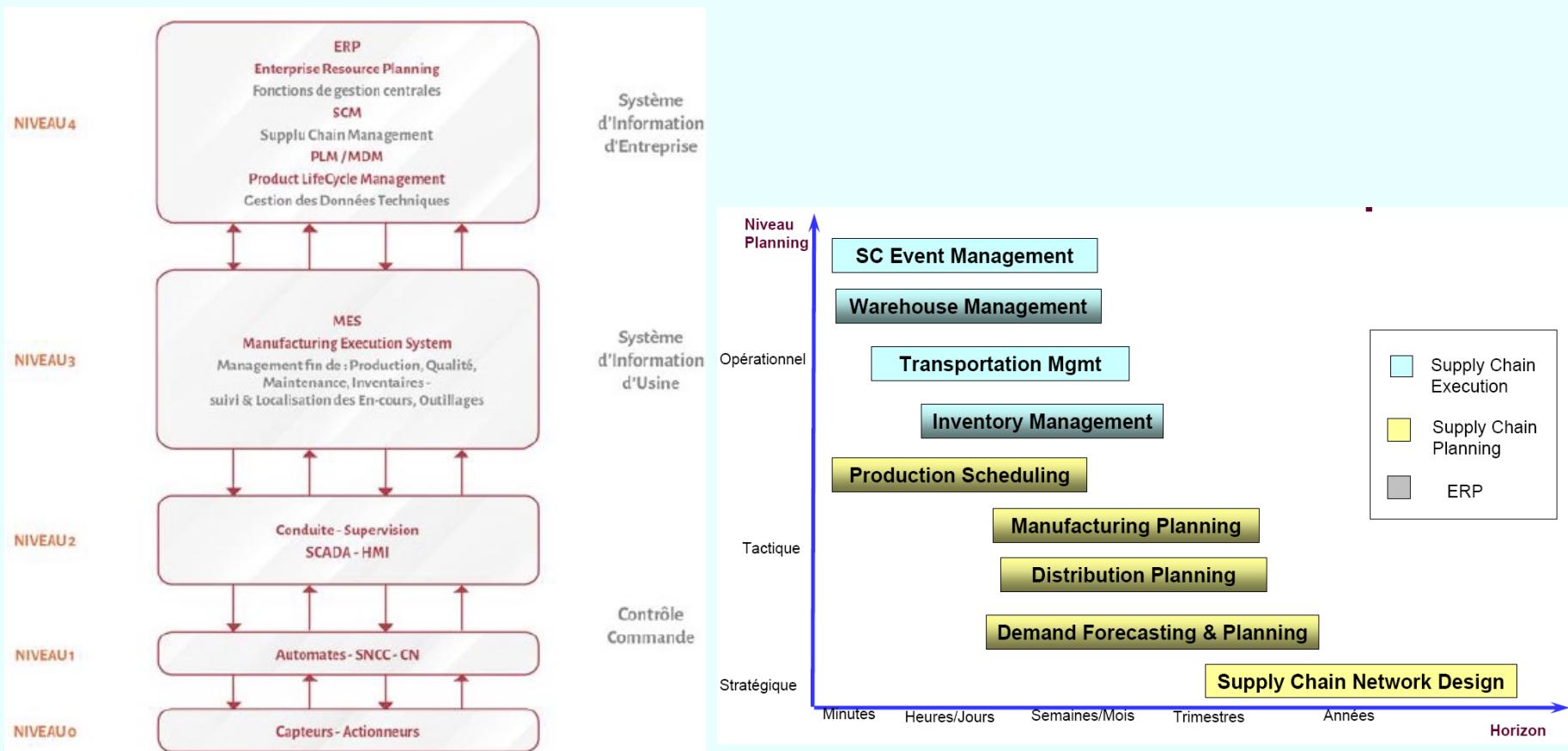
Gestion par les processus

□ Le SCM privilégie une gestion par les processus et les activités

- Entreprise organisée par service => risque de cloisonnement
- Processus = « ensemble d'activités reliées entre elles par des flux d'information et de matière significatifs, et qui se combinent pour fournir un produit matériel ou immatériel important et bien défini » (Lorino, 1997).
 - Exemples de processus : sélection des fournisseurs et des sous-traitants, gestion d'une commande client, création d'un nouveau produit...
 - Un processus symbolise un acte collectif caractérisé par la coopération, la coordination, la planification et la communication entre opérateurs de fonctions différentes



Systèmes d'informations et SCM



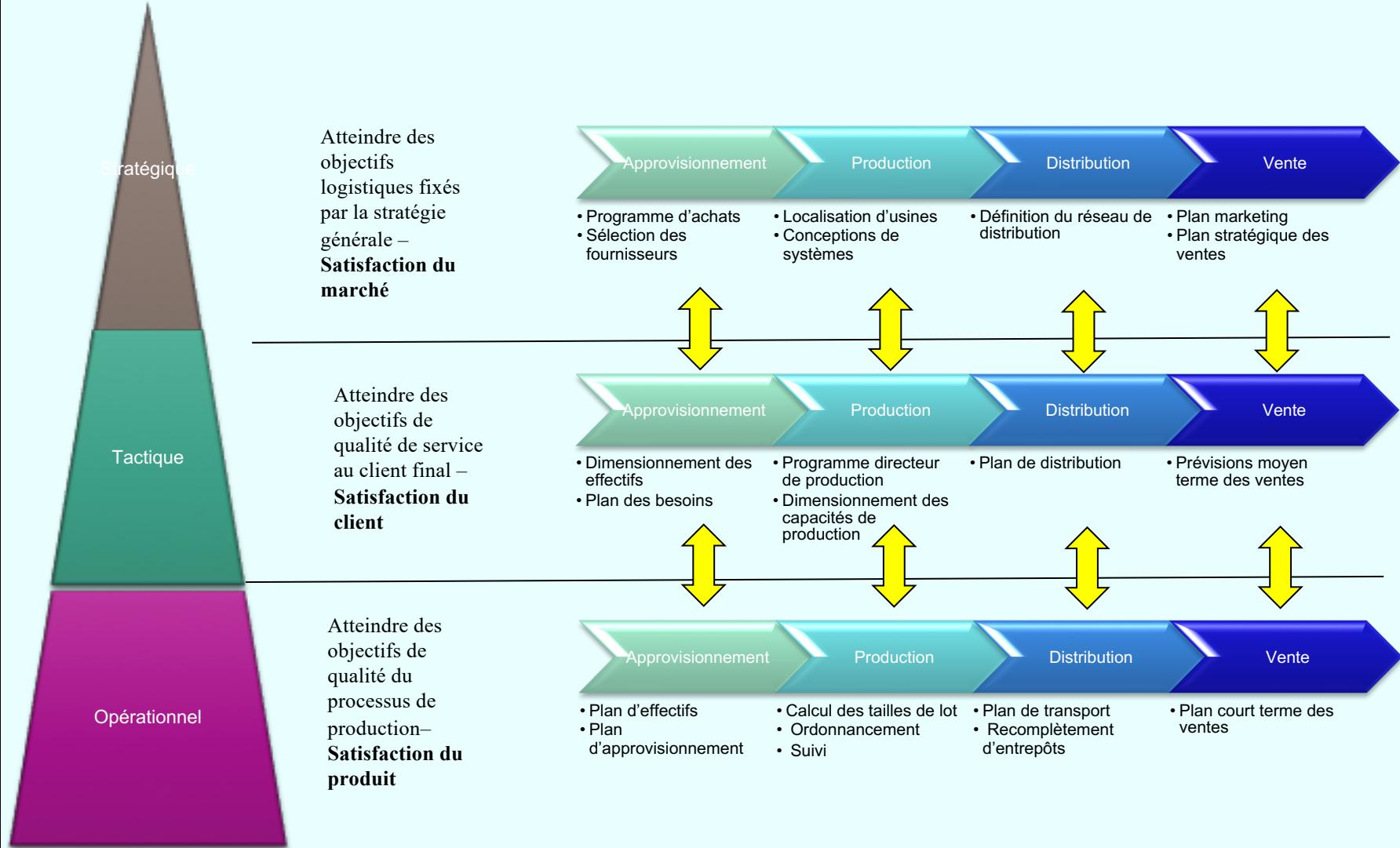
Enabling technologies and tools for digital twin" / Qinglin Qi, et al., Journal of Manufacturing Systems

Niveaux de décision

- Distribution de la décision en plusieurs centres de décision possédant une abstraction et une hiérarchie distinctes
 - Idée : décomposer les problèmes
- [Antony 65] : classification des décisions dans une structure à 3 niveaux qui diffèrent par :
 - l'horizon de décision
 - le niveau de compétence hiérarchique
 - l'agrégation de la décision



Niveaux de décision

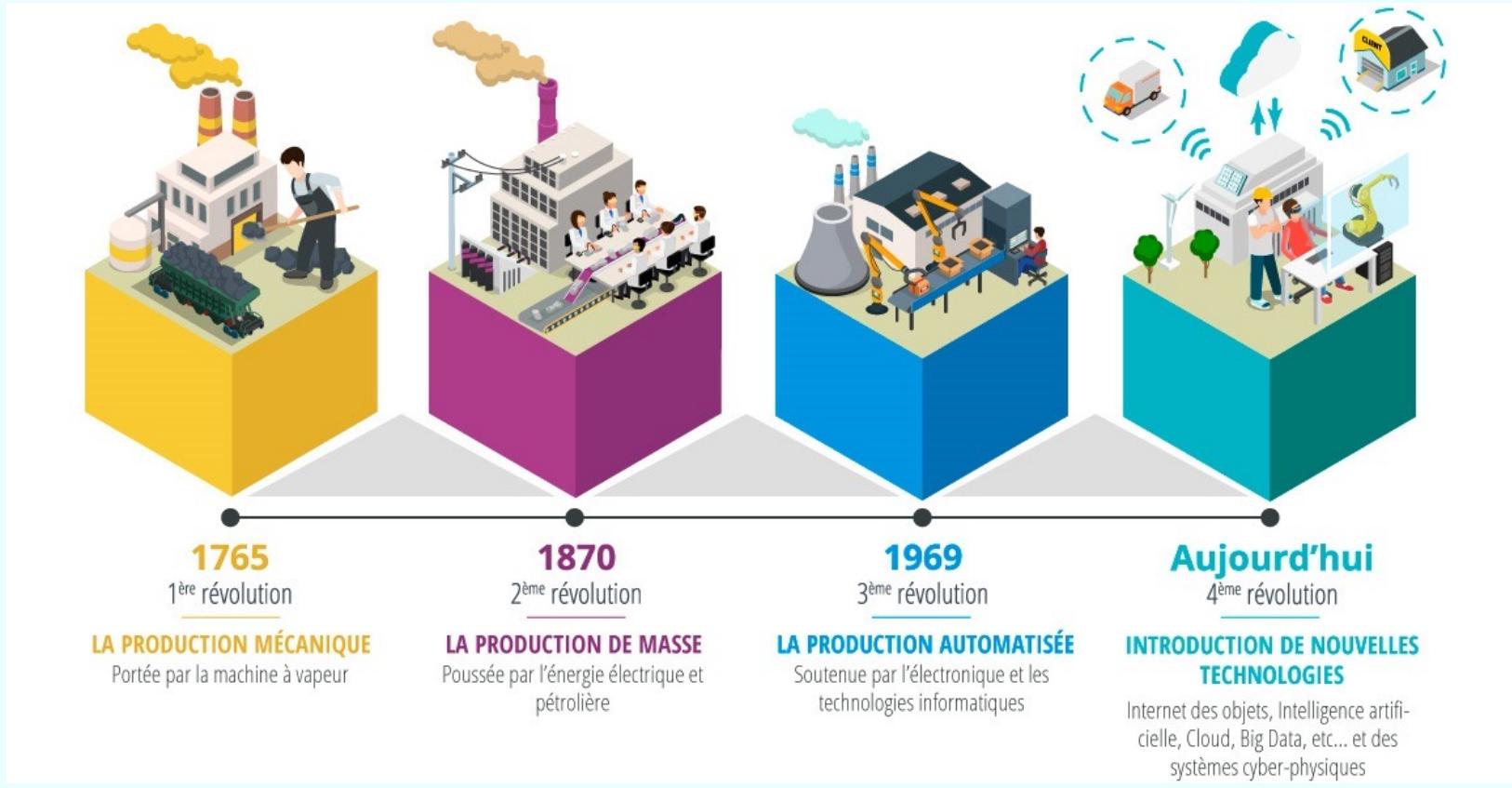


2. La 4^{ème} révolution industrielle



Un peu d'histoire

➤ 4 révolutions industrielles



Les changements de paradigme au cours du temps

Modèle de standardisation (modèle taylorien-fordien)

- Demande > Offre
- Production de masse fortement standardisée
- Optimisation des taux de production (3 * 8h, heures sup, cadences imposées)

Modèle de variété

- Augmentation de la concurrence → nécessité de personnaliser les produits
- Production de masse
- Flexibilité des équipements / Stock

Modèle de réactivité

- Demande < Offre → S'adapter rapidement à la demande
- Demande incertaine → Produire uniquement ce qui sera vendu
- Amélioration continue de l'organisation pour être compétitive
- Anticiper / Innover
- Réduire les temps de cycle entre commande-livraison et les coûts (optimisation des flux)
- Différenciation retardée

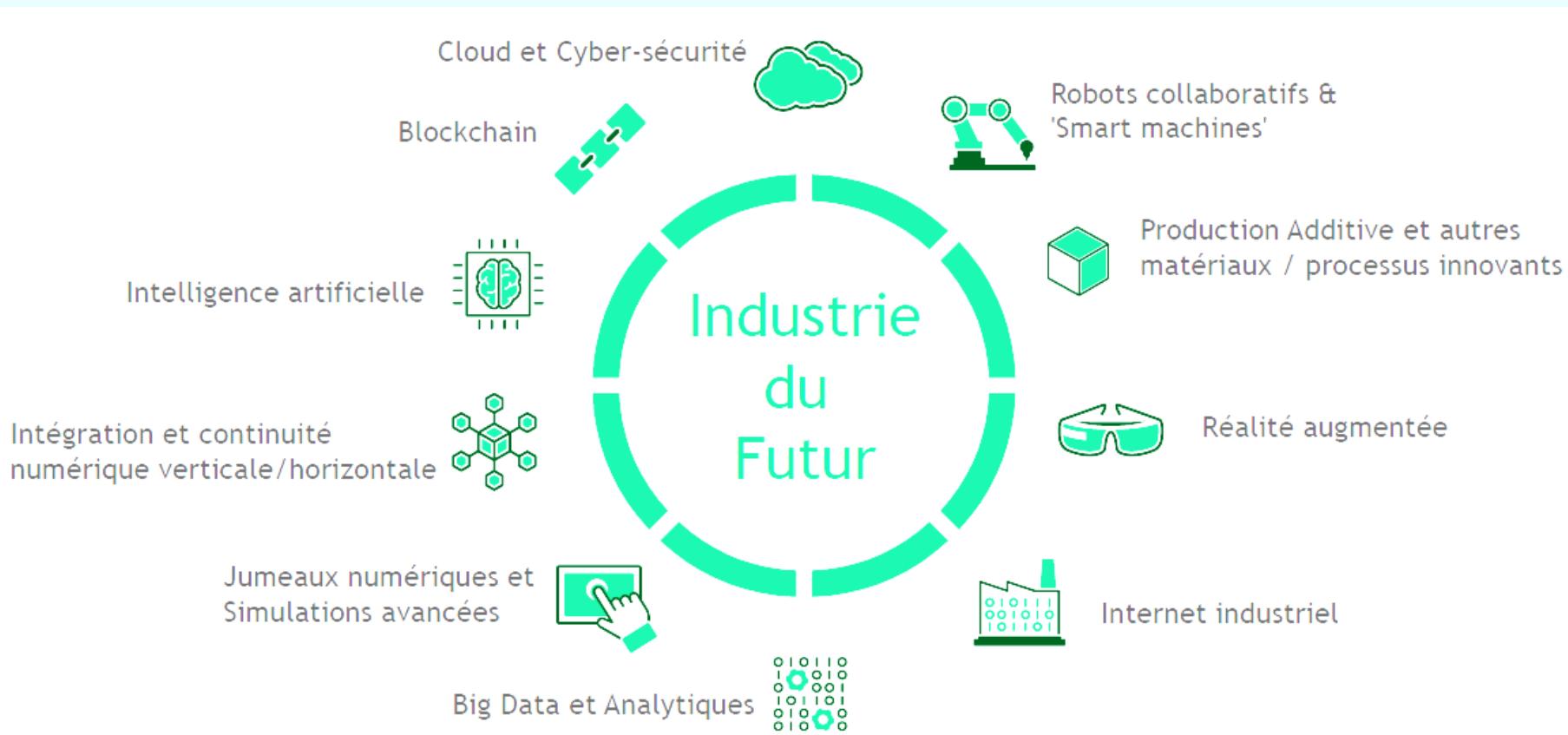
Modèle global

- Optimiser les flux dans leur ensemble depuis les fournisseurs de matières brutes jusqu'au client final (paradigme de **gestion de la chaîne logistique - SCM**)
- L'entreprise devient elle-même éphémère : elle se crée et se défait selon les opportunités du marché et les opportunités économiques
- Optimiser les processus et éliminer les gaspillages : **Lean Manufacturing**

Modèle de la personnalisation de masse

- Produire à l'unité au prix de la série
- Agilité des systèmes de production
- Optimisation très fine et agile des processus

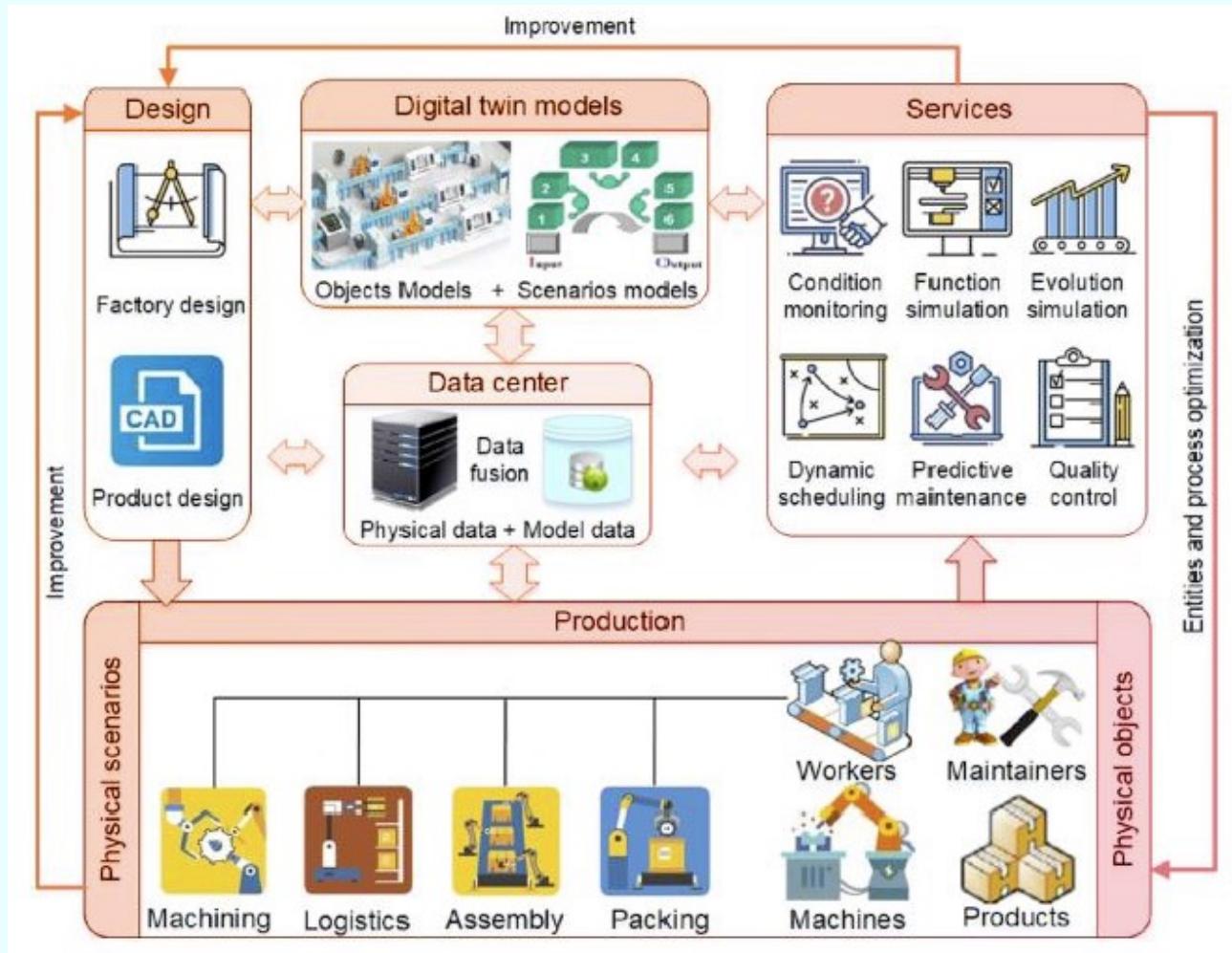
Les technologies supports



THE BOSTON CONSULTING GROUP

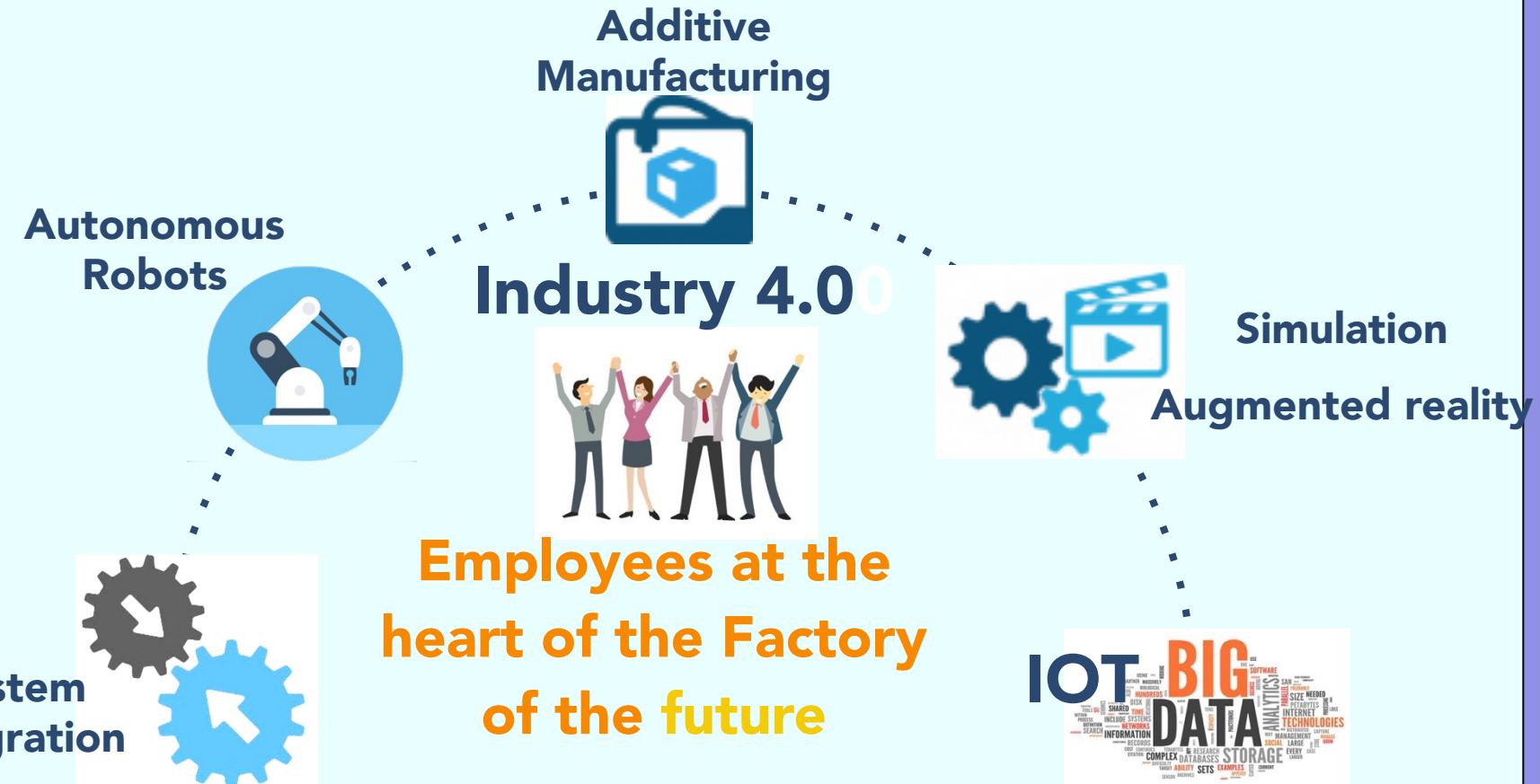
« Industrie du Futur : enjeux et perspectives pour la filière aéronautique»
Boston Consulting Group - PIPAME

Une vision golabe



<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>

Une vision centrée sur l'homme ?



3. Robotique pour la logistique



*The future of
logistics is
now!*

*And it's going
to be
robotic...*

Les facteurs du changement

La robotique était déjà un facteur clé de la 3^{ème} révolution industrielle

- Robots de manipulation, peinture, assemblage, ...
- Coûts intégration lourds
- Pas de flexibilité : toujours la même tâche dans un environnement fermé

Aujourd'hui ..

- Investissements massifs dans la robotique
 - June 2018 Google invested \$500 million into automated logistics for JD (the Chinese equivalent to Amazon)
 - Alibaba invested \$15 billion into its own robotic logistics infrastructure.
 - *The global market for warehousing and logistics robotics is now projected to exceed \$22 billion by the end of 2021*
- Coûts en baisse
 - Robots et leur intégration
- Cobotique et sécurité par barrières optiques
 - Possibilité de sortir les robots des cages
 - ... et donc de les utiliser plus facilement pour des tâches différentes
- Mobilité indoor/outdoor
 - Possibilité de faire naviguer un robot de façon autonome dans un environnement industriel (en garantissant la sécurité)
 - Bras manipulateur mobiles

Exemples

□ Approvisionnement (Amazon, Alibaba, ...)



Exemples

□ Warehousing



Exemples

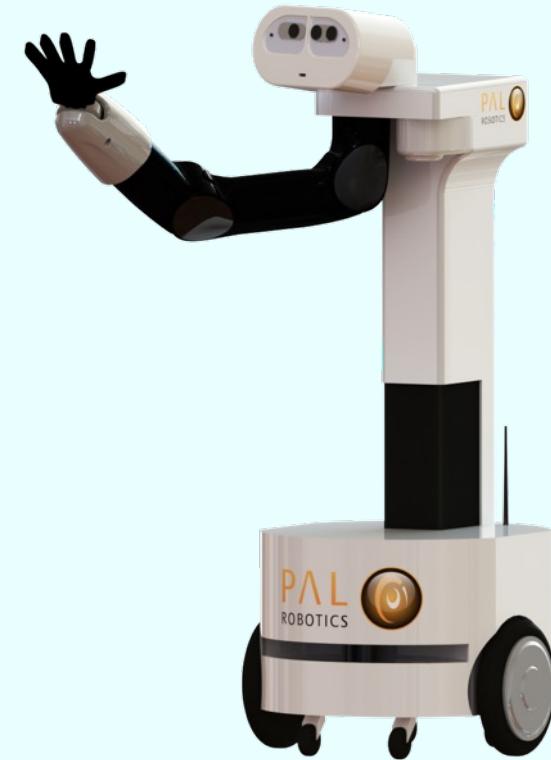
□ Tri



Hikrobot's MR-Q1-UR001A sorting robot

Exemples

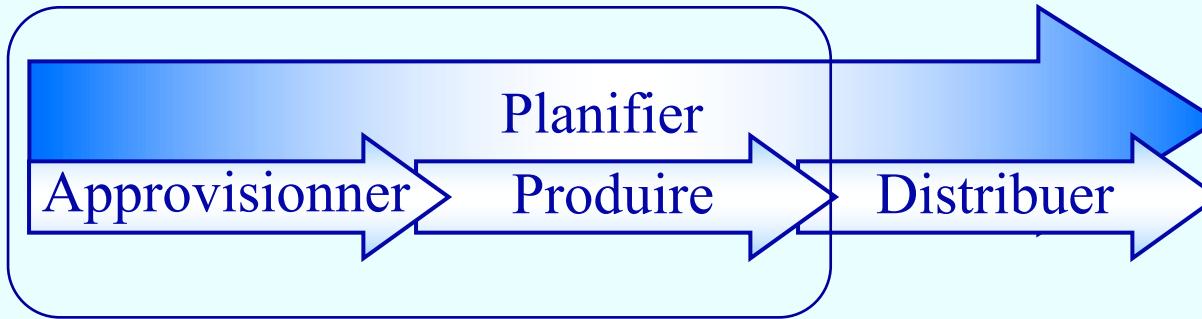
□ Manipulateurs mobiles



4. Planification de la production et des approvisionnements

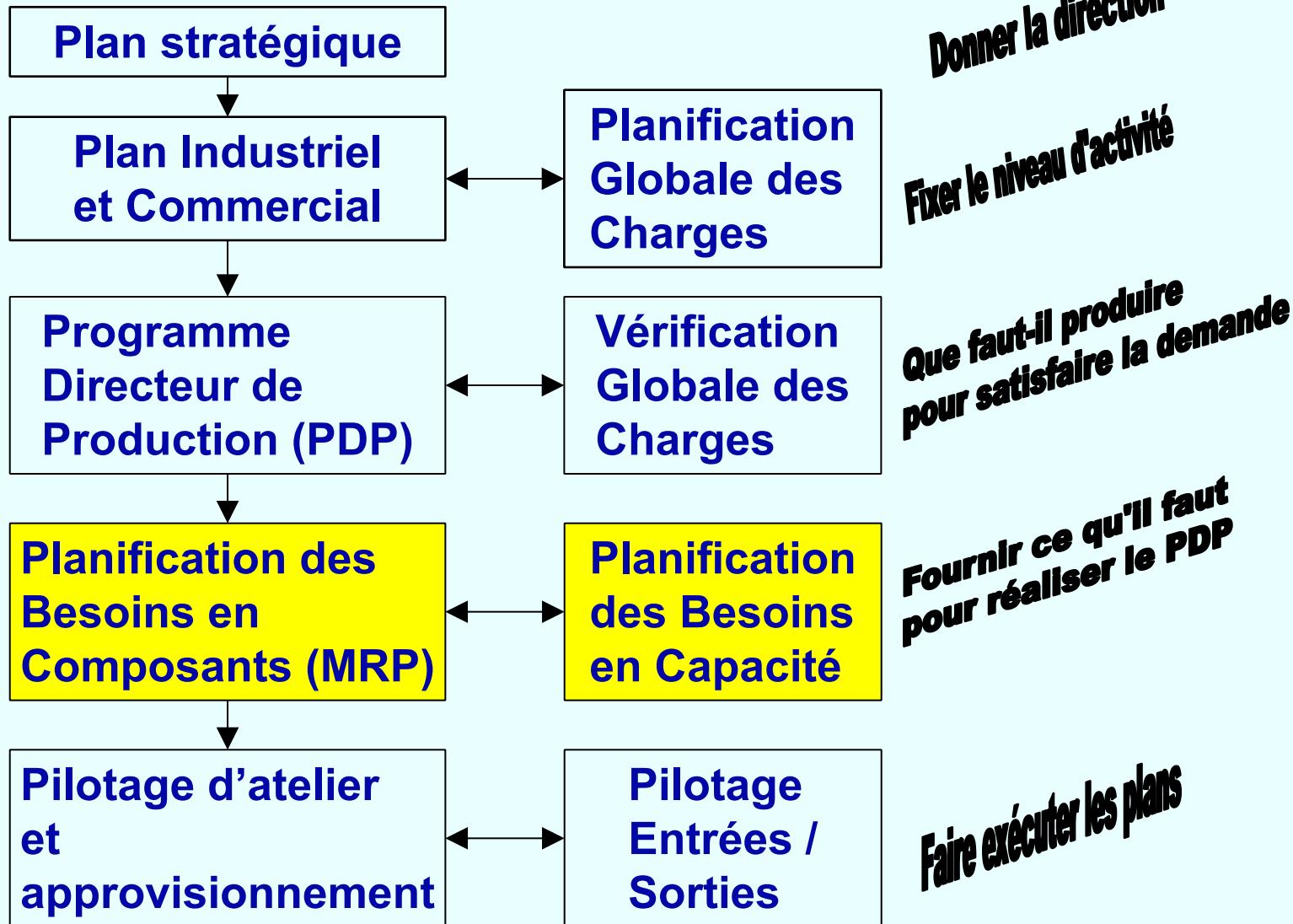


Positionnement

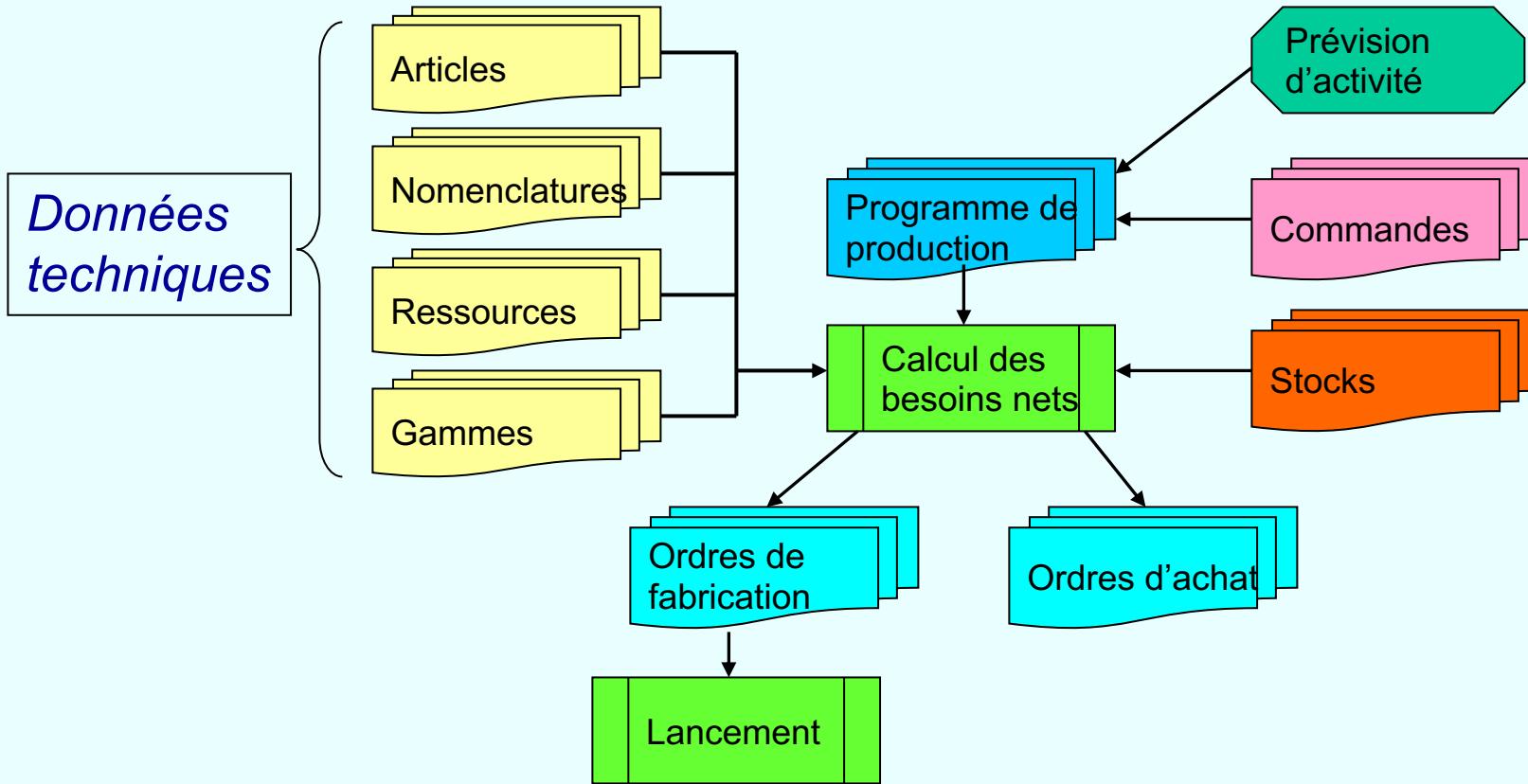


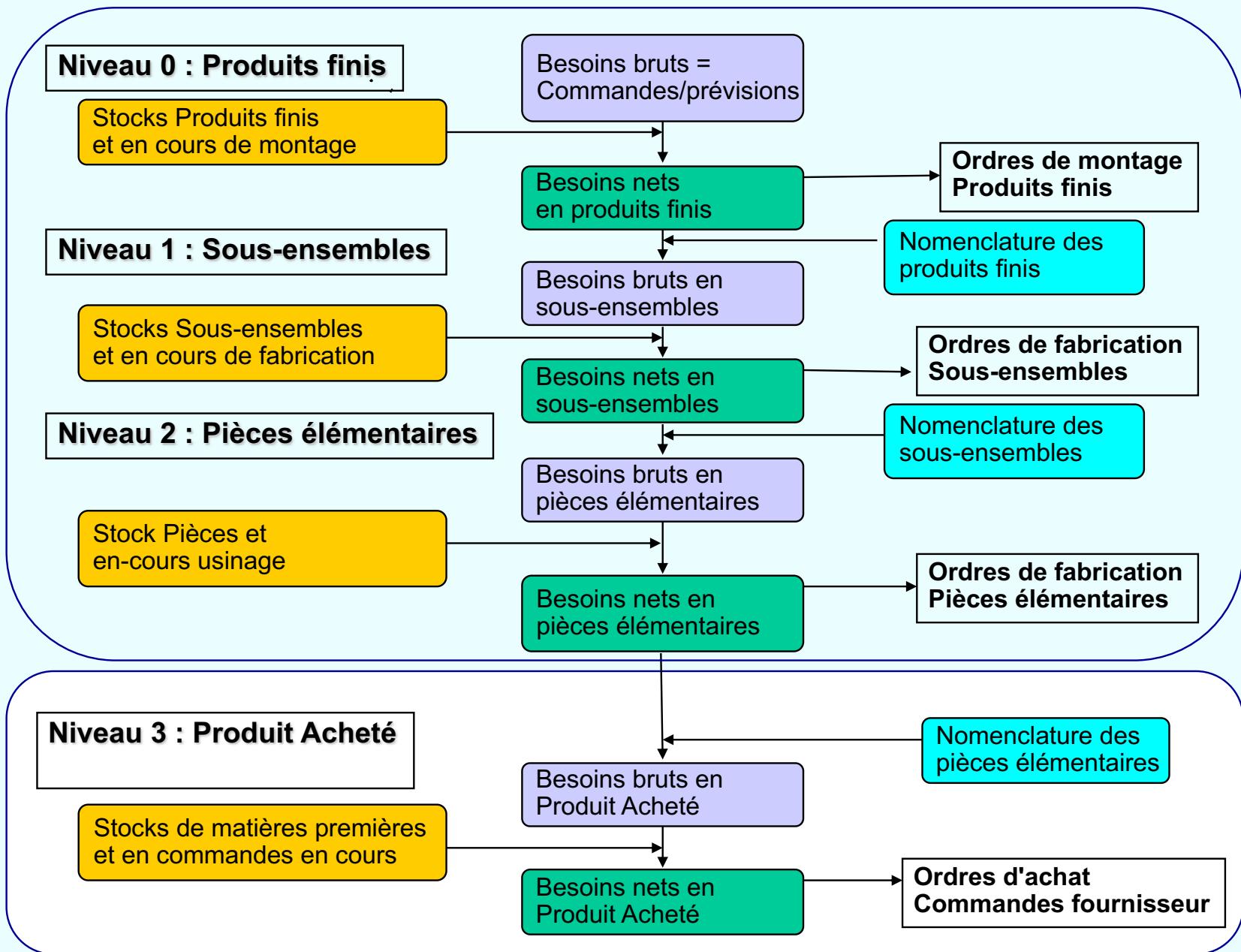
- Planification de la production et des approvisionnements**
 - Programmation prévisionnelle
- Pourquoi planifier ?**
 - Pour anticiper le besoin matières (approvisionnement)
 - Pour anticiper les besoins en capacité (production)
- Comment planifier?**
 - Calcul de ce qu'il faudrait faire/approvisionner en fonction
 - De besoins (prévisions, calculs...)
 - De contraintes (niveau de stock, taille de lots...)
 - Calcul de ce qu'on peut faire ...
 - Méthode à flux poussés
- Méthode « Manufacturing Resource Planning » (MRP2)**
 - Wallace (1984)

Manufacturing Resource Planning (MRP2)



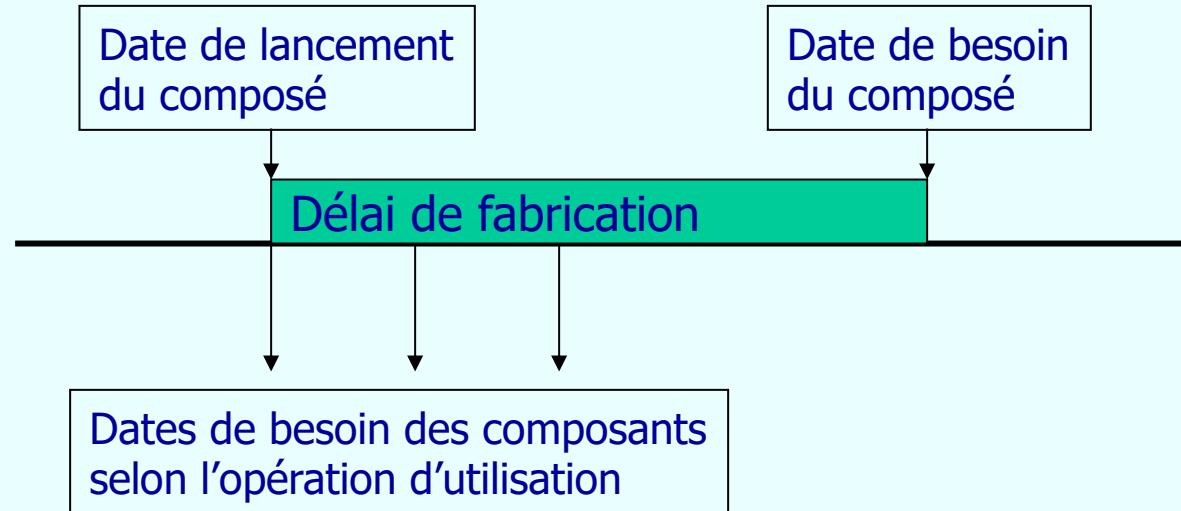
Calcul des Besoins Nets



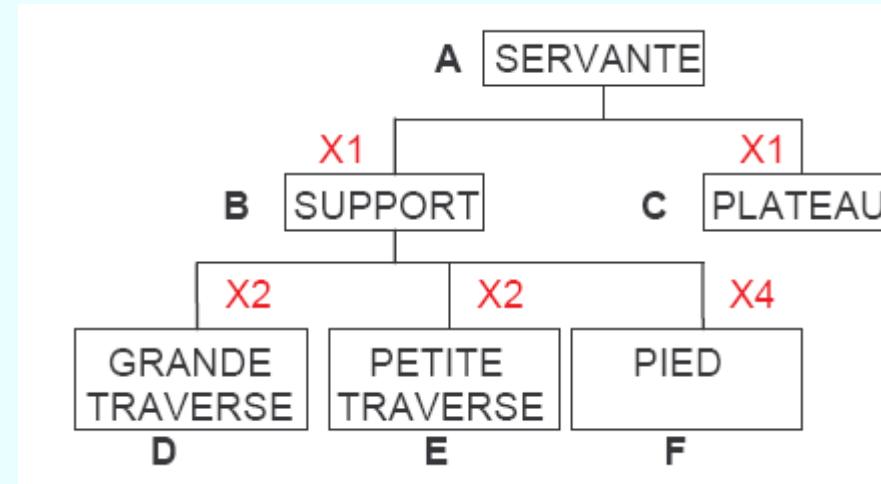


Prise en compte des délais d'approvisionnement

- Pour déterminer les dates de lancement et de commande, il faut tenir compte du délai d'obtention des articles
 - Produits achetés : délai de livraison du fournisseur
 - Produits fabriqués : temps nécessaire à la fabrication d'un lot
 - délai fixe
 - dépendant de la quantité, de la charge et de la gamme de fabrication



Exemple



La nomenclature est une décomposition arborescente du produit. Elle est constituée de :

- Niveau 0
 - composés et composants (*articles*),
 - liens entre les articles,
- Niveau 1
 - coefficient multiplicateur représentant la quantité d'un composant nécessaire pour la fabrication d'un composé,
- Niveau 2
 - niveaux de nomenclature.

Exemple

Plan Directeur de Production

COMPOSE	PERIODES N° Semaine				
		4	5	6	7
	P.D.P.	100	50	100	200

Le but du Plan Directeur de Production est d'établir un échéancier des produits finis à produire en fonctions des prévisions commerciales, des commandes clients et du stock prévisionnel de produits finis.

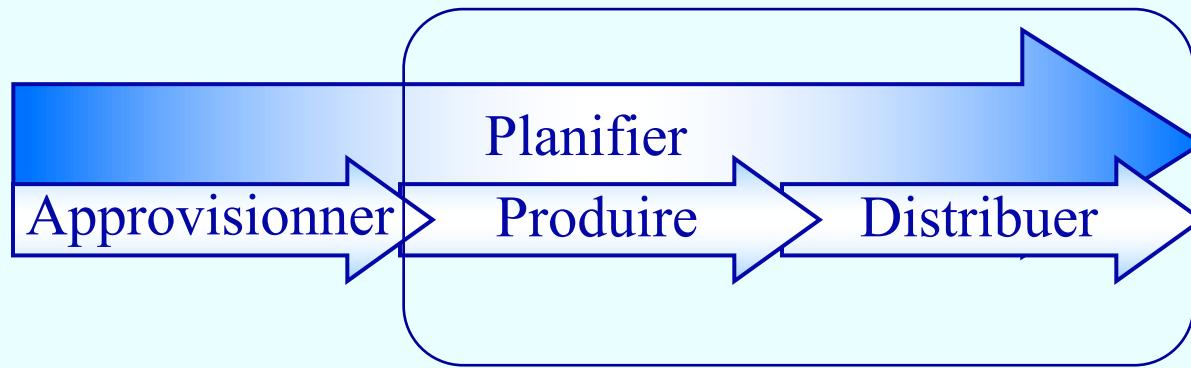
Articles disponibles et en-cours en période 3

A	B	C	D	E	F
20	0	10	100	100	400

Dans l'exemple traité les délais d'assemblage de la servante et du support sont négligeables à l'échelle de notre étude. Le délai d'obtention du plateau est de 2 périodes. Les délais d'obtention des autres composants sont pour chacun d'une période.

PERIODES		2	3	4	5	6	7
A	d0	BB		100	50	100	200
		AD	20	0	0	0	0
		BN		80	50	100	200
		OP		80	50	100	200
B Ax1	d0	BB	x1	80	50	100	200
		AD	0	0	0	0	0
		BN		80	50	100	200
		OP		80	50	100	200
C Ax1	d2	BB		80	50	100	200
		AD	10	0	0	0	0
		BN		70	50	100	200
		OP	70	50	100	200	
D Bx2	d1	BB		160	100	200	400
		AD	100	0	0	0	0
		BN		60	100	200	400
		OP	60	100	200	400	
E Bx2	d1	BB		160	100	200	400
		AD	120	0	0	0	0
		BN		40	100	200	400
		OP	40	100	200	400	
F Bx4	d1	BB		320	200	400	800
		AD	400	80	0	0	0
		BN		0	120	400	800
		OP	0	120	400	800	

Intégration planification production et distribution



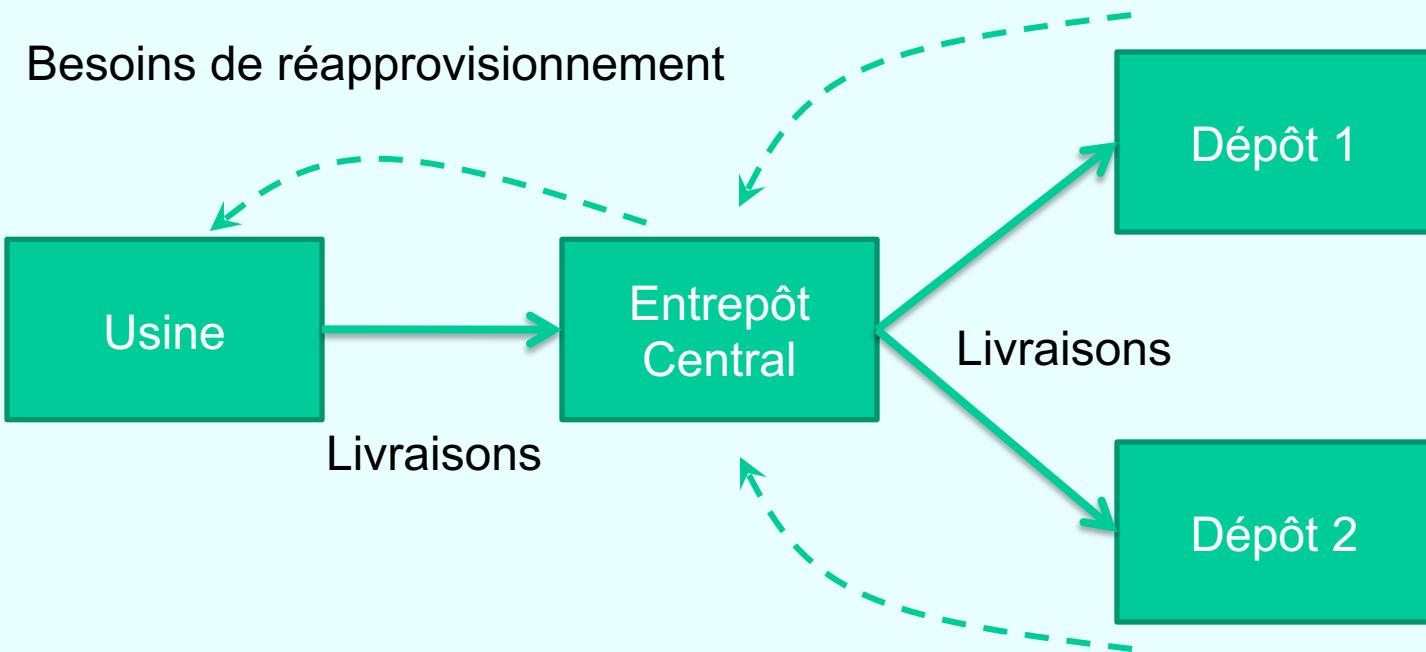
Intérêts

- Synchronisation de l'offre et de la demande dans toute la chaîne
- Calcul de la demande
- Simulation des flux prévisionnels à tous les niveaux de la chaîne
- Anticipation des fluctuations de la demande
- Amélioration des plannings de réception en entrepôt
- Amélioration des plannings de transport
- Prévision des besoins en surface d'entreposage et investissements

Logique de réalisation

- Recueillir des informations provenant de la demande locale de chaque zone desservie pour chaque entrepôt
- Remonter ces informations à l'entrepôt central
- Remonter ces informations au niveau des usines

Exemple



Détermination des commandes prévisionnelles

□ Exemple de besoin caractérisés pour un dépôt (dépôt 1)

Périodes		1	2	3	4	5	6
Besoins		100	120	90	110	120	100
Réceptions prévues							
Stock	320	220	100	160	200	230	130
Réceptions à prévoir				150	150	150	
Commandes		150	150	150			

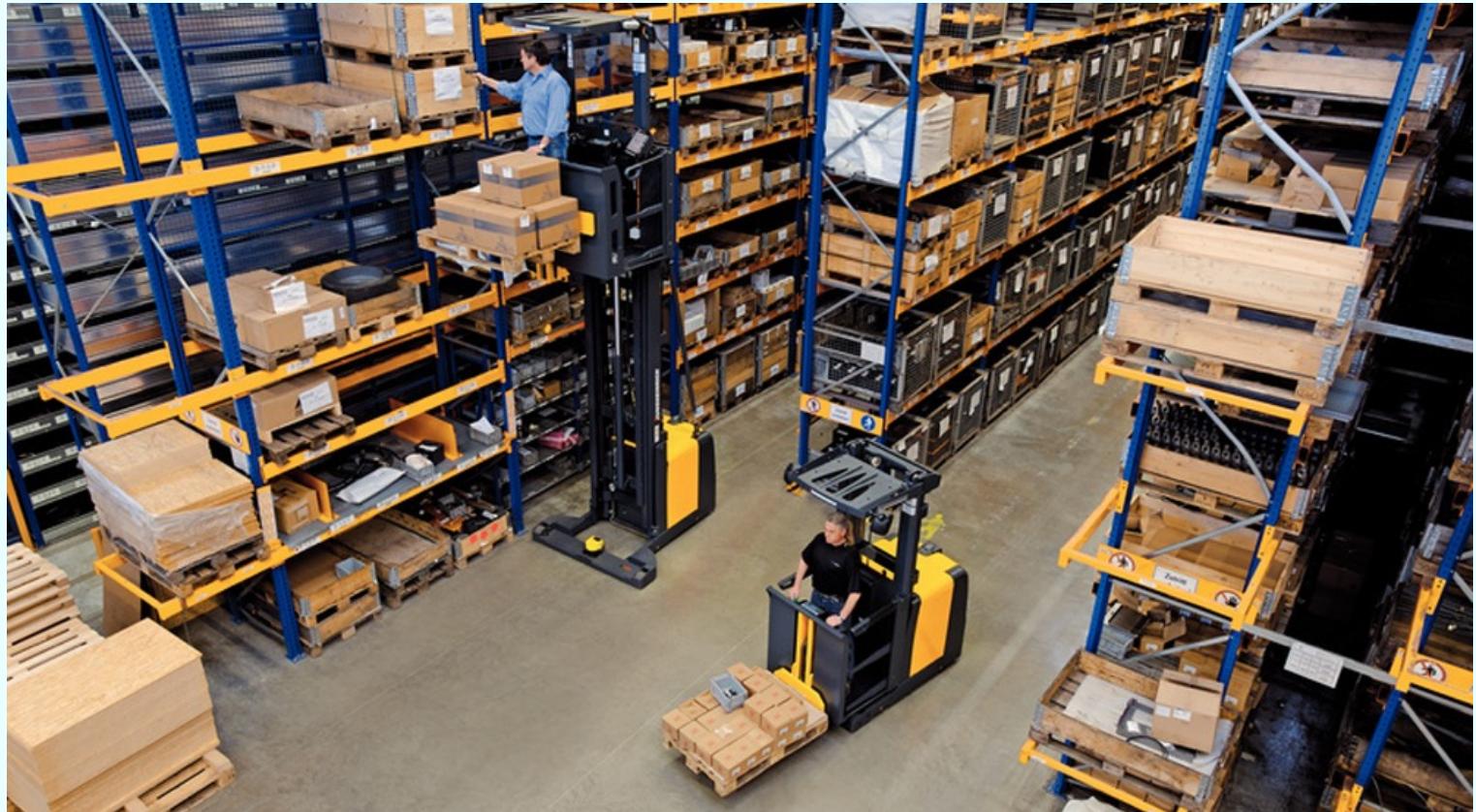
Lots 150

Stock de : sécurité 100

Délai 2 périodes

Périodes		1	2	3	4	5	6
Dépôt 1 (lots150/stock min100/délai2)							
Besoins		100	120	90	110	120	100
Stock	320	220	100	160	200	230	130
Réceptions à prévoir			150	150	150		
Commandes		150	150	150			
Dépôts 2 (lots100/stock min20/délai2)							
Besoins		15	15	20	25	20	50
Stock	60	45	30	110	85	65	115
Réceptions à prévoir			100				100
Commandes		100		100			
Entrepôt (lots400/stock min160/délai0)							
Besoins		250	150	150	100		
Stock	400	550	400	250	550		
Réceptions prévues et à prévoir		400			400		
Commandes		400			400		

5. Gestion d'inventaires



Le stock : nature et fonctions

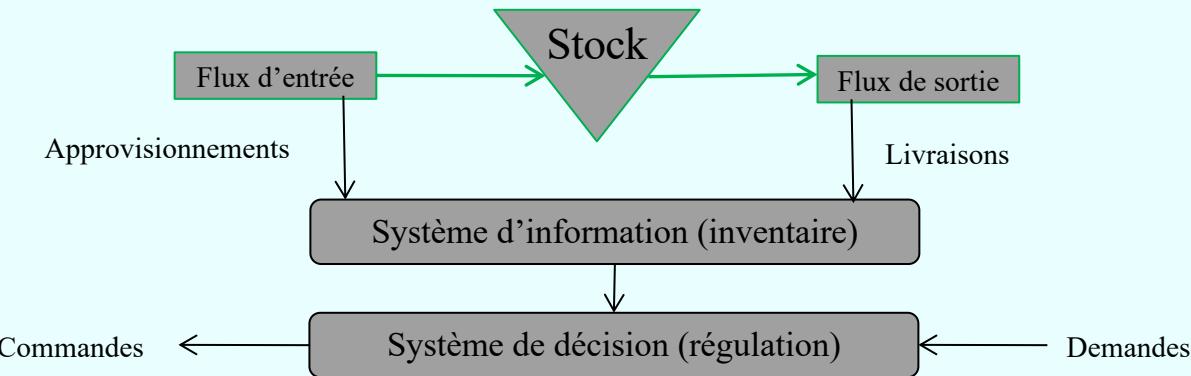
- Bien qu'en théorie le zéro stock est l'objectif recherché au sein d'une entreprise (pas d'argent immobilisé), en réalité, une production sans stock est quasi inconcevable du fait des nombreux avantages que les stocks amènent
 - Cas 1 : non coïncidence dans le temps entre le besoin et l'espace de production
 - Il est **impossible** de satisfaire la demande au moment où elle se manifeste
 - Nécessité d'anticiper la demande et de faire des stocks
 - Ex : Production de jouets, Approvisionnement des rayons d'un supermarché
 - Cas 2 : incertitude sur le niveau de demande ou sur le prix
 - Pour la *quantité demandée* : on constitue un **stock de sécurité permettant** de faire face à une pointe de demande.
 - Pour une incertitude sur le *prix*, on va constituer un **stock de spéculation (ex : pétrole)**.
 - Cas 3 : risque de problèmes sur les chaînes de production non-négligeables ou approvisionnements incertains
 - Stocks intermédiaires tampon
 - Cas 4. présence de coûts fixes de lancement
 - Produire par lots permet une économie d'échelle mais provoque des stocks

Le stock : nature et fonctions

□ La gestion des stocks pose cependant de multiples problèmes :

- tenue d'inventaires,
- valorisation du stock,
- définition des capacités de stockage
- disponibilité satisfaisante du stock.

□ Notion de système stock



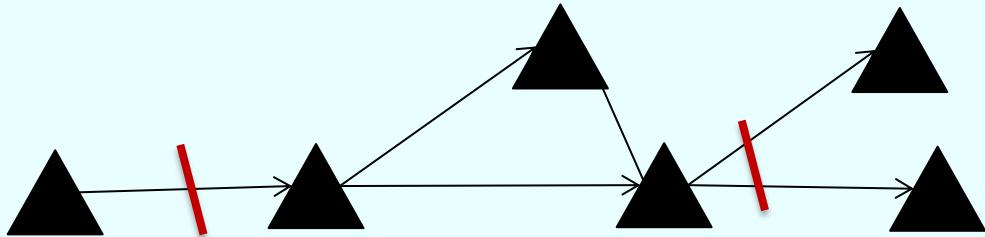
Quand réapprovisionner ? De combien ? {Quels fournisseurs ?}

- Gestion périodique / asynchrone de la régulation

Le stock : nature et fonctions

□ Les stocks sont partout

- Dans l'entreprise : stocks à étage



- Les stocks d'approvisionnement (anticipation des fluctuations des prix d'achat, protection contre les défaillances de fournisseur)
- Les stocks d'en-cours (découplage des divers stades de la production, protection contre les arrêts momentanés de production)
- Les stocks de distribution (délais de livraison plus courts, amortissement des fluctuations de la demande / de production)

- Entre les maillons de la chaîne logistique

□ Caractéristiques du flux entrant

- Interne / externe
- Délai d'obtention : temps entre commande et approvisionnement
- Prix achat (fonction quantité)

□ Caractéristiques du flux sortant

- Interne (demande dépendante de la production) /externe (demande indépendante)
- Déterministe → constante ou calendrier de livraison
- Aléatoire → distribution de probabilité (loi normale – courbe de Gauss)
- Gestion périodique de la demande
 - Statique : les caractéristiques de la demande sont les mêmes de période en période
 - Dynamique : la demande fluctue selon la période

Coûts associés à un stock

les coûts d'acquisition

- Combien cela coûte t'il d'approvisionner ?
- Proportionnel au nombre d'articles commandés/fabriqués + un cout fixe (frais de commande, préparation du système de production)

les coûts de possession

- combien cela coûte t'il proportionnellement à la quantité stockée d'avoir et de maintenir un stock ?
- Amortissement mise en place + frais inventaire + immobilisation de capital
- On l'estime comme une pourcentage du prix de l'article (souvent 20 à 30%)

les coûts de rupture (de pénurie)

- Combien cela coûte t'il de ne pouvoir honorer une demande à temps ?
- Vente différée : Surcoût administratif + pénalités + déficit d'images
- Vente perdue : Manque à gagner + Déficit d'image
- Lorsque le flux sortant est interne, on cherche à éviter les ruptures

Les deux derniers coûts sont difficiles à évaluer

Problématique

- D'après le plan de production et les nomenclatures des produits il est possible d'établir la demande par période pour chaque type de composants

- Exemple

- Demande annuelle $D_{an}=1200$ (52 sem), Période = 1 sem, *Délai de réapprovisionnement L = 5s, Cout approvisionnement : $C_c=5$, Coût de possession C_p par période = 0.029*

Périodes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Demandes		50	15	10	0	25	50	10	10	10	40	60	30	5
Besoins nets														
Livraisons														
Stock	150													
Commandes														

- Besoins net = Demande dans la période - Stock période précédente - Livraisons attendues dans la période

- Comment déterminer pour chaque période les commandes à passer afin de minimiser le coût de stockage ?

Heuristique « Lot for Lot »

C'est la méthode la plus simple ...

- Elle consiste à commander exactement le nombre d'articles nécessaires pour couvrir les besoins nets d'une seule période en anticipant le délai
 - On minimise donc le niveau de stock mais on passe souvent commande
 - Cela est bien adapté lorsque le coût de possession est élevée par rapport au coût de commande
 - Le choix de la durée de la période est importante

Exemple

Périodes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Demandes		50	15	10	0	25	50	10	10	10	40	60	30	5
Besoins nets		0	0	0	0	0	0	10	10	10	40	60	30	5
Livraisons								10	10	10	40	60	30	5
Stock	150	100	85	75	75	50	0	0	0	0	0	0	0	0
Commandes			10	10	10	40	60	30	5					

- Coût = 7 commandes * 5 + (100+85+75+75+50)*0,029=46.165

Heuristique « Economic Order Quantity »

- Elle consiste à commander la quantité économique (déterminée par la formule de Wilson ou par simulation) lorsque le besoin net est > 0 (on anticipe le délai)
 - adaptée dans le cas d'une demande régulière
- Exemple
 - $EOQ = (2*D*Cc/Cp)^{1/2} = (2*(1200/52)*5/0.029)^{1/2} = \text{environ } 90$

Périodes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Demandes		50	15	10	0	25	50	10	10	10	40	60	30	5
Besoins nets		0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	40	0	0
Livraisons								90				90		
Stock	150	100	85	75	75	50	0	80	70	60	20	50	20	15
Commandes			90				90							

- Coût = $2 * 5 + (385+315) * .029 = 30,3$

Méthode exacte

□ Méthode de Wagner-Whitin

- Principe : une commande passée en période i doit couvrir exactement la demande d'un nombre p de périodes à venir (et $Q_{i+1}=Q_{i+2}=\dots=Q_p=0$)
- On représente le problème par un graphe
 - Un sommet V_i représente la fait que l'on passe une commande en période i
 - Un arc de i à k représente ($k>i$) représente le fait que l'on passe commande en i et la suivante en $i+k$ ($Q_i=D_i+\dots+D_{i+k-1}$) et est valué par le coût
 $V(i,k)=Cc+Cp(D_{i+1}+2D_{i+2}+\dots+(k-1)D_{i+k-1})$
- Sur n périodes, on cherche le chemin reliant V_1 à V_n de coût minimum → plus court chemin
- Retour à l'exemple :
 - Matrice des coûts

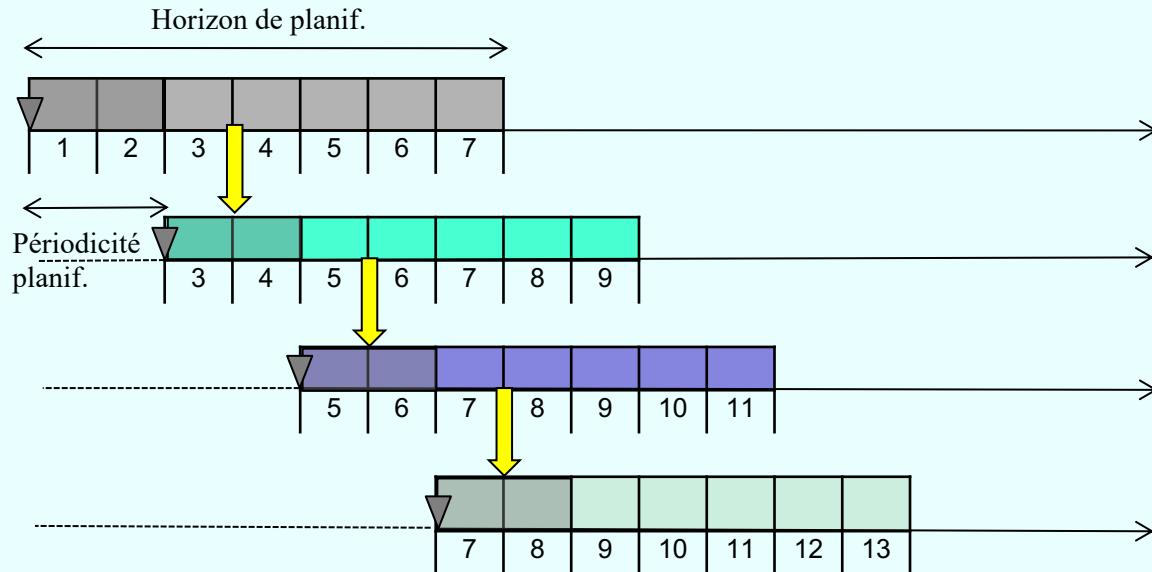
i\j	6	7	8	9	10	11	12	13
6		5	5.29	5.87	9.35	16.31	20.66	21.53
7			5	5.29	7.61	12.83	16.31	17.035
8				5	6.16	9.64	12.25	12.83
9					5	6.74	7.436	8.567
10						5	5.87	6.16
11							5	5.145
12								5

- Plus court chemin : 6->9->13
- On doit se faire livrer 30 en période 7, puis 135 en période 10
- Cout = 25.602

Planification à horizon glissant

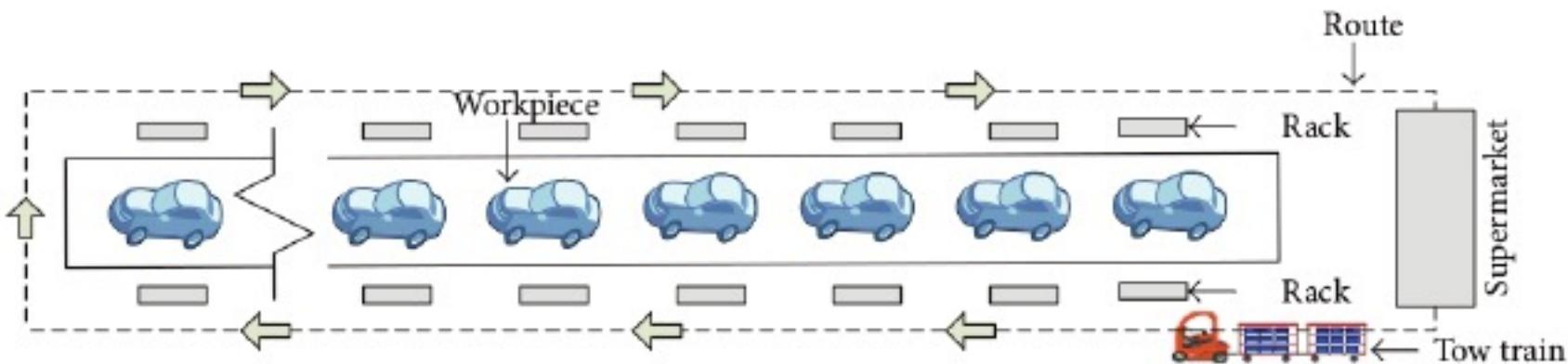
- En pratique il est nécessaire de refaire la calcul d'approvisionnement de façon périodique

- On distingue la taille de l'horizon de planification T1 et la périodicité de la planification T2 → T1>>T2



On gèle les décisions sur les premières périodes pour éviter trop de nervosité

Autre exemple : alimentation automatique d'une ligne d'assemblage

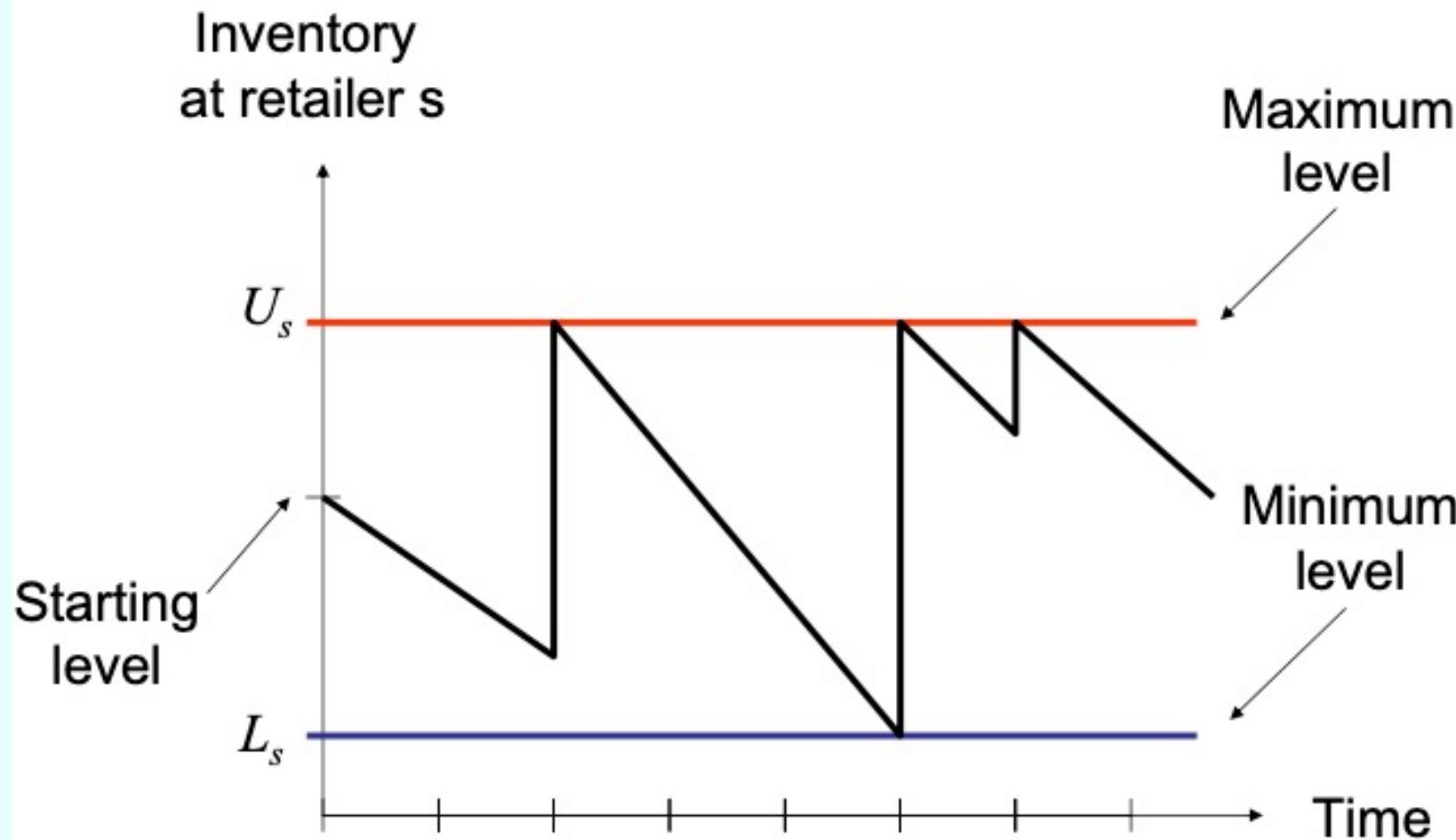


- L'horizon de temps est découpé en périodes
- Décisions, à chaque période
 - Quelles stations livrées ?
 - Quelles quantités ?
- Contraintes
 - Capacité de chaque véhicule
 - Capacité de stockage sur chaque poste de travail
 - Eviter les ruptures de stock sur les postes de travail
- Objectif
 - Minimiser le nombre de tours
- Inventory routing Problem
 - NP-Difficile au sens fort



Autonomous mobile robot transports materials throughout the warehouse without the need for special infrastructure.
(Courtesy of OTTO Motors)

UC6 : automatic feeding of an assembly line



THE LOGISTICS INSTITUTE
Georgia Institute of Technology
www.lli.gatech.edu

6. Juste-à-temps (JAT)



Pourquoi le JAT ?

- **Ce paradigme trouve ses origines dans les nouvelles exigences du marché**
 - Variabilité de la demande
 - Raccourcissement des délais d'obtention : on ne peut pas toujours faire de la production à la commande
 - Produire une bonne qualité à un prix très bas
- **L'idée est de chercher à concilier les avantages de la grande série (flux rapide et important – faibles coûts) avec ceux de la petite série (grande adaptabilité)**
 - Production = Demande
 - Le principe est appliqué de proche en proche du client jusqu'aux fournisseurs de rang 1
 - On parle de gestion à flux tirés (ou tendus)
 - La suppression (diminution) des stocks est la conséquence de cette logique
- **Philosophie de production profondément différente**

Le paradigme JAT

Les deux objectifs du JAT

- Augmenter la réactivité du système logistique
 - Le but est de pouvoir répondre rapidement aux variations quantitative et qualitative de la demande – Pour cela on réduit les stocks
 - Les fournisseurs doivent livrer plus souvent
 - Les stocks d'en-cours de production doivent être réduits en réduisant le temps de fabrication
 - Pour réduire les stocks, il faut éliminer les causes de leur création
 - » *Pannes machines, temps de réglage long, fluctuation des prix des composants*
- La rationalisation de la production
 - Éliminer les gaspillages de temps : déplacer, grouper, contrôler, stocker
 - Donc éliminer les défauts, les retards, les pannes, les lenteurs administratives

Les facteurs clés du JAT

- Recherche d'une plus grande réactivité
 - Flexibilité quantitative (surdimensionnement de la capacité, flexibilité de la main d'œuvre)
 - Flexibilité qualitative (polyvalence des équipements et des ouvriers)
- Maîtrise des aléas
 - Le zéro défaut par la prévention et non par le contrôle (maintenance préventive des équipements, pauses dans le travail, relations de confiance avec les fournisseurs)

La méthode Kanban

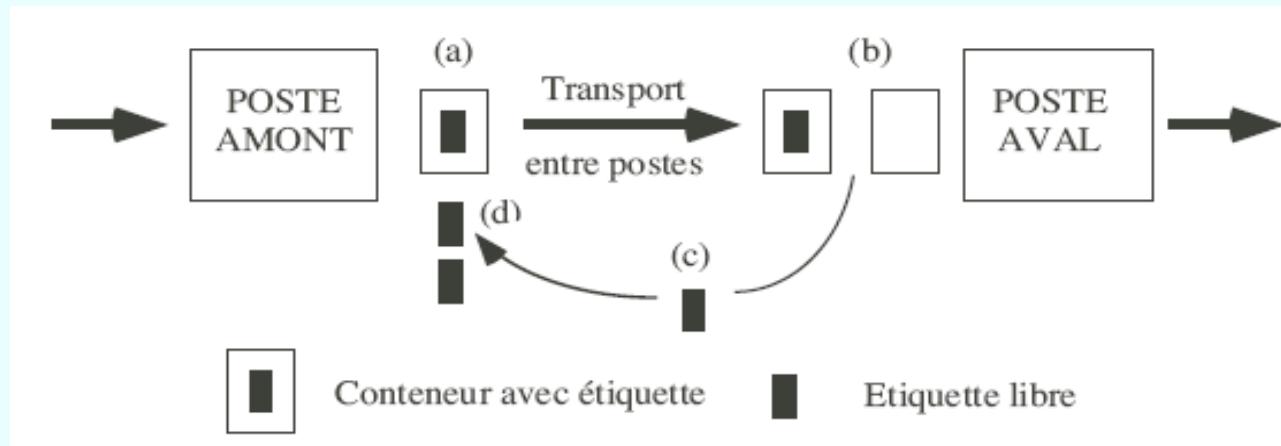
L'idée de la méthode est que la production soit tirée par l'aval

- L'information sur la demande du poste aval est transmise par une étiquette (appelée Kanban) donnant
 - La description de la pièce et l'opération à effectuer
 - Le lieu d'origine et la destination de la pièce
 - La quantité par conteneur (des conteneurs standards circulent entre les postes)
 - Conteneur = lot
- L'étiquette correspond à un ordre de fabrication
 - Le rythme de fabrication correspond donc à la vitesse de circulation des étiquettes, elle-même déterminée par le rythme de consommation des pièces en aval
 - Pour un bon fonctionnement, il faut une bonne capacité de production des postes amont permettant de faire face à un pic de demandes

La méthode Kanban

□ Système Kanban à une boucle

- L'étiquette est apposée sur le conteneur de pièces qui vient d'être fabriqué en amont (a)
- Elle accompagne le conteneur au poste suivant et reste sur le conteneur en attente (b)
- Au moment où le conteneur est mis en fabrication sur le poste aval, le Kanban est libéré et retourne au poste amont (c)
- Il entre dans le planning du poste amont (d) d'où il sort au moment d'une nouvelle fabrication



- Le nombre d'étiquettes circulant entre 2 postes fixe les stocks d'en-cours de fabrication
- Il faut gérer les priorités, lorsqu'on choisit une étiquette dans le planning

La méthode Kanban

□ Détermination du nombre d'étiquettes

➤ Données

- Cu : consommation du poste en aval en unité par mn
- Qe : la taille économique des lots fabriqués en amont
- k : la capacité d'un conteneur
- Tr : le délai de réaction qui comprend
 - Le temps de retour du kanban vers l'amont
 - Le temps d'attente dans le planning amont
 - Le réglage de la machine amont
 - La production du premier conteneur
 - Le transport du conteneur jusqu'au poste aval

➤ Exemple

- Soit D= 2000 pièces la demande moyenne du poste aval par journée de 8h de travail
- On suppose k = 100 et Tr= 30 + 10 + 10+10+ 35, taille de lot unitaire
- Pendant le temps de réaction, la demande du poste aval est :
- Le nombre N d'étiquettes doit être tel que

$$C_u = \frac{2000}{8 \times 60} = 4,1667$$

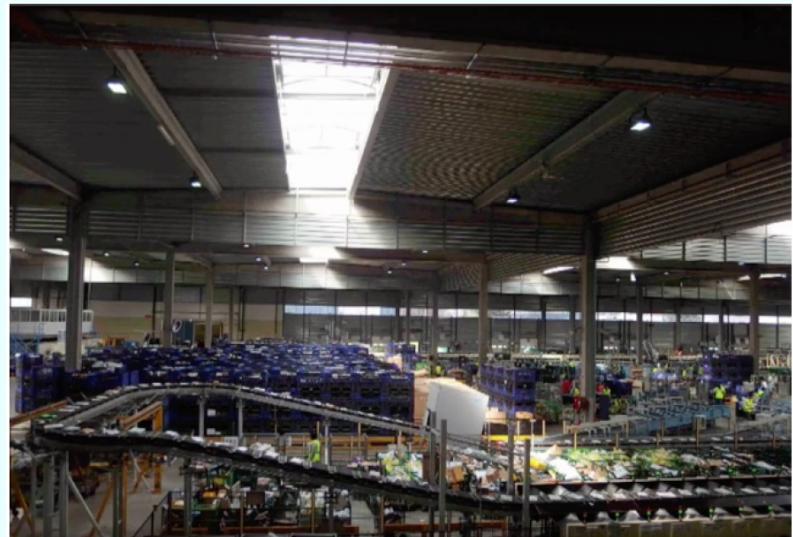
$$T_r C_u = 95 \times 4,1667 = 395,83$$

$$N \geq \frac{T_r C_u}{k} = 3,96$$

Exemple : gestion d'une plateforme logistique

- UC : plateforme logistique Carrefour
- Caractéristiques

- Organisation JAT / 3 huits
- Produits arrivent chaque jour en palettes
- Reconditionnement en colis hebdo
- Les colis sont acheminés vers les enseignes Carrefour Sud-Ouest (tournées imposées)
- Injecteurs : déconditionnement des palettes
- Tri : Carrousel automatique
- Brins : préparation des colis



Exemple : gestion d'une plateforme logistique

□ Variables de décision

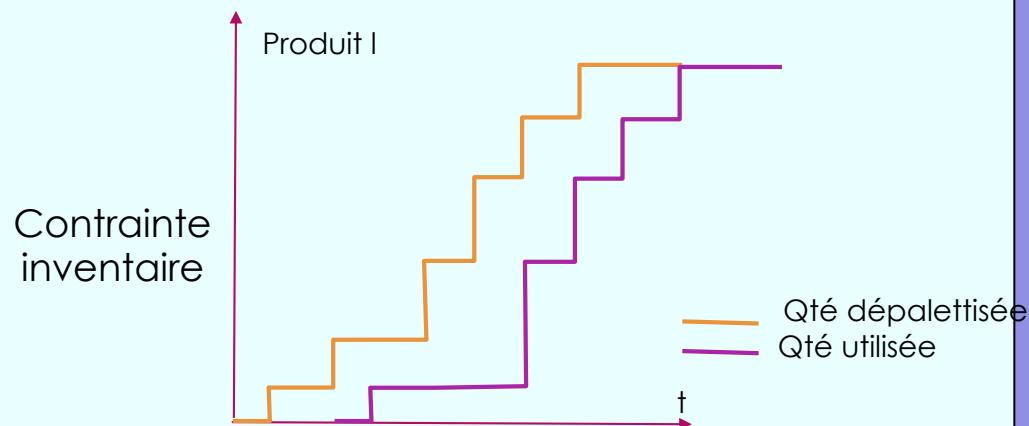
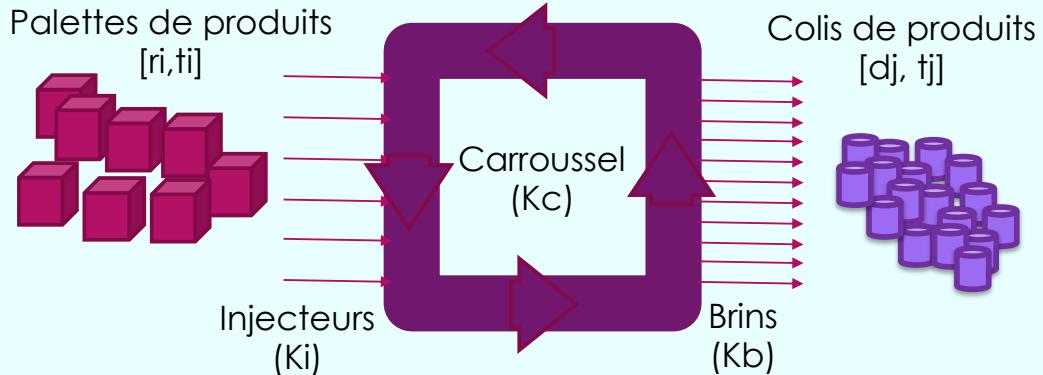
- Dates auxquels les palettes sont amenée sur un injecteur
- Dates auxquels les colis sont achevés sur un brin

□ Contraintes

- Contraintes d'inventaires
- Une palette i contient Q_{il} produits de la famille l
- D_{il} demande de produits l dans le colis j
- Dates d'arrivées des palettes r_i
- Dates de départ des colis d_j

□ Objectifs

- Minimiser le temps de séjour sur le carrousel



7. Ordonnancement



Ordonnancement de production

□ Atelier

- M machines, généralement de capacité unitaire
- L'atelier réalise un ensemble de produits (références)

□ Gamme de fabrication

- Chaque produit possède sa gamme de fabrication qui définit quel est l'enchainement des opérations à réaliser pour obtenir le produit fini, chaque opération impliquant généralement une machine différente
- Ne pas confondre la gamme d'un produit avec sa nomenclature

□ Travail

- L'atelier doit réaliser N travaux (jobs), chaque travail correspondant à la réalisation d'un produit (ou d'un lot de produit)
- Chaque travail est associé à un (ou plusieurs) **Ordre de Fabrication** (client, délai, options, ...)
 - Du fait de l'existence des gammes de fabrication, chaque travail i est décomposé en n_i opérations
 - La $j^{\text{ème}}$ opération du travail i est notée (i,j) et utilise la machine $m_{i,j}$ sans interruption pendant une durée $p_{i,j}$
 - Le respect de la gamme de fabrication impose que l'opération (i,j) précède l'opération $(i,j+1)$

□ Objectif

- Déterminer les dates de début des opérations de sorte à respecter les contraintes et minimiser un critère
 - La durée totale (completion) : Cmax
 - Le plus grand retard (lateness) : Lmax
 - Etc.
- De façon équivalente, cela revient à déterminer l'ordre d'enchainement des opérations sur chaque machine

□ La plupart des problèmes d'ordonnancement de production sont NP-Difficiles

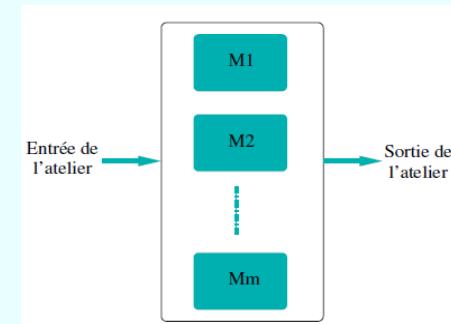
Classification des ateliers de production

□ Un travail = une opération unique

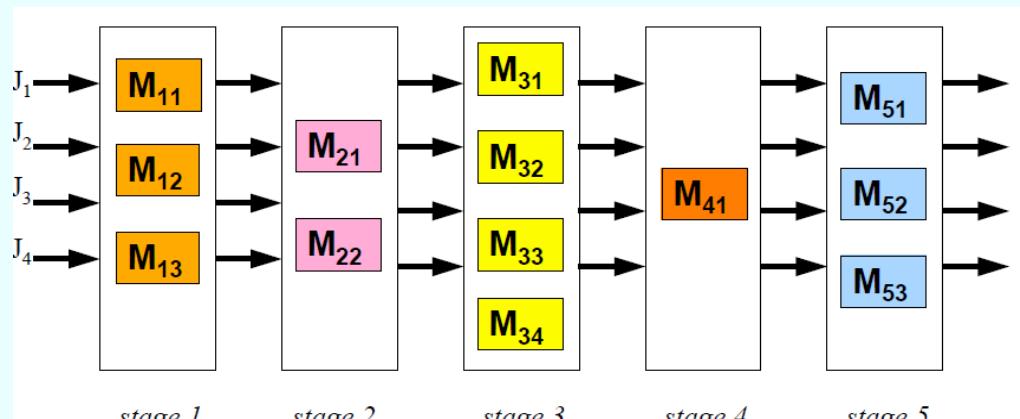
- Problème à une machine
- Problèmes à machines parallèles
- (ex : archi multi-processeurs)

□ Atelier à cheminement unique

- Chaque travail visite les machines de l'atelier selon un ordre immuable. Selon le travail, la durée opératoire sur une même machine varie.
- Problèmes flow shop
 - On distingue les problèmes de flow shop de permutation où l'ordre de passage des travaux sur chaque machine est inchangé (une fois qu'il a été décidé).
- Flow shop hybrides
 - L'ordre de visite des étages est fixé mais, à chaque étage, il faut décider quelle machine réalise quelle opération



Machines parallèles

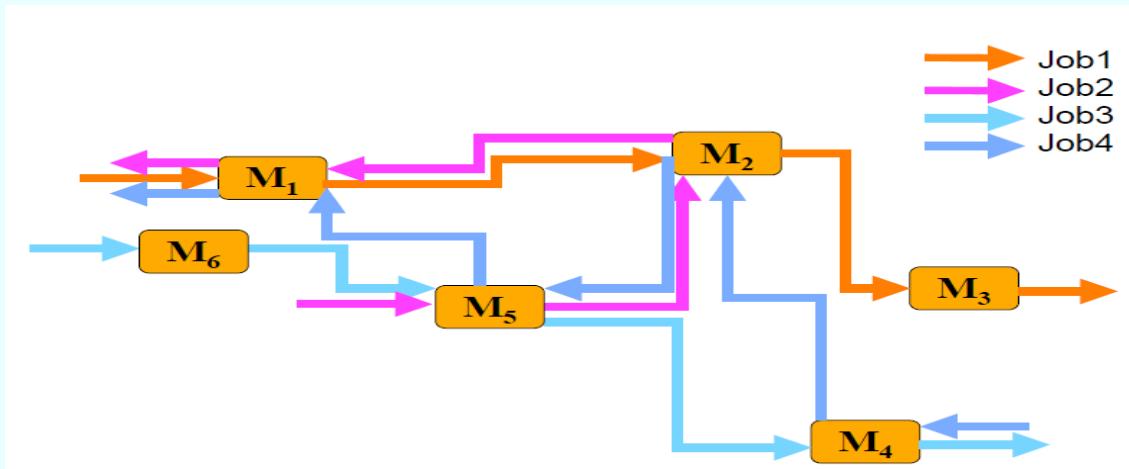


Flow shop hybride

Classification des ateliers de production

□ Atelier à cheminement multiple

- Chaque travail visite toutes les machines, mais l'ordre de passage est spécifique à chaque travail
- Problèmes job shop

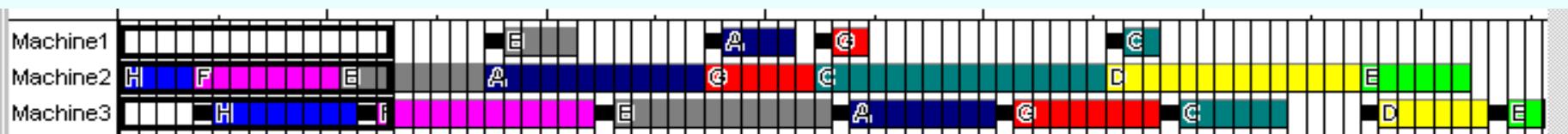


□ Atelier à cheminement libre

- Chaque travail visite toutes les machines dans un ordre laissé libre
- Problèmes open shop

Classification des ateliers de production

- Dans certains ateliers, la réalisation d'un type d'opération sur une machine impose un temps de préparation fixe
 - Ex : imprimerie, machines outils
- Pour éviter la multiplication de ces temps non productifs, on a intérêt à traiter les opérations de même nature par lot (pour rentabiliser la préparation) ➔ Les travaux sont regroupés
 - Dans ce cas, chaque opération (i,j) d'un travail correspond à la réalisation d'un lot de pièces et la durée opératoire $p_{i,j}$ dépend de la taille du lot
 - Dans ce cas, deux problèmes se posent
 - Déterminer la taille des lots
 - Déterminer un ordonnancement (prenant en compte les temps de préparation)
 - Ces problèmes sont interdépendants : il faut trouver un compromis entre une minimisation des temps non productif et une minimisation des temps de cycle



- Dans certains cas, le temps de préparation dépend de la nature de l'opération précédente
 - Ex : atelier de peinture, agroalimentaire
 - La séquence des opérations choisies sur chaque machine devient alors déterminante

Ordonnancement d'une machine seule

□ On peut assimiler ce cas au problème une machine

- Situation très académique mais, en pratique, les procédures de résolution de ce problème sont utilisées en environnement multi-machines en tant que brique élémentaire dans des procédures plus complexes

□ Critères

- Minimisation de la durée totale
 - Ce critère est inintéressant puisqu'ici la durée totale correspond à la somme des durées opératoires des travaux
- Minimisation du retard moyen
 - Séquencer les travaux selon l'ordre croissant des durées (règle Shortest Processing Time SPT) – Optimal
- Minimisation de plus grand retard algébrique Lmax (date de lancement=0, date d'échéance d_i)
 - Règle de Jackson : séquencer les travaux par ordre de d_i croissant (règle Earliest Due Date = EDD) - Optimal
- Minimisation du nombre de travaux en retard (date de lancement=0, date d'échéance d_i)
 - Règle de Hodgson-Moore : On construit progressivement une séquence en utilisant la règle EDD et, si un retard apparaît, le travail de plus longue durée déjà séquencé est reportée en fin d'ordonnancement (il est en retard) - Optimal

□ Date de lancement= r_i et date d'échéance d_i

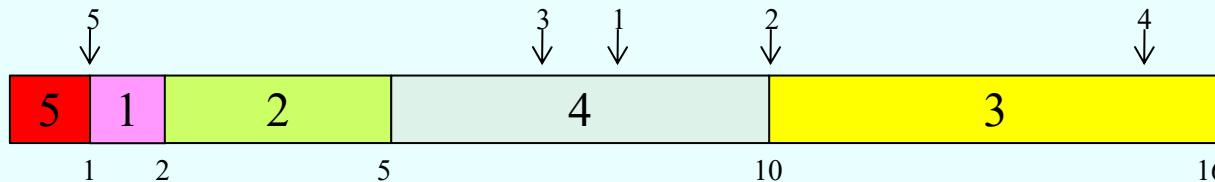
- Lmax et $\sum U_i$ sont NP difficiles au sens fort - Il existe des méthodes arborescentes efficaces (B&B)
- Non vu dans ce cours ...

UC1 - Ordonnancement d'une cellule robotisée

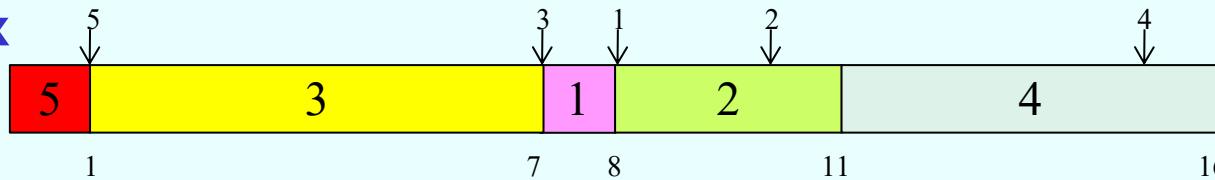
Illustration

Opération i	1	2	3	4	5
Durée pi	1	3	6	5	1
Date échue di	8	10	7	15	1

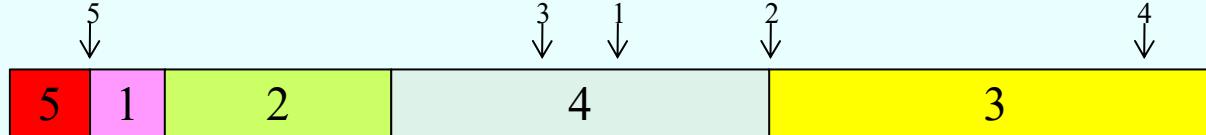
$\sum L_i$



L_{max}



$\sum U_i$



Machines en parallèle

□ Problèmes à machines parallèles

- Décider sur quelle machine s'effectue chaque travail
- Déterminer un séquencement sur chaque machine

□ On distingue les cas où les machines sont

- identiques,
- uniformes (durée = fonction linéaire d'un coeff de performance),
- indépendantes (durée différente selon la machine)

□ Minimisation de la durée totale Cmax

- Le problème est NP difficile dans le cas général
 - Heuristique LPT (Longest Processing Time first) : classer les travaux dans l'ordre LPT et les affecter progressivement dans cet ordre à la machine la moins chargée => garantie de performance
$$C(LPT)/C_{max} \leq 4/3 - 1/(3m)$$
 où $m = \text{nb machines}$
 - Les travaux ayant la durée la plus courte sont gardés pour la fin afin d'équilibrer la charge

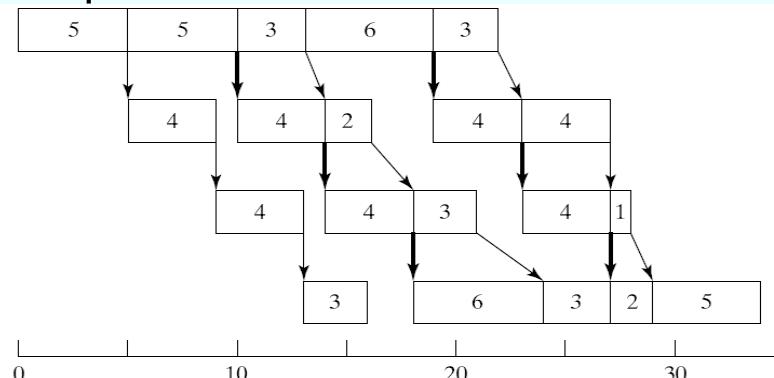
UC3 - Cellules robotisées en série

□ Flow shop

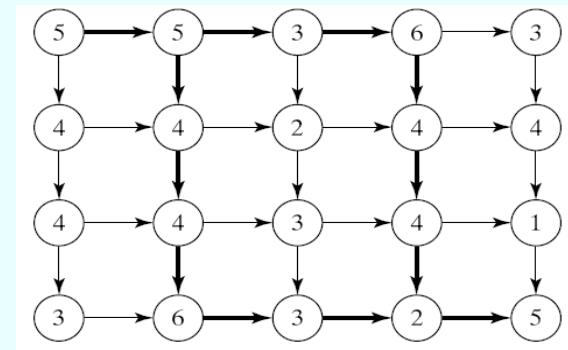
- Ordre de visite des machines imposé et identique pour chaque travail
- Pour les flow shop de permutation, il faut déterminer la séquence des travaux qui minimise le Cmax
- NP-difficile au sens fort si nb cellules > 2
- Pour une séquence donnée, il est facile de déterminer Cmax

□ Exemple (4 machines)

Séquence : 1 → 2 → 3 → 4 → 5



jobs	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅
p _{1,j_k}	5	5	3	6	3
p _{2,j_k}	4	4	2	4	4
p _{3,j_k}	4	4	3	4	1
p _{4,j_k}	3	6	3	2	5



Machines en série

□ Cas particulier : deux machines

- Une condition suffisante d'optimalité : la règle de Johnson

$$\min(p_{i1}, p_{j2}) \leq \min(p_{j1}, p_{i2}) \iff i \preceq_J j$$

□ Algorithme de construction d'une séquence optimale

- Step 1. Schedule the group of jobs U that are shorter on the first machine than the second : $U = \{ j \mid p_{j1} < p_{j2} \}$
- Step 2. Schedule the group of jobs V that are shorter on the second machine than the first : $V = \{ j \mid p_{j1} \geq p_{j2} \}$
- Step 3. Arrange jobs in U in non-decreasing order by their processing times on the first machine.
- Step 4. Arrange jobs in V in non-increasing order by their processing times on the second machine.
- Step 5. Concatenate U and V and that is the processing order for both machines.

UC3 - Machines en série

□ Exemple pour le cas à deux machines

<i>jobs</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
p_{1j}	5	2	1	7	6	3	7	5
p_{2j}	2	6	2	5	6	7	2	1

$$U = \{2, 3, 6\}$$

$$V = \{1, 4, 5, 7, 8\}$$

Optimum : $C_{max} = 37$

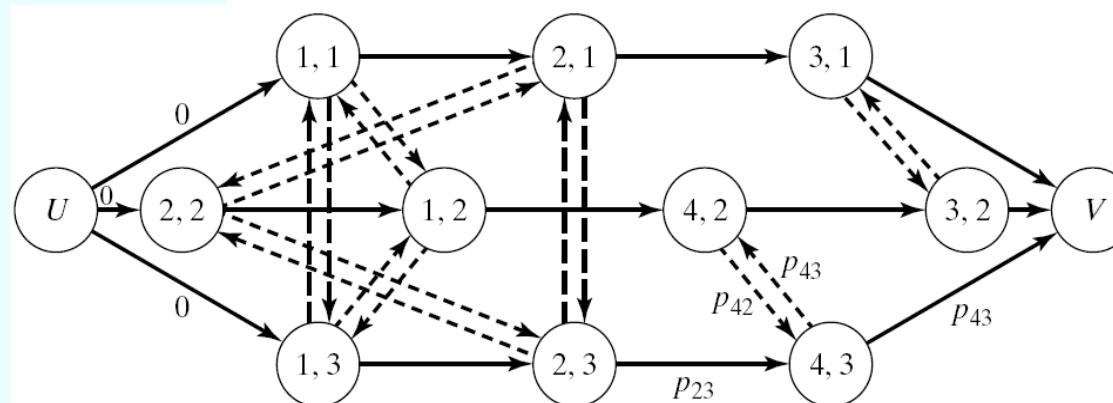
UC4 - Job Shop

- Problème très répandu ... et très difficile du point de vue algorithmique
- Ensembles critiques minimum

- Toute paire d'opérations (i,j) et (k,l) utilisant la même machine et n'ayant pas des fenêtres d'exécutions disjointes forme un ensemble critique minimal
- Il faut choisir : $(i,j) < (k,l)$ OU $(k,l) < (i,j)$ de sorte à produire un ordonnancement réalisable (pas de circuit de longueur >0) et minimisant le makespan C_{max}

□ Exemple

jobs	machine	sequence	processing times
1		1, 2, 3	$p_{11} = 10, p_{21} = 8, p_{31} = 4$
2		2, 1, 4, 3	$p_{22} = 8, p_{12} = 3, p_{42} = 5, p_{32} = 6$
3		1, 2, 4	$p_{13} = 4, p_{23} = 7, p_{43} = 3$



□ Job Shop à deux travaux

➤ La recherche d'un ordonnancement de durée minimale est équivalente à la recherche du chemin le plus court dans un environnement comportant des obstacles

- Représentation graphique possible pour $m \leq 3$

□ Exemple

	$p_{(i,1)}, m_{(i,1)}$	$p_{(i,2)}, m_{(i,2)}$	$p_{(i,3)}, m_{(i,3)}$	$p_{(i,4)}, m_{(i,4)}$	$p_{(i,5)}, m_{(i,5)}$
Travail 1	3, 1	2, 2	1, 4	4,3	1, 5
Travail 2	2,1	2, 3	3, 2	3, 4	1, 5

Job Shop

□ Job Shop à deux machines

- Dans le cas où toute gamme comporte au plus deux opérations (il y a 2 robots), on peut résoudre le problème job shop en temps polynomial

□ L'algo de Jackson

Optimal

Partitionner les jobs

- ▶ $\{AB\}$ jobs passant d'abord sur la machine A
- ▶ $\{BA\}$ jobs passant d'abord sur la machine B
- ▶ $\{A\}$ jobs passant uniquement sur A
- ▶ $\{B\}$ jobs passant uniquement sur B

Ordonnancer les jobs selon les séquences :

- ▶ **machine A:** $\{AB\}$ (Jonhson) $\{A\}$ et $\{BA\}$
- ▶ **machine B:** $\{BA\}$ (Jonhson) $\{B\}$ et $\{AB\}$

□ Exemple

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{(i,1)}, m_{(i,1)}$	4, A	3, A	4, A	5, A	1, B	1, B	7, B	3, B	6, B	2, A
$p_{(i,2)}, m_{(i,2)}$	6, B	-	-	2, B	2, A	-	8, A	-	7, A	4, B

Heuristique d'ordonnancement

□ SGS : Serial Generation scheme

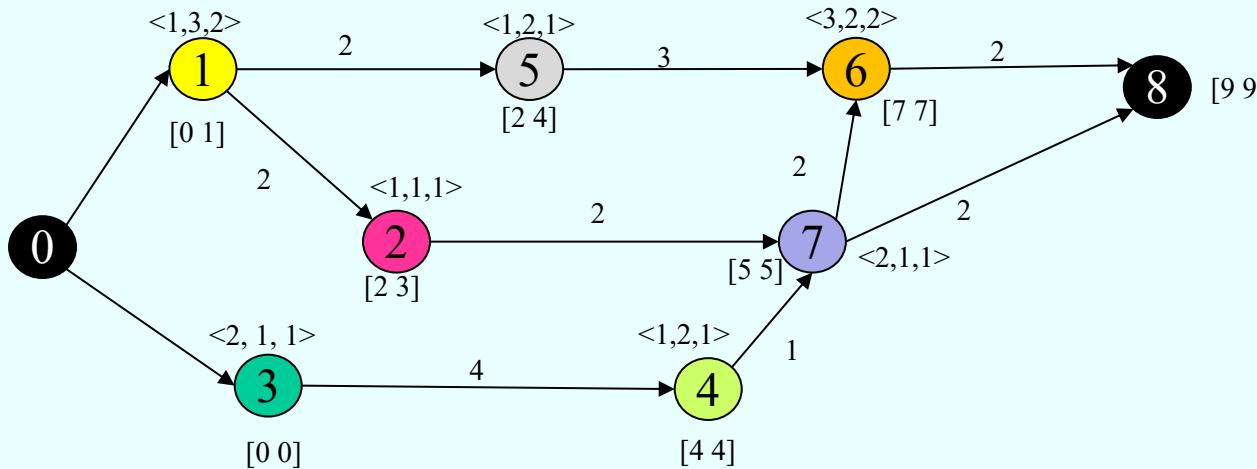
- Une itération → ordonnancement d'une tâche
 - n tâches → n itérations
- Une itération g est caractérisée par
 - L'ensemble des tâches déjà ordonnancées S_g
 - L'ensemble des tâches éligibles D_g : une tâche est éligible si les tâches devant la précéder ($Pred_i$) sont toutes dans S_g
 - Une capacité restante de ressource $Q_k(t) = Q_{k0} - \sum q_{ik}(t)$ avec $i \in S_g$
 - F_g l'ensemble des dates de fin des tâches de S_g

```
/*Initialisation*/  
F0 ← 0; S0 ← {0};  
Pour g=1 à n  
    Calculer Dg, Fg, Qk(t) (t ∈ Fg);  
    Appliquer règle pour sélectionner i ∈ Dg;  
    Fi ← Date de fin au plus tôt compatible avec les  
        contraintes de temps (Predi) et de ressource (Qk(t))  
    Sg ← Sg-1 + {i}  
    Fn+1 ← max{Fg} /* Fin de l'ordonnancement */
```

Exemple

□ 7 tâches/ 3 ressources ($Q_A=3$, $Q_B=3$, $Q_C=2$)

➤ Arc = Contraintes de précédence



Règle de sélection

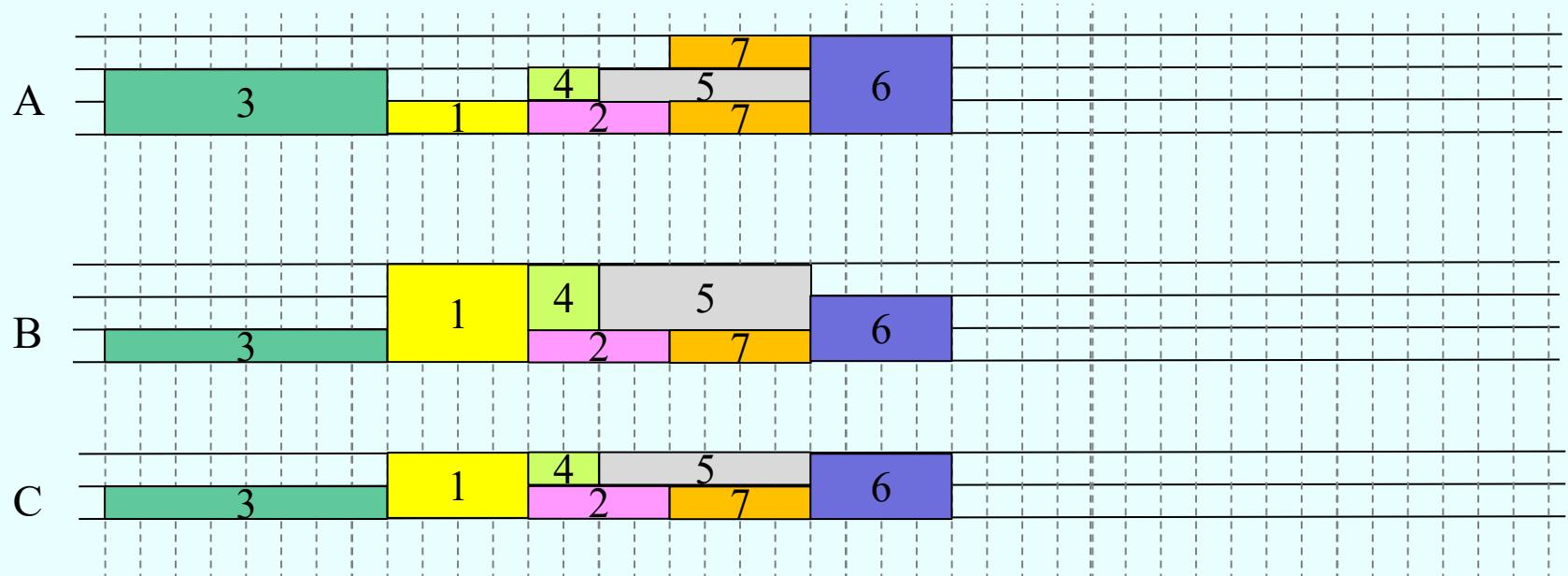
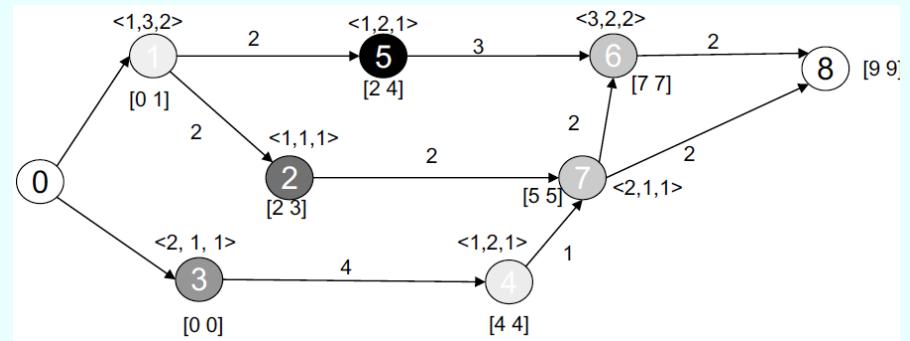
LST : smallest « latest start time » first

D'après le graphe il faut ordonner :

3 ↣ 1 ↣ 2 ↣ 4 ↣ 5 ↣ 7 ↣ 6

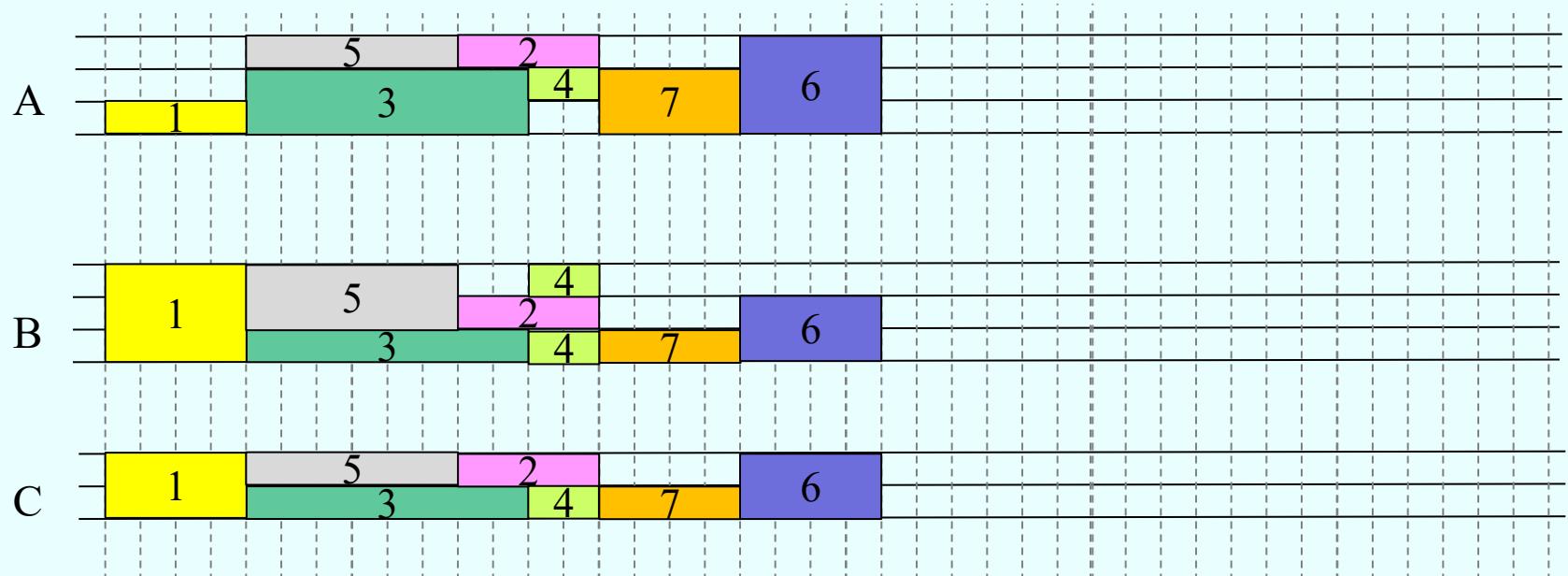
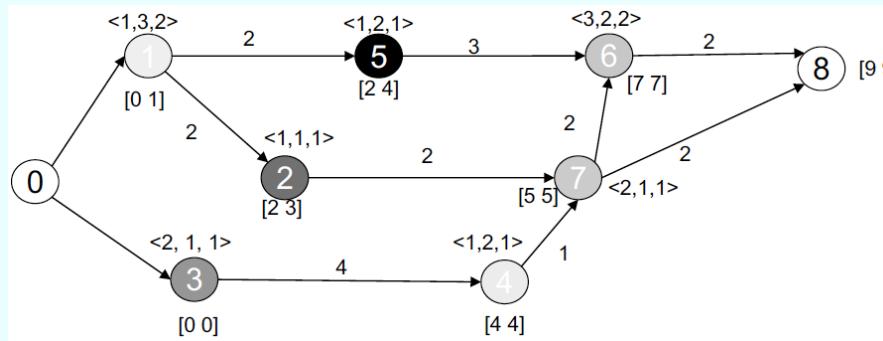
Exemple 1

3 ↛ 1 ↛ 2 ↛ 4 ↛ 5 ↛ 7 ↛ 6



Fin projet = 12

Exemple 1



Fin projet = 11

Exemple 2

□ Job shop et SGS

	jobs machine sequence	processing times
1	1, 2, 3	$p_{11} = 10, p_{21} = 8, p_{31} = 4$
2	2, 1, 4, 3	$p_{22} = 8, p_{12} = 3, p_{42} = 5, p_{32} = 6$
3	1, 2, 4	$p_{13} = 4, p_{23} = 7, p_{43} = 3$

