



Gestion de Production

Pierre Lopez

LAAS-CNRS
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes
Centre National de la Recherche Scientifique

Toulouse



Plan du cours

- **Introduction**
 - Historique
 - Typologie des SP
 - Flexibilité, gestion d'activités
 - Structures organisationnelles
- **Modèles et méthodes en planification-ordonnancement**
 - Programmation linéaire
 - Théorie des graphes
 - Méthodes (générales) de résolution exactes et approchées
 - Méthodes spécifiques
- **Méthodes générales en GP**
 - Gestion des stocks
 - Planification des besoins en composants
 - Juste-à-temps

Bibliographie



- **Vincent GIARD**
Gestion de la production
Economica, 2003, 3^{ème} édition
- **Jean BENASSY**
La gestion de production
Hermès, 1998, 3^{ème} édition
- **Patrick ESQUIROL et Pierre LOPEZ**
L'ordonnancement
Economica, 1999
- **Gérard BAGLIN et al.**
Management industriel et logistique
Economica, 1990
- **Lionel DUPONT**
La gestion industrielle
Hermès, 1998
- **Pierre LOPEZ et François ROUBELLAT**
Ordonnancement de la production
Hermès, 2001

1ère partie : Introduction

1. Historique

2. Définitions

2.1. Vision automatique

Système de Production
Gestion de Production
GPAO

2.2. Vision systémique : 4 grandes activités

2.3. Trois sous-systèmes

système physique
système décisionnel
système informationnel

2.4 Flexibilité

3. Gestion d'activités

3.1. Définition

3.2. Approche multiniveaux

3.3. Organisation matricielle

4. Typologie des systèmes de production

4.1. en fonction de l'organisation des ressources

4.2. en fonction du pilotage de la production

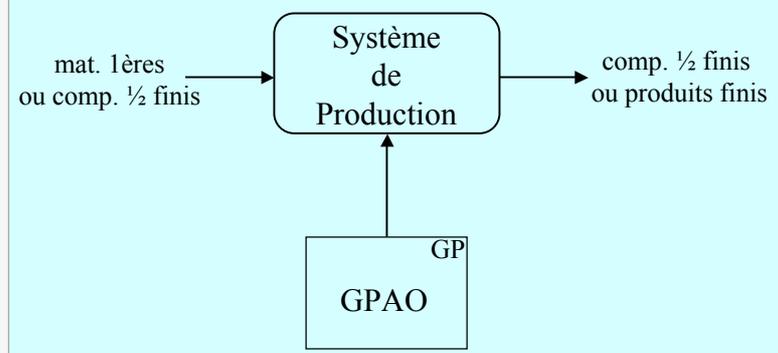
Historique

- XVIII^{ème} s. : production artisanale
- XIX^{ème} s. : production manufacturière (armes, tabac...)
- XX^{ème} s. : désir de rationalisation des facteurs de production
→ point de départ de la gestion de production...
 - Taylor (1911) : organisation du travail basée sur
 - distinction radicale entre conception et exécution
 - recherche systématique des économies de gestes et mouvements
 - utilisation maximale de la machine
 - Ford (1913) : standardisation de la production et travail à la chaîne
 - avancée du concept de flexibilité dans les entreprises
 - Harris et Wilson (1913-1924) : quantité économique
 - Fayol (1916) : modèle hiérarchique d'organisation de la production
 - savoir, prévoir, organiser, commander, coordonner, contrôler
 - Gantt (1917) : ordonnancement

SP – GP – GPAO (1)

- **Système de Production**
vision automatique : transformer un ensemble de matières premières ou de composants semi-finis en produits finis
- **Gestion de Production**
assurer l'organisation du système de production afin de fabriquer les produits en quantités et temps voulus compte tenu des moyens (humains ou technologiques) disponibles
- **Gestion de Production Assistée par Ordinateur**

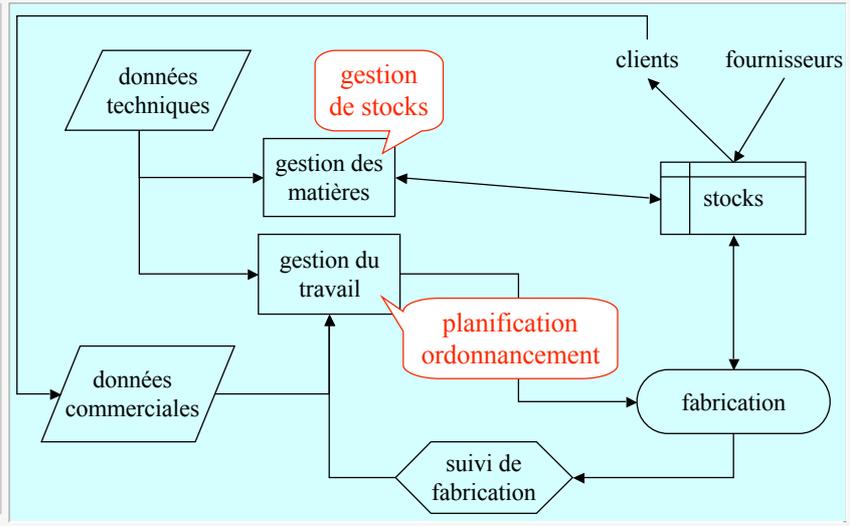
SP – GP – GPAO (2)



- **Avantage : vision synthétique**
- **Inconvénient : masquage des activités non orientées fabrication (étude de marché, conception, recherche, ...)**



Vision systémique d'un SP



Quatre grandes activités de la GP



- **gestion des données techniques**
 - description des produits et des familles de produits (**nomenclatures**)
 - description des processus de réalisation (**gammes**)
- **gestion des données commerciales**
 - reçoit les commandes et établit les calendriers de livraison souhaités
- **gestion des matières**
 - assurer l'approvisionnement en matières premières ou composants
 - assurer le stockage de produits fabriqués
- **gestion du travail**
 - organiser dans le temps la réalisation des tâches en leur attribuant les ressources nécessaires. Prend en compte les données techniques et commerciales et celles du suivi de fabrication (quantités déjà fabriquées, état des ressources...).

Distingo de 3 sous-systèmes dans un SP



- **Système physique**
 - éléments directement impliqués dans le processus de fabrication
 - soumis aux perturbations émanant de l'environnement
- **Système décisionnel**
 - **gestion des activités du système physique**
 - **prise en compte des contraintes environnementales**
 - **besoin de réactivité**
- **Système informationnel**
 - assurer les liens système physique-système décisionnel et système décisionnel-environnement
 - besoin de réactivité

Flexibilité dans les entreprises



- **Flexibilité**
 - capacité d'un système industriel à créer ou gérer la variété, afin de s'adapter aux changements de l'environnement, internes (pannes machines, absences de personnel...) ou externes (commandes urgentes, retard d'appro...), tout en maintenant son équilibre
 - moyen pour une meilleure réactivité industrielle
- **Flexibilité vs. Réactivité**
 - flexibilité liée au nombre de choix possibles en réponse à une perturbation
 - réactivité = processus de recherche de solution à la perturbation
- **Apparition d'aléas**
 - préactivité : préparation à un changement prévisible
 - proactivité : action en vue de provoquer un changement souhaité

La gestion d'activités



- **Activité** = action d'un moyen socio-technique, d'une entreprise
- **Gestion d'activités** = organiser la programmation d'un ensemble d'activités sous contraintes de temps et de ressources
- **Applications**
 - planification des flux
 - ordonnancement de tâches / affectation de ressources
 - gestion de ressources...
- **Traitement**
 - méthodes stochastiques vs. déterministes
 - méthodes exactes vs. approchées
 - approches par contraintes

Gestion d'activités : approche multi-niveaux



- **volume et hétérogénéité des objectifs**
- **approche globale inadaptée (trop complexe)**
 - ⇒ **distribution en plusieurs *centres de décision* possédant une abstraction et une hiérarchie distinctes**
- **[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 en planification

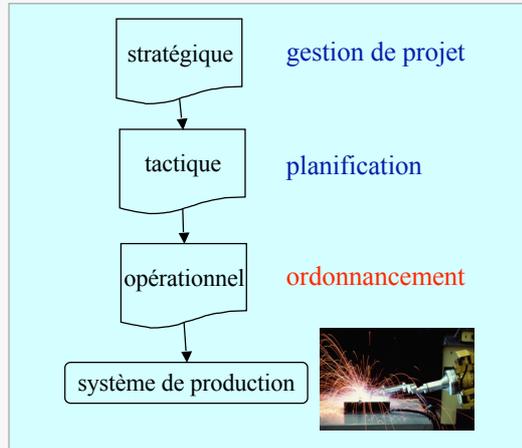


- **planification à long terme (décisions stratégiques) :**
 - définit la stratégie générale ou les *macrostructures* (étude de marché, investissements, campagne publicitaire)
 - horizon de ~ 1 à 5 ans
- **planification à moyen terme (décisions tactiques)**
 - établissement d'un *plan de production* (définition des taux de production pour chaque famille de produits)
 - organisation des moyens
 - horizon de ~ 1 mois à 1 an
- **planification à court terme (décisions opérationnelles)**
 - définit des *ordonnancements* détaillés (objets terminaux et ressources individualisées)
 - horizon de ~ 1 jour à 1 semaine
- **micro-planification (conduite)**
 - temps réel

Structures organisationnelles en GP (1)



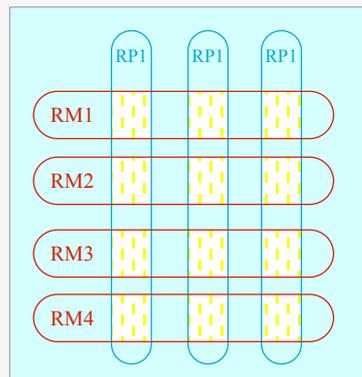
■ Organisation *hiérarchique* fonctionnelle



Structures organisationnelles en GP (2)



■ Organisation *matricielle* projet/métier



Contexte de l'*Ingénierie Concurrente*

ordonnancement \Rightarrow coordination entre différents acteurs

Typologie des SP (1)

■ En fonction de l'organisation des ressources

- **production continue** : produit ne peut attendre qu'une ressource se libère (ex : industries de process – sidérurgie, pétrochimie, chimie lourde, pharmacie, agroalimentaire...)
- **production de masse** : produits quasi-identiques, en grande quantité, **moyens de production spécialisés** et organisés afin d'optimiser le cycle de production (ex : industrie automobile...)
- **production en petite et moyenne séries** : diversité forte des produits, type de demande (personnalisé) prohibe équipement spécialisé ⇒ ressources polyvalentes, **lancement par lot** afin de minimiser les coûts liés à une campagne de fabrication (ex : industries de sous-traitance : équipementiers, service...)
- **production unitaire (gestion de projet)** : production en très faible quantité, cycle de production élevé, nombreuses ressources (ex : industrie aéronautique, spatial, BTP, ...)



Typologie des SP (2)

■ Organisation en ligne de production

- ordre de passage sur les postes de travail toujours identique (*flow shop*)
- importance de la fiabilité du matériel, la panne d'une machine provoquant l'arrêt de la chaîne ⇒ prépondérance de la *maintenance*
- *équilibrage de la chaîne* afin que le produit passe un temps aussi constant que possible sur chaque poste. But : flux rythmé des produits sans accumulation d'en-cours ni perte de temps.



Typologie des SP (3)

■ Organisation en ateliers

- main d'œuvre qualifiée et équipements polyvalents
- importance de la gestion des approvisionnements – coûts de manutention importants
- diminution des coûts
 - optimisation de la localisation relative des centres de production : agencement de l'espace
 - technologie de groupe : constitution de "sous-usines" basée sur des considérations techniques
- multiplicité des routes entre postes de travail ⇒ prépondérance de la problématique d'*ordonnancement*



Typologie des SP (4)

■ Organisation de type série unitaire

- mobilisation de toutes les ressources de l'entreprise pour la réalisation d'un projet, sur une assez longue période
- "survie" des entreprises réalisée par la gestion en parallèle de plusieurs projets, à des stades différents d'avancement
- personnel qualifié exécute des tâches à caractère non répétitif
- équipements polyvalents
- problème des stocks secondaire (produit fini non stockable et approvisionnements spécifiques au projet)
- problèmes majeurs : respect des délais et maîtrise des coûts
- rôle essentiel de l'*ordonnancement*



Typologie des SP (5)

■ En fonction du pilotage de la production

- **production à la commande** : déclenchée par la commande ferme d'un client – grande variété de produits, demande aléatoire
- **production pour stock** : déclenchée par anticipation d'une demande solvable – éventail des produits restreint, demande importante et prévisible
- **production mixte** : fabrication sur stocks et à la commande

→ **production à flux tendus**

2ème partie

Modèles et méthodes en planification-ordonnancement

1. Planification - Programmation linéaire

2. Problèmes d'ordonnancement

2.1. Définitions

2.2. Contraintes

Contraintes temporelles - Inégalités de potentiels

Contraintes de ressources

2.3. Typologie des problèmes

3. Ordonnancement de projet

Position du problème

Diagramme de Gantt

Graphe potentiels-tâches

Méthode PERT

4. Ordonnancement d'atelier

Position du problème et définitions

Problème à une machine

Flow shop

Job shop

Open shop

Programmation Linéaire (1)

- planification optimale du travail sur des ressources à moyen terme
- production = processus continu sur un horizon relativement important
- modélisation par des équations ou des inéquations linéaires où les inconnues sont les volumes de production sur chaque période
- **Objet : déterminer ces inconnues de façon à optimiser un critère (minimisation des en-cours, des stocks, des coûts, maximisation des marges bénéficiaires...)**

$\begin{array}{l} \text{Max } Z = A.X \\ \text{sous : } \left \begin{array}{l} C.X \leq B \\ X \geq 0 \end{array} \right. \end{array}$

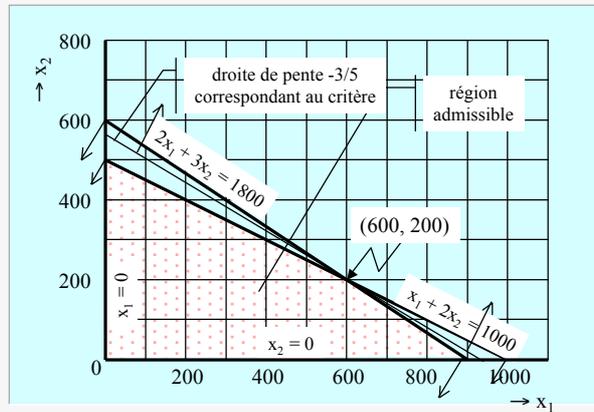
Programmation Linéaire (2)

- **Exemple**
 - 2 produits 1 et 2 dont les marges brutes sont respectivement 3 et 5 unités monétaires par unité de produit
 - fabrication = usinage + montage
 - capacité de l'atelier d'usinage = 1800 h/mois
 - capacité de l'atelier de montage = 1000 h/mois
 - 1 unité du produit 1 (resp. 2) nécessite 2 heures (resp. 3 heures) d'usinage et 1 heure (resp. 2 heures) de montage

- **Programme linéaire**

Déterminer :	x_1 et x_2	qui
maximisent :	$3x_1$ et $5x_2$	
sous les contraintes :	$2x_1 + 3x_2 \leq 1800$	
	$x_1 + 2x_2 \leq 1000$	
	$x_1, x_2 \geq 0$	

PL : interprétation géométrique



- 600 unités du produit 1 et 200 unités du produit 2
- marge brute totale = 2800 unités monétaires

PL : résolution (1)



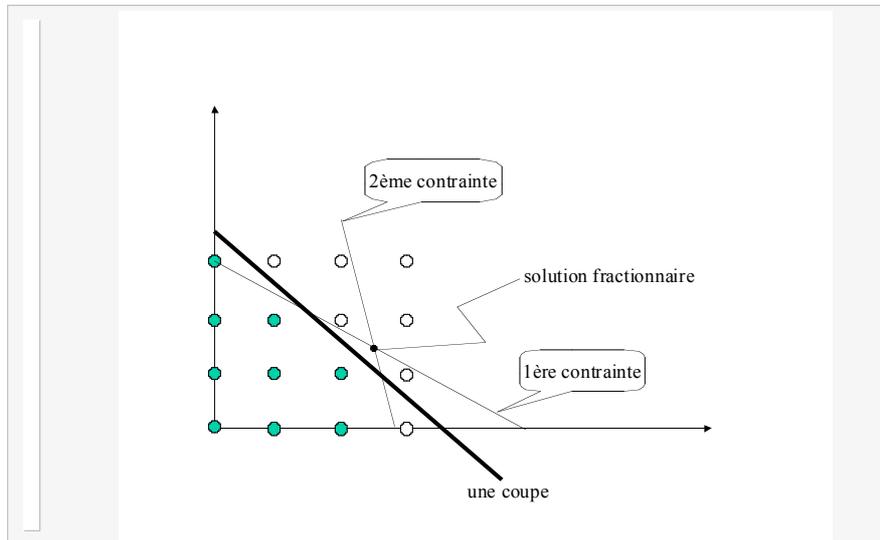
■ Le Simplexe

- mise en évidence d'une base (affectation de var.) réalisable initiale
- identification de la solution optimale en partant de la solution initiale et en passant par une suite de solution adjacentes
- complexité exponentielle mais très grande efficacité en pratique

■ Problèmes en nombres entiers

- méthodes de coupe : relaxation des contraintes d'intégrité et résolution du problème continu
 - optimum entier \Rightarrow STOP
 - sinon ajout de contraintes de façon à tronquer la région admissible (ou polyèdre) sans exclure aucune solution entière, jusqu'à ce que l'optimum soit entier
- méthodes d'exploration arborescente
 - essentiellement pour les problèmes bivalents (variables binaires)

PL : résolution (2) méthode de coupe



P. Lopez – LAAS-CNRS

Gestion de Production

27

PL : différents problèmes



■ Problème d'affectation

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \\ \text{sous} \quad & \sum_j x_{ij} = 1, \forall i \\ & \sum_i x_{ij} = 1, \forall j \\ & x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i,j \end{aligned}$$

■ Problème de transport

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \\ \text{sous} \quad & \sum_j x_{ij} \leq q_i \text{ (quantité produite), } \forall i \\ & \sum_i x_{ij} \geq d_j \text{ (demande), } \forall j \\ & x_{ij} \in \mathbb{Z}, \forall i,j \end{aligned}$$

- matrices totalement unimodulaires : sous-matrices carrées unimodulaires (déterminant = ± 1) ou singulières (déterminant = 0)
- la solution continue est entière
- méthodes de flot maximal à coût minimal : algorithmes de Ford-Fulkerson, de Busacker-Gowen, ...
- cf. problème du sac-à-dos : valeur associée à chaque objet
- algorithme pour l'affectation : méthode hongroise
- algorithme pour le transport : stepping stone

P. Lopez – LAAS-CNRS

Gestion de Production

28



PL : dualité et solveurs

- **Problèmes primal/dual**

min $Z = C^T X$ sous $AX \geq b$ $X \geq 0$	max $W = b^T U$ sous $A^T U \leq C$ $U \geq 0$
---	--

3 propriétés de la dualité :

 - Le dual du dual est le primal
 - $Z^* = W^*$
 - La résolution par l'algorithme primal permet de déterminer tous les éléments de la solution de son dual
- **Solveurs : Xpress-MP, Cplex, Excel, Matlab (Tool Box "Optimisation")**
 - 1ère phase : relaxation en variables continues (Simplexe)
 - 2ème phase : optimisation combinatoire

P. Lopez – LAAS-CNRS
Gestion de Production
29



Ordonnancement

décrit

l'exécution de *tâches*
et
l'affectation de *ressources*
au cours du temps

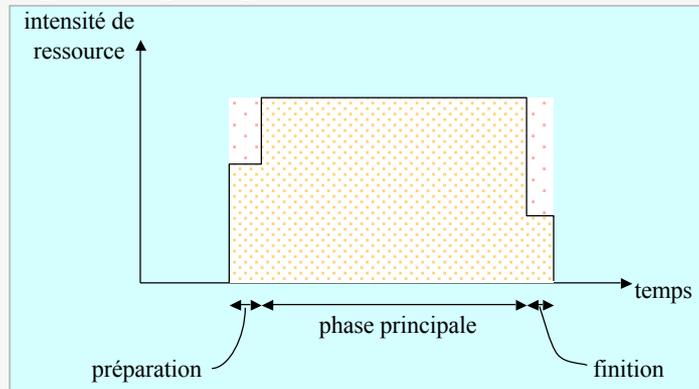
compte tenu de *contraintes*
et de manière à
satisfaire des *objectifs*

- **ressource**
 - moyen socio-technique disponible en quantité limitée (capacité)
 - renouvelable ou consommable
 - disjonctive ou cumulative
- **tâche (ou activité ou opération)**
 - entité élémentaire caractérisée par une date de début et/ou de fin, une durée et une intensité de ressource
 - interruptible ou non
- **contrainte**
 - restriction sur l'exécution des tâches
 - de temps ou de ressource
- **objectif**
 - **optimalité** vis-à-vis de **critères**
 - **admissibilité** vis-à-vis des **contraintes**

P. Lopez – LAAS-CNRS
Gestion de Production
30

Profil d'exécution d'une tâche

- On peut distinguer 3 phases dans l'exécution de la tâche



- La durée de la tâche peut être une fonction de la quantité de moyens utilisés pour son exécution (notion de vitesse ou de performance des ressources) : $p_i = f[a_{ik}(t)]$

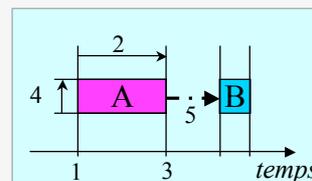
Problèmes d'ordonnancement (1)

- Etant donné :

- un ensemble de tâches
- un ensemble de ressources

- Déterminer :

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



- Applications

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

Problèmes d'ordonnancement (2)



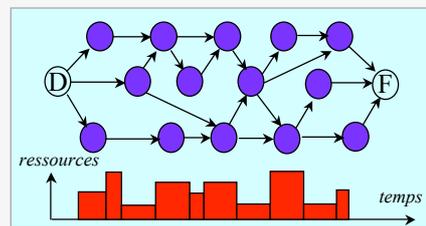
Plusieurs classes de problèmes déterministes

■ Ordonnancement sans contraintes de ressource

ex : ordonnancement de projet

- un projet unique
- nombre élevé de tâches
- relations temporelles complexes (contraintes potentielles)
- les niveaux de ressources

sont des variables de décision (peuvent être adaptés au plan)

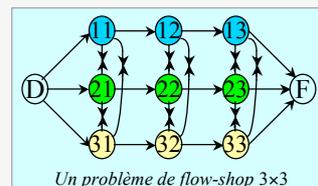


Problèmes d'ordonnancement (3)



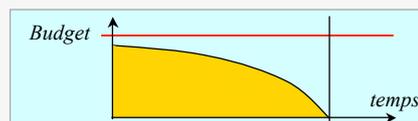
■ Ordonnancement avec contraintes de ressource

- ordonnancement d'atelier/informatique
 - une machine
 - m machines identiques
 - m machines dédiées
- emploi du temps

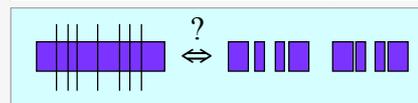


■ Ordonnancement avec ressources cumulatives

- renouvelables/consommables
- doublement contraintes



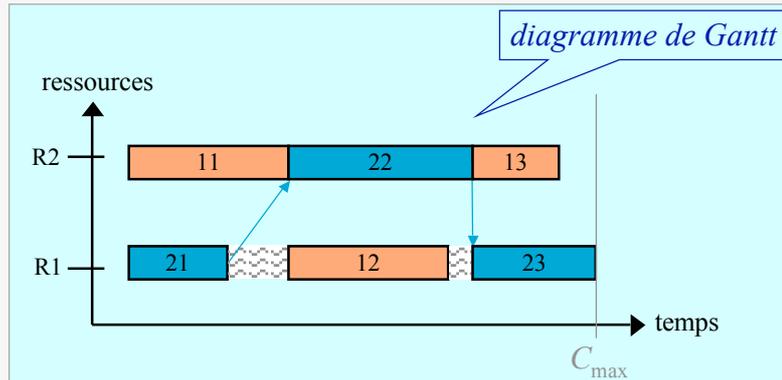
■ Ordonnancement préemptif/non préemptif



Ordonnancement/Affectation



- placement des tâches en temps et en espace
- temps continu
- contraintes temporelles
- contraintes de ressources



Optimisation : méthodes exactes



- **Cheminement dans les graphes**
- **Procédures d'exploration arborescentes**
 - [algorithme de résolution par tentative et retour arrière](#) (backtracking)
 - ["Branch and Bound"](#)
- **Programmation mathématique**
 - [programmation linéaire](#) en variables entières, mixtes
 - programmation dynamique
- **Résultats spécifiques**
 - propres à chaque type de problème

Optimisation : méthodes approchées



■ Heuristiques

- "procédure exploitant au mieux la structure du problème considéré, dans le but de trouver une solution de qualité raisonnable en un temps de calcul aussi faible que possible"
- algorithmes gloutons (myopes)
- règles de priorité

■ Métaheuristiques

- cadre général de résolution – composées de deux grandes parties :
 - *exploration* : permet de visiter des régions différentes dans l'espace des solutions
 - *exploitation* : permet de savoir où se trouvent les meilleures solutions
- à solution unique (Tabou, recuit simulé, ...)
- à population de solutions (algorithmes génétiques, ...)

Tabou, Recuit (recherche locale)



■ Principe

- A partir d'une solution initiale connue x , amélioration du critère par la recherche de la meilleure solution x' dans un voisinage de x ; si pas d'amélioration arrêt, sinon $x=x'$.

■ Méthode Tabou

- A partir d'une solution initiale x , on examine complètement le voisinage de x . On conserve la meilleure solution x' . On mémorise la solution retenue dans une *liste taboue* d'une longueur donnée.

■ Recuit simulé

- A partir d'une solution initiale x , un voisin x' est généré aléatoirement. On calcule l'écart des fonctions coût $\Delta f = f(x') - f(x)$. Si $\Delta f \leq 0$, $x=x'$. Si $\Delta f > 0$, x' remplace x avec une probabilité d'acceptation $\text{EXP}(-\Delta/T)$ où T est un paramètre, appelé *température*, qui décroît au cours de la procédure.

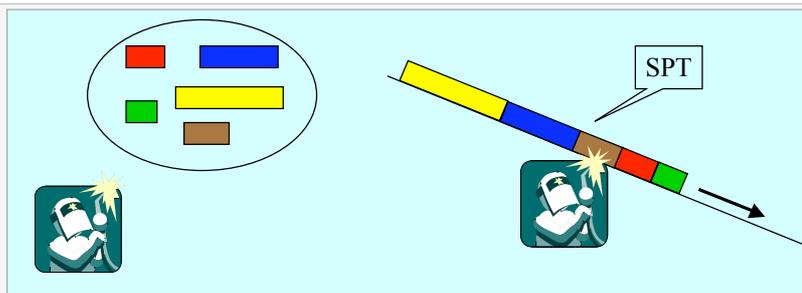
Algorithmes génétiques (approche évolutive)



■ Principe

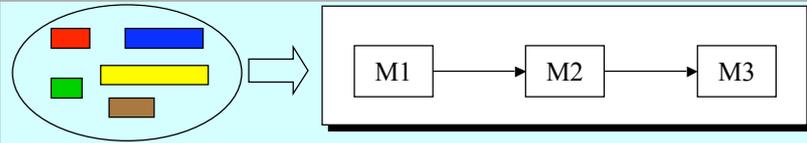
- Une population initiale est générée aléatoirement. Chaque solution est codée comme une chaîne de caractères (*gènes*). L'exploration est réalisée par les opérateurs de *mutation* (modification d'un gène) et assure la diversification du voisinage ; l'exploitation est assurée par les opérateurs de *croisement* (permutation de gènes entre solutions parents) et recherche les meilleurs enfants possibles.

Problème à une machine



- **Règle de Smith** : WSPT (stock d'encours, temps de cycle, retard algébrique, moyens ou pondérés)
- **Règle de Jackson** : EDD (retards maximum)
- **Algorithme de Moore-Hodgson** : EDD modifiée (nombre de tâches en retard)

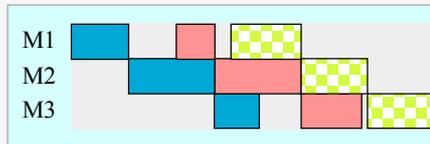
Flow Shop



Minimisation de la durée totale

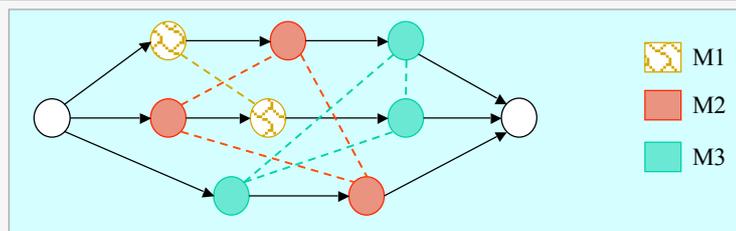
- 2 machines \Rightarrow Règle de Johnson :
le travail i précède le travail j si dans une séquence optimale si :

$$\min(p_{i1}, p_{j2}) < \min(p_{j1}, p_{i2})$$
- Cas général : extension de la règle de Johnson (heuristique CDS)
- Pas de stockage sur machine (industrie agroalimentaire) \Rightarrow flow shop sans attente



\rightarrow problème du voyageur de commerce

Job Shop



Minimisation de la durée totale

- 2 machines \Rightarrow Algorithme de Jackson : basé sur la constitution de 4 familles (M1, M2, M1-M2, M2-M1) et règle de Johnson
- 2 travaux \Rightarrow méthode graphique (Akers)
- Cas général : génération d'ordonnements actifs, sans retard, heuristique de machine goulet ("bottleneck heuristic")

Open Shop

- **gammes de fabrication non connues à l'avance**
 - ex : construction de lotissements, réparation ou maintenance d'engins, tenue d'examens médicaux, ...
- **2 problèmes**
 - fixer un ordre de passage sur les machines pour chaque travail
 - trouver une séquence de travaux sur chacune des machines
- **Minimisation de la durée totale, 2 machines et non-préemption \Rightarrow règle LAPT (Longest Alternate Processing Time first) :**
sélection sur une machine libre du travail dont l'opération sur l'autre machine possède la plus grande durée
- **Pour d'autres critères ou dès la considération de 3 machines \rightarrow problèmes NP-difficiles (sauf $Om|pmtn|C_{max}$)**

Contexte dynamique

- **Arrivée continue de nouveaux travaux**
- **Modifications des caractéristiques du problème**
- **Informations modélisées comme un processus stochastique régi par une loi aléatoire**
- **Méthode analytique : théorie des files d'attente**
 - valeurs des critères pour différentes règles de priorité
 - résultats analytiques sur les évaluations en moyenne en régime stationnaire
 - résultats pauvres pour les problèmes d'atelier
- **Simulation**
 - basée sur des méthodes de Monte Carlo (méthode de simulation du hasard)
 - permet d'éviter des hypothèses trop simplificatrices
 - facilité de générer un ordonnancement et d'examiner divers scénarios

La gestion d'activités



- *Activité* = action d'un moyen socio-technique, d'une entreprise
- *Gestion d'activités* = organiser la programmation d'un ensemble d'activités sous contraintes de temps et de ressources
- **Applications**
 - planification des flux
 - ordonnancement de tâches / affectation de ressources
 - gestion de ressources...
- **Traitement**
 - méthodes stochastiques vs. déterministes
 - méthodes exactes vs. approchées
 - **approches par contraintes**

Approche par contraintes des problèmes de décision



- **originalité** : formulation du problème de décision exclusivement en termes de contraintes
- **modèle** = $\langle \{\text{variables de décision}\}, \{\text{contraintes}\} \rangle$
 - contrainte = expression reliant des variables de décision
 - solution = ensemble de valeurs qui satisfait toutes les contraintes
- **caractéristiques**
 - analyse du problème, réduction de la combinatoire, séparation analyse/résolution
 - flexibilité, modularité de l'approche
 - adaptée au contexte de l'aide à la décision (évolution du modèle)

Approche par contraintes de l'ordonnancement



- **Problèmes de Satisfaction de Contraintes (CSP)**
 - règles de cohérence locale pour les contraintes temporelles
 - stratégies de recherche heuristiques
- **Théorie de l'ordonnancement**
 - théorèmes de dominance
 - bornes inférieures et supérieures des solutions optimales
 - procédures arborescentes de résolution
 - règles de propagation des contraintes de ressources
- **Programmation par contraintes**
 - Programmation Logique avec Contraintes
 - bibliothèques C++

Propagation de contraintes (1)



- **ensemble de techniques permettant de simplifier la résolution**
- **approche non-déterministe : caractérisation ensemble de décisions**
 - renforcement de consistance : simplifier la résolution du problème (suppression des redondances, filtrage des valeurs des variables n'appartenant à aucune solution)
- **structuration des décisions**
 - limitation des actions possibles
 - explicitation des degrés de liberté disponibles

Propagation de contraintes (2)

■ Règles d'élimination et d'ajustement liée aux paires de disjonction

Exemple :
 $d_j - r_i < p_i + p_j \Rightarrow i$ non avant j
 problème disjonctif $\Rightarrow j$ avant i
 \Rightarrow ajustements de r_i et d_j

P. Lopez – LAAS-CNRS
Gestion de Production
49

Ordonnancement & affectation

■ problème *mixte* d'ordonnancement et d'affectation

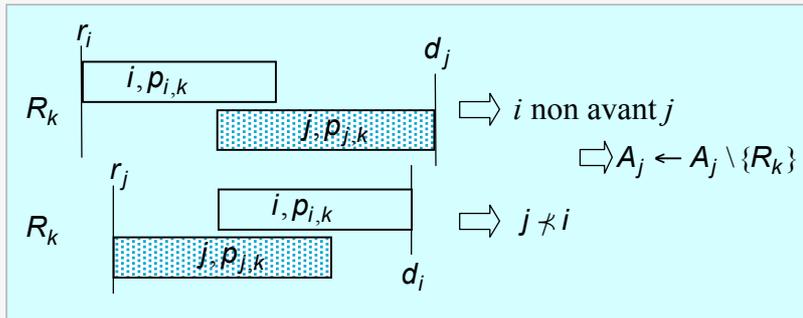
- affectation de ressources : ensemble de ressources possibles
 \Rightarrow durées dépendantes des ressources
- pour k , durée des tâches variables $p_{i,k} \in [p_{i,k}^{\min}, p_{i,k}^{\max}]$

■ exemple : Job Shop avec affectation

P. Lopez – LAAS-CNRS
Gestion de Production
50

Propagation de contraintes (3)

i est affectée sur R_k
 j peut être affectée sur R_k



3ème partie

Quelques méthodes de GP

1. Gestion des stocks
 - 1.1. Préambule
 - 1.2. Modèle de la quantité économique optimale (EOQ)
 - 1.3. Exemples
2. Planification des besoins en composants
 - 2.1. Introduction
 - 2.2. Calcul des besoins bruts
 - 2.3. Planification au plus tard
 - 2.4. Calcul des besoins nets
3. Juste-à-temps
 - 3.1. Introduction
 - 3.2. Méthode Kanban
4. OPT

Gestion des stocks : préambule (1)



- **une des plus vieilles méthodes de GP**
- **gestion basée sur la notion de stock**
stocks = 20 à 80 % du total du bilan d'une entreprise industrielle (selon l'activité)
- **assurer un stock moyen pour**
 - éviter des stocks trop importants (coûteux : immobilisation d'une source de revenu et besoin de gestion du stock)
 - éviter des stocks trop faibles (difficulté d'adaptation aux variations de la demande) → stocks négatifs (ou pénurie, rupture, manque...)
- **3 types de stocks**
 - matières premières (anticiper les fluctuations des prix et les éventuelles défaillances des fournisseurs...)
 - en-cours (découplage des divers stades de la production et équilibrage des flux, protection contre les arrêts momentanés...)
 - produits finis (réduction des délais de livraison, amortir les fluctuations de la demande, de la production..., parer aux périodes chômées (août))

Gestion des stocks : préambule (2)



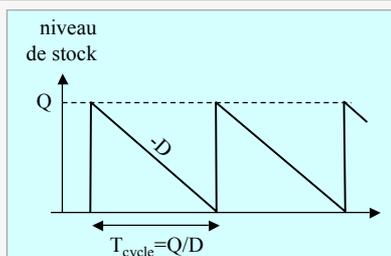
- **Hypothèses**
 - planification à moyen terme
 - demande prévisible et relativement constante (production sur stock)
 - coûts de stockage et d'approvisionnement connus et constants
 - coûts proportionnels au nombre de pièces
- **But**
 - éviter les ruptures de stock tout en conservant un niveau de stock le plus faible possible
 - **QUAND ET COMBIEN COMMANDER ?**
- **Principe : minimiser une fonction de coût économique**
 - coût de possession lié aux quantités stockées
 - coût de commande lié au lancement en production, aux appros...
 - coût de rupture lié aux retards de livraison

GdS : Modèle de la Quantité Economique de Commande (EOQ) (1)



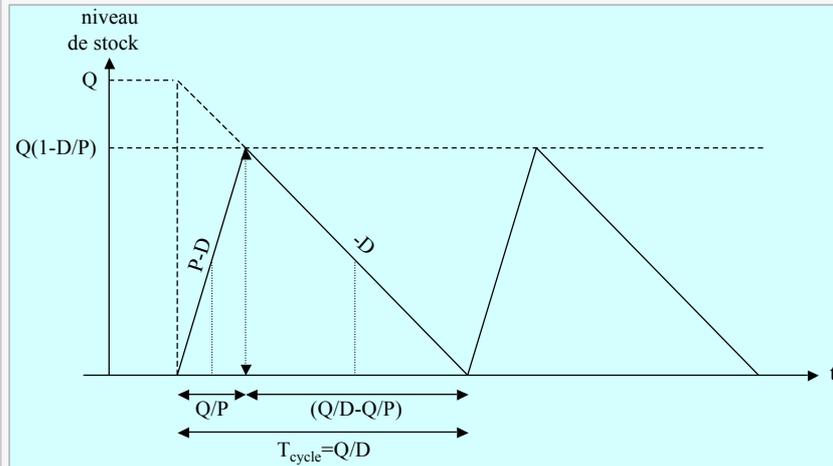
- **EOQ = "Economic Order Quantity"**
 - **valable pour demande régulière et taux d'appro constant, reconstamment périodique, pas de rupture**
 - **basée sur une politique optimale de gestion des stocks dont les caractéristiques sont :**
 - succession
 - d'ordres d'approvisionnement dont l'effet est de remonter le niveau du stock, et
 - de phases où le stock diminue régulièrement sous l'effet de la demande)
- ⇒ **il est moins coûteux d'attendre que le stock soit vide pour passer commande (courbe $y = -Dx + Q$)**
- temps de cycle = intervalle entre 2 commandes : $T_{\text{cycle}} = Q/D$

GdS : Modèle de la Quantité Economique de Commande (EOQ) (2)



- remplissage du stock non instantané (production par un site A de l'atelier en amont du site B dont on gère le stock)
 - pour qu'un site A produise Q à un taux P, il faut un temps Q/P , pendant lequel la demande D du site B par unité de temps effectue un prélèvement DQ/P ; globalement, on a donc un taux $P-D$ pendant une durée Q/P , et on obtient $Q_{\text{max}} = (P-D)Q/P = (1-D/P)Q$

GdS : Politique optimale de gestion des stocks dans un cadre de production



P. Lopez – LAAS-CNRS

Gestion de Production

57

GdS : Formule de Wilson (1)



Rappel des notations

- P = taux de production par période
- Q = taille en volume de la commande (stock)
- D = demande en volume par période
- T_{cycle} = intervalle entre deux commandes (période)
- C_p = coût de possession par unité de produit et par période
- C_c = coût de commande
- $CT(Q)$ = coût total de stockage par période

Le coût de possession entre 2 instants t_1 et t_2 est proportionnel au nb cumulé d'articles stockés et à la longueur de $[t_1, t_2]$; il est donc proportionnel à l'aire contenue sous la courbe d'évolution des stocks ;

d'où :

$$CT(Q) = \left(\frac{C_p}{2} Q \left(1 - \frac{D}{P}\right) \frac{Q}{D} + C_c \right) \times \frac{1}{T_{cycle}} = \frac{C_p}{2} Q \left(1 - \frac{D}{P}\right) + \frac{DC_c}{Q}$$

qui forme une hyperbole dont le minimum est trouvé en égalant à zéro la dérivée par rapport à Q. On obtient alors la formule de Wilson :

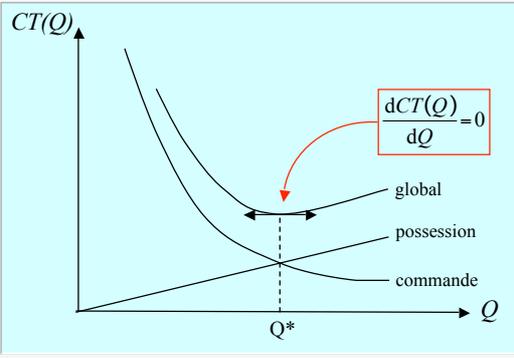
P. Lopez – LAAS-CNRS

Gestion de Production

58



GdS : Formule de Wilson (2)



$$EOQ_{opt} = Q^* = \sqrt{\frac{2C_c DP}{C_p(P-D)}} \Rightarrow CT(Q^*) = \sqrt{2DC_c C_p \left(1 - \frac{D}{P}\right)}$$

P. Lopez – LAAS-CNRS Gestion de Production 59



GdS : Exemple (1)

Données
 demande hebdomadaire d'une pièce $D=200$ unités/semaine
 coût de possession $C_p=0,5$ € / unité / semaine
 coût administratif d'une commande = 500 €
 frais de livraison = 500 €

Donc :
 coût global de commande $C_c=1000$ €

Hypothèse : remplissage instantané du stock (fournisseur extérieur)

$$Q^* = \sqrt{\frac{2C_c D}{C_p}} \qquad CT(Q^*) = \sqrt{2DC_c C_p}$$

$Q^*= 895$ pièces
 $CT(Q^*)=447,21$ € par semaine soit 2,24 €/pièce
 $T^*=4,47$ semaines

P. Lopez – LAAS-CNRS Gestion de Production 60

GdS : Exemple (2)



Données

demande annuelle d'une pièce $D=50000$ unités/an
production maximale $P=200000$ unités/an
coût de commande $C_c=500$ €
coût de possession $C_p=3$ €/unité/an
usine travaille $H=240$ jours/an

Donc :

demande journalière = $50000/240 = 208,33$
production journalière = $200000/240 = 833,33$
stock net journalier = $833,33 - 208,33 = 625$

Production de Q unités en $240Q/200000$ jours, au bout desquels on aura $625.240Q/200000=0,75Q$ unités stockées

Si $Q=8000$, et si le stock initial est nul, la production nécessitera 9,6 jours et permettra de stocker 6000 pièces qui seront consommées en $6000/208,33=28,8$ jours

$Q^*=4714$ pièces et $CT(Q^*)=10607$ €

Planification des besoins en composants : LAAS Introduction (1)



■ Appareue aux Etats-Unis dans les années 65-70

- MRP1 : Material Requirements Planning
- dans les années 80 prise en compte de la capacité limitée des ressources (MRP2 : Manufacturing Resource Planning)

■ Hypothèses

- planification à moyen terme dans une production à flux poussés
- production répétitive (grande série)

■ But

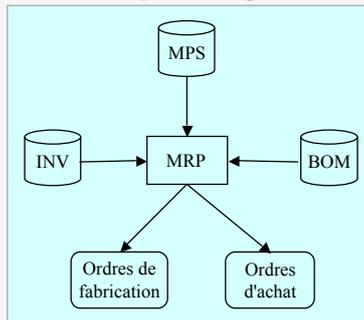
- anticiper la demande pour s'adapter à ses variations
- **QUAND ET COMBIEN PRODUIRE ?**
par rapport à la gestion des stocks, on met l'accent sur les problèmes liés à la fabrication, les stocks apportant des contraintes et des coûts que l'on cherche à minimiser

Planification des besoins en composants :

Introduction (2)

■ Implantation

Il faut disposer d'un système d'information informatisé (données physiques, données comptables, plan directeur de production comportant les quantités à produire par famille de produits – Master Production Schedule –, les niveaux des différents stocks et une organisation des moyens à disponibilité variable)



Planification des besoins en composants :

Introduction (3)

■ Principe de MRP1

3 phases

- calcul des besoins bruts
- planification au plus tard de la mise en fabrication des pièces (ou *absorption des délais*)
- calcul des besoins nets

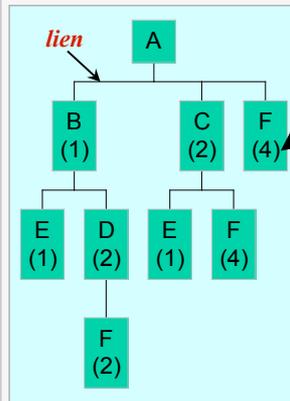
Mise en œuvre

- décisions prises à chaque niveau validées par simulation
- remise en cause si problème

■ MRP2 : ajout d'heuristiques (agissant sur le lancement en production de pièces) pour rester dans les limites imposées par les ressources

PBC : Calcul des besoins bruts

- Basé sur les liens de nomenclature (représentation arborescente)



- A se compose d'un sous-ensemble B, de deux sous-ensembles C et de quatre pièces F...

- Nombre de composants pour un composé de niveau immédiatement supérieur (*coefficient technique* ou *de montage*)

- En final, le montage d'une unité de A suppose de disposer de trois unités de E et de seize unités de F

- Pour 200 produits A commandés, il faut approvisionner 600 pièces E et 3200 pièces F : ce sont les *besoins bruts*

- Défaut majeur : production non datée et ne tenant pas compte des stocks

PBC : Planification au plus tard (1)

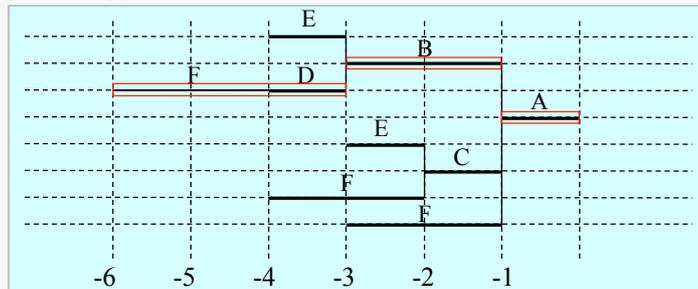
- Pour répondre au problème de la production non datée, on va se servir du principe de calcul des besoins bruts en prenant en compte les décalages temporels induits par l'attente d'un produit en un instant donné

- "On met la nomenclature à l'horizontale en lui faisant subir une rotation de 90° dans le sens des aiguilles d'une montre."

PBC : Planification au plus tard (2)



- cycles de montage de A, C et D = 1 semaine
- cycle de montage de B = 2 semaines
- délais d'approvisionnement de E = 1 semaine et F = 2 semaines



- Pour fabriquer 200 produits A, on doit passer commande de 800 pièces F au début de la semaine -6, de 1600 au début de la semaine -4 et de 800 au début de la semaine -3. On doit également passer commande de 200 E au début de la semaine -4 et de 400 au début de la semaine -3 → Politique "lot-for-lot"...

PBC : Planification au plus tard (2)



- Cycle total de fabrication d'un produit fini (A) = somme des plus longs cycles à chaque niveau de nomenclature (6)
- Parallèle avec un chemin critique puisque tout retard sur ce chemin (émanant de livraison ou de fabrication) affecte d'autant la livraison au client
- Les pièces lancées en fabrication sont affectées à une consommation prévue (politique *lot-for-lot* qui implique de commander exactement le nombre d'articles nécessaires par période) → permet de travailler *sans stock* (en théorie)
- Inconvénient majeur de MRP1 : décorrélation entre les délais et les volumes de production (qui se traduit généralement par l'introduction d'heures supplémentaires pour faire face à l'importance du dépassement des délais pour des volumes importants) ⇒ justification de MRP2



PBC : Calcul des besoins nets (1)

- **Demande pour A sur les semaines 1 à 6 :**
 10, 20, 30, 40, 50, 50
- **Stocks initiaux :**
 A=30, B=70, C= 100, D=100, E=100, F=500
- **On part du niveau supérieur de la nomenclature : produit fini A**
 - semaine 1 : demande couverte par le stock → stock = 20
 - semaine 2 : demande couverte par le stock → stock = 0
 - semaine 3 : lancement de 30 unités en semaine 2
 - semaine 4 : lancement de 40 unités en semaine 3
 - semaine 5 : lancement de 50 unités en semaine 4
 - semaine 6 : lancement de 50 unités en semaine 5
- **Pour pouvoir lancer A, il faut disposer des composants B, C et F**
 - Pour B :
 - semaines 2 et 3 :demandes couvertes par le stock → stock = 0
 - semaine 4 : lancement de 50 unités en semaine 2
 - semaine 5 : lancement de 50 unités en semaine 3



PBC : Calcul des besoins nets (2)

	Semaines					
	1	2	3	4	5	6
Demande A	10	20	30	40	50	50
Stock initial A	30	20	0	0	0	0
Besoin net A	0	0	30	40	50	50
Lancement A	0	30	40	50	50	-
Besoin brut B	0	30	40	50	50	-
Stock initial B	70	70	40	0	0	-
Besoin net B	0	0	0	50	50	-
Lancement B	-	50	50	-	-	-
Besoin brut C	0	60	80	100	100	-
Stock initial C	100	100	40	0	0	-
Besoin net C	0	0	40	100	100	-
Lancement C	0	40	100	100	-	-
Besoin brut D	0	100	100	-	-	-
Stock initial D	100	100	0	-	-	-
Besoin net D	0	0	100	-	-	-
Lancement D	0	100	-	-	-	-
Besoin brut E	0	90	150	100	-	-
Stock initial E	100	100	10	0	-	-
Besoin net E	0	0	140	100	-	-
Lancement E	0	140	100	-	-	-
Besoin brut F	0	380	660	-	-	-
Stock initial F	500	500	120	-	-	-
Besoin net F	0	0	540	-	-	-
Lancement F	540	-	-	-	-	-

Juste-à-temps : Introduction (1)



■ Apparue au Japon dans les années 80 (Toyota)

■ Hypothèses

- planification à court terme dans une production à flux tirés
- **flux tirés** : relancer de nouvelles phases de fabrication pour remplacer des produits ou des composants sortis des stocks
- production de masse

■ But

- fournir le produit exactement au moment du besoin et exactement dans la quantité désirée
- minimiser les en-cours
- tendre vers un flux de produits continu, approcher les quatre zéros (0 stock / 0 retard / 0 défaut / 0 panne)

Juste-à-temps : Introduction (2)



■ Principe

- simpliste
- mise en ligne des machines pour accroître la fluidité
- équipements spécialisés, opérateurs polyvalents
- flux tirés et recherche des quatre 0 (réunion entre les différents acteurs de la production)

JAT : La méthode Kanban (1)



■ Description

- OF en provenance de l'aval = "ticket" ou "Kanban"
- un Kanban comporte les informations suivantes :
 - désignation de la pièce et de l'opération
 - désignation des lieux d'origine et de destination
 - quantité par conteneur (conteneur sert aux manipulations inter-postes)
 - nombre de tickets en circulation dans la boucle
- particularité d'un Kanban : circule en permanence dans le flux de fabrication ; il descend le flux avec les pièces et le remonte une fois les pièces consommées
- chaque poste de transformation possède un tableau mural de Kanbans ; une colonne par référence ; chaque colonne possède des index indiquant un niveau de lancement en fabrication possible (lot économique) et un seuil d'alerte imposant un lancement en urgence
(remarque : la méthode Kanban n'induit pas de 0 stock comme le voudrait le juste-à-temps)

JAT : La méthode Kanban (2)



■ Problème

- déterminer le nombre de Kanbans de chaque type nécessaires dans l'atelier
- fait par simulation ou tâtonnements successifs (on enlève des Kanbans jusqu'à ce que des ruptures de stock apparaissent)

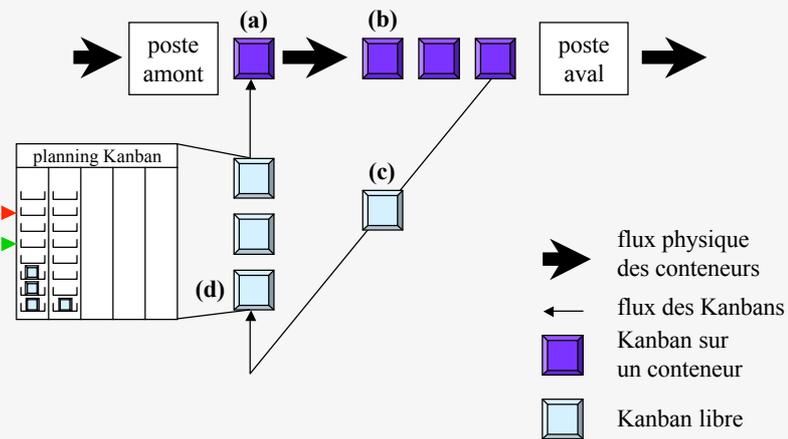
■ Différentes phases

- (a) le Kanban est mis sur le conteneur de pièces qui viennent d'être fabriquées au poste amont
- (b) le Kanban accompagne le conteneur au poste suivant (en aval du flux) et reste sur le conteneur en attente
- (c) au moment où le conteneur est mis en fabrication sur le poste aval, le Kanban est libéré et retourne au poste amont
- (d) le Kanban est placé dans un planning, près du poste amont ; il sera retiré de ce planning au moment d'une nouvelle mise en fabrication

JAT : La méthode Kanban (3)



■ Circulation des Kanbans



OPT (Optimized Production Technology)

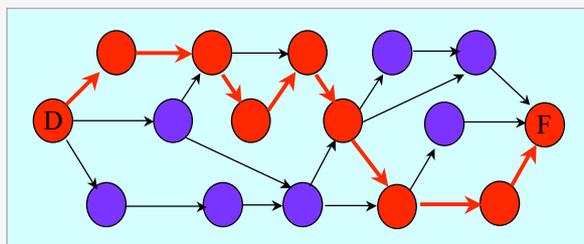


- plus une philosophie qu'une méthode
- concept de flux tirés traduit par un flux de lancement adapté au rythme des machines les plus lentes
- basée sur un ensemble de 10 règles de bon sens utilisant la notion de ressource goulot
 - il faut équilibrer les flux (dynamique) et non les capacités (statique)
 - l'utilisation d'une ressource non goulot n'est pas liée à sa capacité
 - 1 h perdue sur une ressource goulot est 1 h perdue pour tout le système
 - 1 h gagnée sur une ressource non goulot est un leurre
 - les lots de fabrication doivent être de taille variable et non fixe
 - calculs des besoins en composants et calcul du plan de production doivent être réalisés simultanément (remet en cause le MRP)
 - ...

Ordonnancement de projet

■ Méthode à chemin critique (PERT)

- modélisation par graphe potentiels
- recherche des ordonnancements au plus tôt/tard
- identification des tâches critiques
- caractérisation des marges



Algorithme général de résolution



tant que *il reste des variables non affectées*
et que *une inconsistance globale n'est pas détectée*
appliquer les raisonnements

si *une inconsistance est détectée*
alors si *il existe des choix non explorés*
alors *retour arrière sur un choix non exploré*
sinon *inconsistance globale détectée*

sinon
sélectionner une variable encore libre
choisir une valeur pour cette variable et mémoriser les autres



Affectation et "Branch and Bound"



Tournée \ Camion	Tour 1	Tour 2	Tour 3
Cam A	94	1	54
Cam B	74	10	88
Cam C	62	88	8

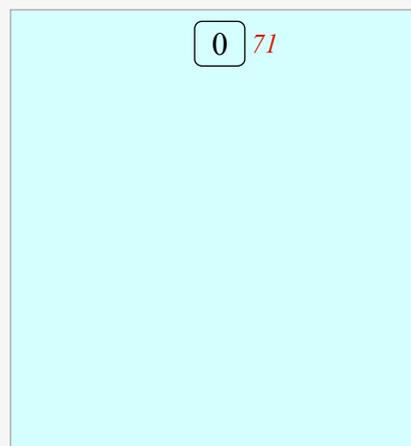
- **Principe de séparation :**
affecter un camion à une tournée
- **Fonction d'évaluation :**
somme des coûts minimaux par tournée

Affectation et "Branch and Bound"



Tournée \ Camion	Tour 1	Tour 2	Tour 3
Cam A	94	1	54
Cam B	74	10	88
Cam C	62	88	8

- **Principe de séparation :**
affecter un camion à une tournée
- **Fonction d'évaluation :**
somme des coûts minimaux par tournée
 $71 = 62 + 1 + 8$

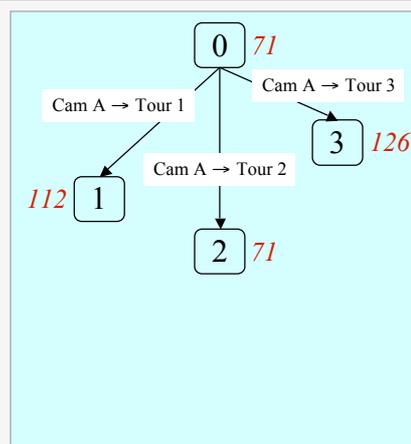


Affectation et "Branch and Bound"



Tournée \ Camion	Tour 1	Tour 2	Tour 3
Cam A	94	1	54
Cam B	74	10	88
Cam C	62	88	8

- **Principe de séparation :**
affecter un camion à une tournée (**Cam A**)
- **Fonction d'évaluation :**
somme des coûts minimaux par tournée

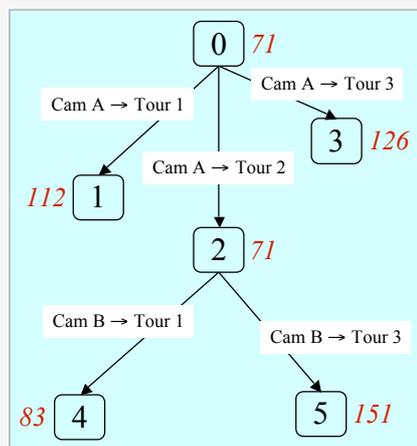


Affectation et "Branch and Bound"



Tournée \ Camion	Tour 1	Tour 2	Tour 3
Cam A	94	1	54
Cam B	74	10	88
Cam C	62	88	8

- **Principe de séparation :** affecter un camion à une tournée (**Cam B**)
- **Fonction d'évaluation :** somme des coûts minimaux par tournée

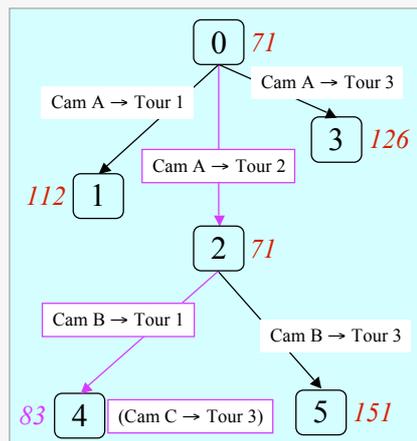


Affectation et "Branch and Bound"



Tournée \ Camion	Tour 1	Tour 2	Tour 3
Cam A	94	1	54
Cam B	74	10	88
Cam C	62	88	8

- **Principe de séparation :** affecter un camion à une tournée (**optimum**)
- **Fonction d'évaluation :** somme des coûts minimaux par tournée



Affectation et "Branch and Bound"

Tournée \ Camion	Tour 1	Tour 2	Tour 3
Cam A	94	1	54
Cam B	74	10	88
Cam C	62	88	8

- **Principe de séparation :** affecter un camion à une tournée (**optimum**)
- **Fonction d'évaluation :** somme des coûts minimaux par tournée
- **Les nœuds pendants sont sondés par test d'optimalité**

P. Lopez – LAAS-CNRS
Gestion de Production
85

Programme linéaire

min $\sum_{ijk} x(i,j,k)$

sous

{

$\forall j,k, \sum_{ijk} x(i,j,k) < 1$

$\forall i,j,k, x(i,j,k) - x(i,j,k-1) < 1$

$\forall j, \sum_{ik} t(i,j) * x(i,j,k) < tmax(j)$

$t(i,j) \in \mathbb{R}$

$x(i,j,k) \in \{0,1\}$

)

)

)

critère

contraintes globales

contraintes de domaines

- **résolution par solveurs :** Xpress-MP, Cplex, Excel, Matlab (Tool Box "Optimisation")
 - 1ère phase : relaxation en variables continues (Simplexe)
 - 2ème phase : optimisation combinatoire

P. Lopez – LAAS-CNRS
Gestion de Production
86