

Problèmes d'ordonnancement dans les systèmes de production

Michel Gourgand
Université Blaise Pascal – Clermont Ferrand
LIMOS CNRS UMR 6158

1

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Le LIMOS

**Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et
d'Optimisation des Systèmes**

L'activité du LIMOS est globalement centrée sur la conception d'outils et de modèles informatiques pour l'optimisation, le contrôle et l'évaluation des systèmes organisationnels.

Elle se décline selon trois orientations principales :

- Algorithmique et Aide à la Décision
- Systèmes d'Information et de Communication
- Modélisation, Organisation et Pilotage des Systèmes de Production

2

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Plan de l'exposé

- Introduction
- Définitions
- Les problèmes théoriques
- Les méthodes
- Exemples industriels
- Conclusion et Perspectives
- Le groupe Bermudes
- Quelques références

3

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Introduction

Définition du dictionnaire :

Ordonnancement : organisation méthodique (de la fabrication, d'un processus, ...)

Contexte :

Fonction de décision dans les systèmes de production de biens et de services

4

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Définitions

- Ordonnancement
- Tâches
- Problème d'optimisation
- Problème d'évaluation
- Organisation hiérarchique fonctionnelle
- Le thème de l'ordonnancement

5

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Définitions de l'ordonnancement

- **Définition 1**
Ordonnancer (ou planifier) le fonctionnement d'un système industriel de production consiste à gérer l'allocation (ou l'accès) à des ressources au cours du temps, tout en satisfaisant au mieux un ensemble de critères.
- **Définition 2**
Une tâche est un travail élémentaire nécessitant un certain nombre d'unités de temps et de ressources. Ordonnancer un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leur date de début.

6

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Définitions de l'ordonnancement

■ Définition 3

L'ordonnancement concerne l'affectation de ressources limitées aux tâches dans le temps. C'est un processus de prise de décision dont le but est d'optimiser un ou plusieurs objectifs.

■ Définition 4

Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, ...) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises.

7

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Définitions de l'ordonnancement

- Définition 5

Un problème d'ordonnancement consiste à :

- déterminer les dates d'entrée des produits,
- trouver un ordre de traitement admissible (le problème peut être surcontraint),
- constituer des campagnes de production,
- déterminer une planification robuste aux événements aléatoires.

8

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Définition : Les tâches

Les tâches sont le dénominateur commun des problèmes d'ordonnancement, leur définition n'est ni toujours immédiate, ni toujours triviale.

Une tâche est caractérisée par :

- une durée,
- une date de disponibilité,
- une date de fin au plus tard,
- une quantité de ressources,
- ...

9

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Le problème d'optimisation

Etant donné un ensemble de tâches et un ensemble de ressources, il faut programmer les tâches et affecter les ressources de façon à optimiser un objectif ou plusieurs (un objectif correspondant à un critère de performance), en respectant un ensemble de contraintes.

→ **Problème d'optimisation combinatoire
(méthodes exactes et approchées)**

10

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Le problème d'évaluation

Critères de performance :

- Temps total de traitement,
- Retard,
- Temps d'attente,
- Taux d'occupation,
- Nombre de changements d'outils,
- ...



Problème d'évaluation de critères de performance (modélisation, spécification, simulation, ...)

11

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Le problème d'évaluation

Compréhension du fonctionnement interne et spécification des règles de gestion

Pour assurer au système un fonctionnement « satisfaisant », il faut :

- spécifier de bonnes politiques de gestion (gestion des ressources de transport, des stocks, de l'utilisation des machines,...),
- déterminer les goulets d'étranglement,
- mieux gérer les ressources critiques,
- s'assurer que les ressources sont utilisées au mieux.

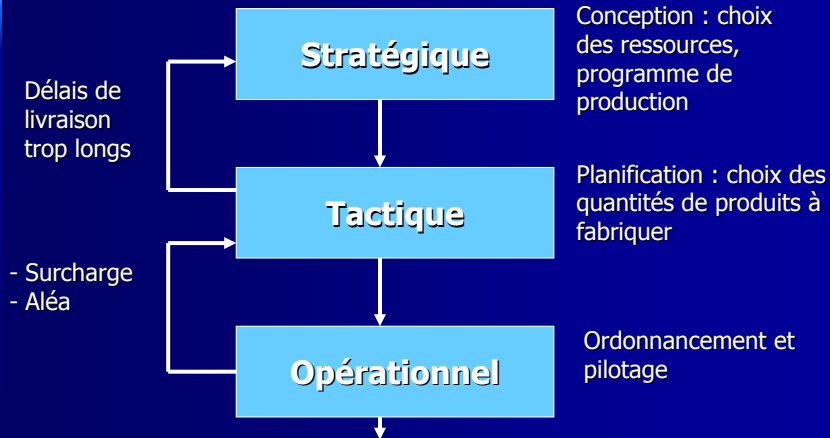
Des règles de gestion classiques peuvent être utilisées mais d'autres règles spécifiques au problème peuvent être proposées.

Panwalker et Iskander, ont référencé 113 règles différentes

12

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Organisation hiérarchique fonctionnelle



13

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Le thème de l'ordonnancement

L'ensemble des tâches (travaux, opérations, ...) à réaliser est connu a priori. Le problème est alors dit *statique*, par opposition à un problème *dynamique* pour lequel l'ensemble des tâches évolue avec le temps.

On considère généralement que les ressources sont renouvelables (machine, fichier, processeur, homme, ...). Parmi les ressources renouvelables, on distingue les ressources disjonctives, qui ne peuvent exécuter qu'une opération à la fois et les ressources cumulatives, qui peuvent exécuter un nombre limité d'opérations simultanément.

Le thème de l'ordonnancement concerne la mise au point d'algorithmes de résolution performants, exacts ou approchés, pour résoudre des problèmes d'ordonnancement académiques ou industriels

14

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Les problèmes théoriques

- Les problèmes d'atelier
- Flow shop
- Job shop
- Flow shop hybride
- RCPSP
- Hoist Scheduling Problem
- Job shop avec transport

15

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Les problèmes d'atelier

Pas de ressource (Problème central, PERT)



16

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Les problèmes d'atelier

Les systèmes étudiés peuvent être de différentes natures :

- systèmes industriels de production,
- systèmes informatiques,
- systèmes administratifs,
- systèmes hospitaliers,
- systèmes de transport, ...

Dans ces systèmes, les problèmes d'ordonnancement sont souvent résolus à travers des modèles théoriques tels que : flow-shop, flow-shop hybride, job-shop, ...

17

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Flow Shop, Job Shop

- Flow Shop : Atelier à cheminement unique



Exemple : Chaîne de montage

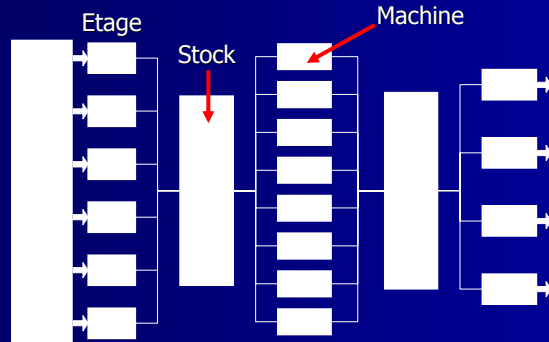
- Job Shop : Atelier à cheminements multiples

18

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Flow Shop Hybride

Problème d'ordonnement et d'affectation



19

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Flow Shop Hybride déterministe

- H1** La date de disponibilité des produits est connue,
- H2** Les machines sont toujours disponibles,
- H3** Les temps de traitement sont déterministes et indépendants,
- H4** Les temps de montage et de démontage sont inclus dans les temps de traitement,
- H5** Les temps de transport sont négligeables,
- H6** Il n'y a pas de fragmentation de lots,
- H7** Une machine ne peut pas traiter plus d'un produit à un instant donné,
- H8** Un produit est traité par au plus une machine à un instant donné,
- H9** Les produits peuvent attendre dans des stocks de capacité illimitée entre les étages,
- H10** Un produit est traité par une seule machine de chaque étage,
- H11** Les machines d'un étage peuvent être identiques, proportionnelles ou non identiques.

20

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Flow Shop Hybride stochastique

Si on considère les événements aléatoires, les trois premières hypothèses peuvent être remplacées par les hypothèses suivantes :

H'1 La date de disponibilité des produits est inconnue,

H'2 Les machines peuvent tomber en panne,

H'3 Les temps de traitement sont modélisés par des variables aléatoires.

21

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

RCPSP

Resource Constrained Project(s) Scheduling Problem

Problème d'ordonnancement de projet sous contraintes de ressources :

Systèmes dans lesquels on doit trouver pour chaque tâche à réaliser la (ou les) ressource(s) à utiliser et dans quelle quantité, ainsi qu'une séquence des tâches sur ces ressources.

22

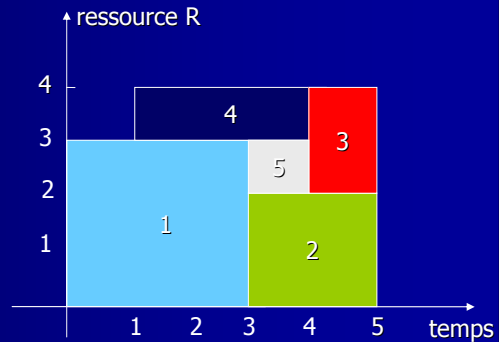
Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

RCPSP

Resource Constrained Project(s) Scheduling Problem

Exemple simple

i	1	2	3	4	5
a_i	3	2	2	1	1
r_i	0	2	3	1	3
t_i	3	2	1	3	1
d_i	5	5	6	6	5



23

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

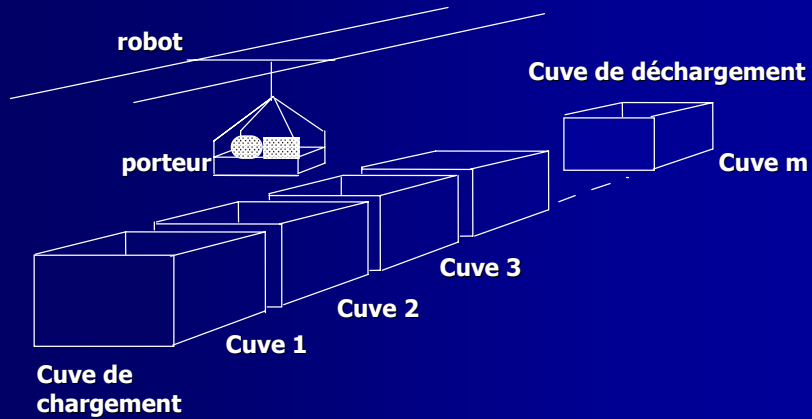
Hoist Scheduling Problem

- Le Hoist Scheduling Problem concerne les lignes de production dotées d'une ressource de transport critique. Il faut ordonnancer simultanément les tâches de production (bornées par des valeurs minimales et maximales) et celles de transport. Ce problème peut être traité en répétitif si tous les produits sur la ligne sont identiques.
- Problème académique
- Problème industriel

24

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Hoist Scheduling Problem

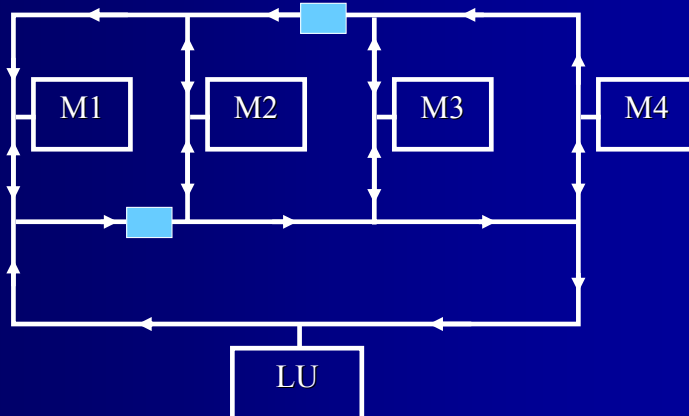


25

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Job Shop avec transport

Exemple d'une topologie



26

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Les méthodes

- Complexité algorithmique
- Méthodes exactes
- Méthodes approchées
- Algorithme de Johnson pour FS2 | Cmax
- Heuristique CDS pour FSm | Cmax
- Méthodes pour le problème du Job Shop
- Algorithme du recuit simulé
- Systèmes de voisinage
- Algorithme du kangourou
- Méthode tabou
- Autres méthodes
- La double complexité

27

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

La complexité algorithmique

- Les problèmes étudiés sont en général NP-complets
- Un algorithme est considéré comme efficace si et seulement si il est polynomial

28

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Méthodes exactes

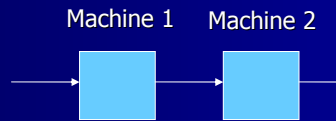
- Procédures d'exploration arborescentes (Branch and Bound, ...)
- Programmation mathématique (PLNE, programmation dynamique, ...)

Méthodes approchées

- Heuristiques
- Méthodes déterministes (méthode tabou, ...)
- Méthodes stochastiques (recuit simulé, algorithmes génétiques, ...)
- Hybridation de méthodes
- ...

Algorithme de Johnson pour le problème du flow-shop à 2 machines

Flow shop à deux machines



Le travail i précède le travail j dans une séquence optimale si :

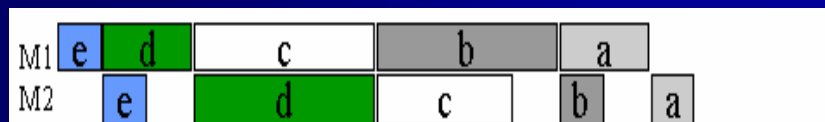
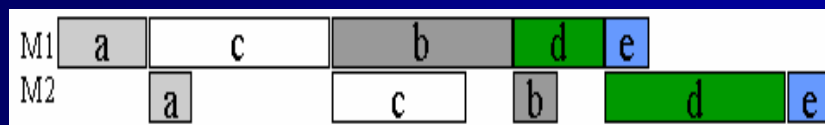
$$\text{Min}(t_{i1}, t_{j2}) < \text{Min}(t_{j1}, t_{i2})$$

Algorithme polynomial

31

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Algorithme de Johnson pour le problème du flow-shop à 2 machines



32

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Heuristique CDS pour le problème du flow-shop à m machines

Dans le cas où le nombre de machines est > 2 , il n'existe pas de méthode exacte polynomiale.

Heuristique de Campbell, Dudek et Smith :

A partir du problème à m machines, on génère m-1 problèmes à 2 machines.

Méthodes pour le problème du Job Shop

- Algorithme de Jackson pour 2 machines
- Méthode graphique pour 2 tâches
- Méthodes d'énumération, heuristiques, ... dans le cas général

L'algorithme du recuit simulé

T est une température,

X est l'état initial,

RX:=X (état record)

tant que nécessaire **faire**

Choisir Y dans V(X) aléatoirement et uniformément ;

si $H(Y) < H(RX)$ **alors** $RX:=Y$; **fin**

si $H(Y) \leq H(X)$ **alors** $X:=Y$

sinon $X:=Y$ avec la probabilité $\exp(-(H(Y)-H(X))/T)$

fin

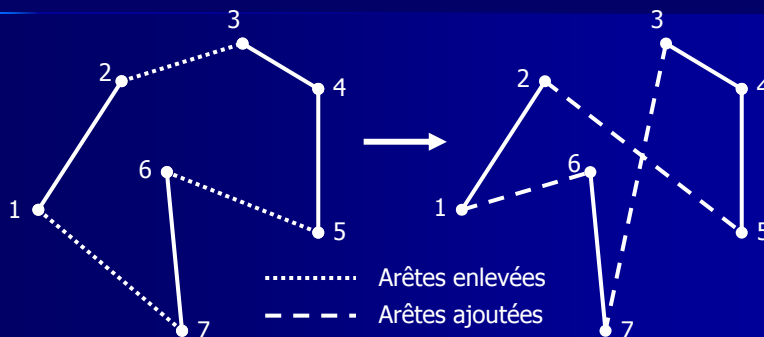
Générer une nouvelle température ;

fait

35

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Systèmes de voisinage



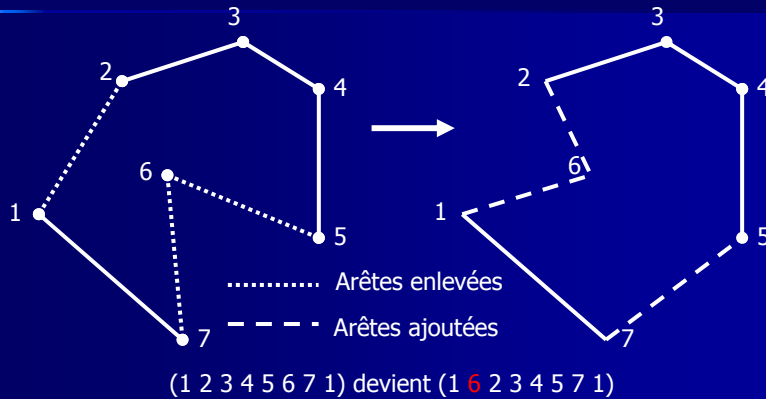
(1 2 3 4 5 6 7 1) devient (1 2 5 4 3 7 6 1)

Exemple de mouvement r-opt avec r=3 pour le TSP

36

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Systemes de voisinage



Exemple de mouvement insertion pour le TSP

37

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

L'algorithme du kangourou

Choisir A; $c:=0$; X est l'état initial; $RX:=X$; (RX est l'état record)

tant que nécessaire ***faire***

si ($c < A$) ***alors***

Choisir aléatoirement et uniformément Y dans $V(X)$;

si $H(Y) \leq H(X)$ ***alors***

si $H(Y) < H(X)$ ***alors***

$c:=0$; ***si*** $H(Y) < H(RX)$ ***alors*** $RX:=Y$ ***fin******si***

fin***si***

$X:=Y$;

sinon $c:=c+1$;

fin***si***

sinon (* effectuer un saut *)

Choisir aléatoirement et uniformément Y dans $W(X)$; $c:=0$;

si $H(Y) < H(RX)$ ***alors*** $RX:=Y$; ***fin******si***

$X:=Y$;

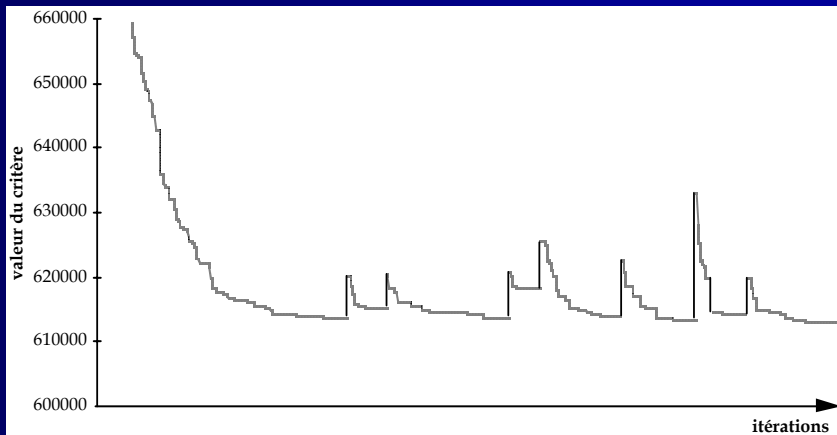
fin***si***

fait

38

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

L'algorithme du kangourou



39

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

La méthode TABOU

Initialiser la liste tabou ;

Construire l'état initial X;

Tant que nécessaire ***faire***

Choisir Y le meilleur voisin de X qui n'est pas dans la liste tabou;

X:=Y;

Mettre à jour la liste tabou

fait

40

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Autres méthodes

- Algorithmes génétiques
- Algorithmes évolutionnistes
- Colonies de fourmis
- Scatter search
- Hybridation de méthodes
- ...

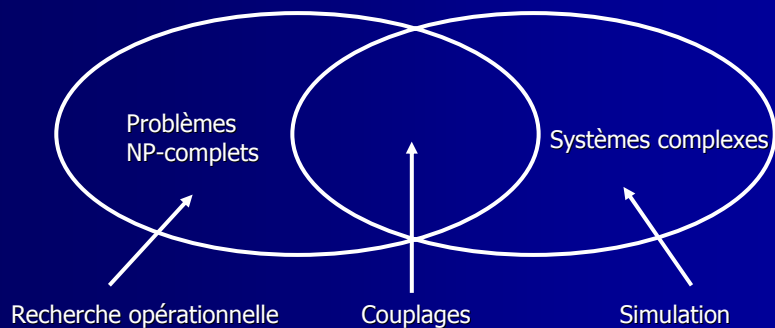
41

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

La double complexité

Complexité algorithmique

Complexité structurelle
et fonctionnelle



42

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemples industriels

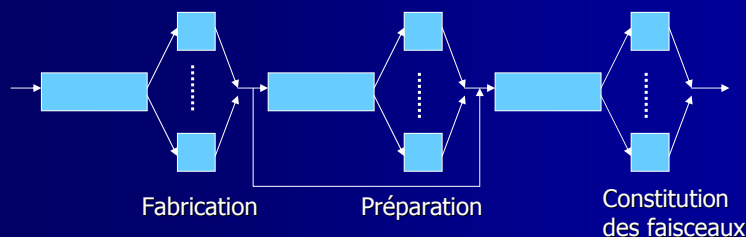
- Flow shop hybride
 - Atelier de fabrication de faisceaux
 - Usine manufacturière (version simplifiée)
 - Usine manufacturière
- Job shop avec transport
- Chantiers polyvalents
- Line balancing
- Système d'assemblage

43

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Flow Shop Hybride

Exemple 1 : Atelier de confection de faisceaux électriques



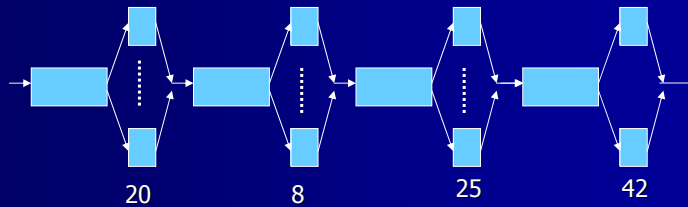
- Comparaison de règles de gestion des stocks
- Prise en compte des temps de changement d'outils

44

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Flow Shop Hybride

Exemple 2 : Usine manufacturière simplifiée (7000 pièces et 10 familles)



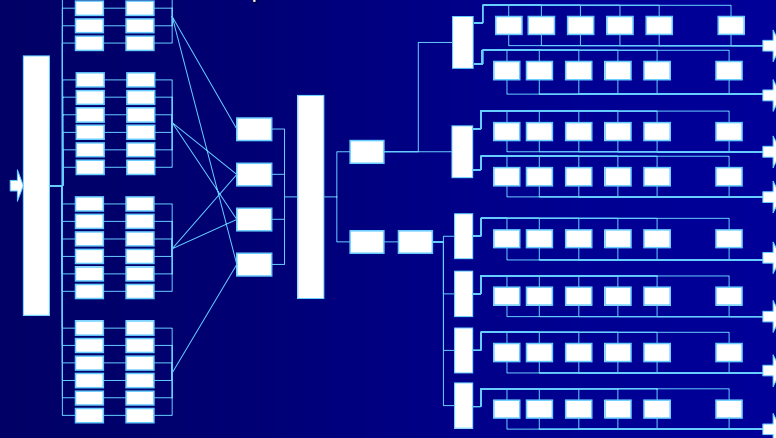
Objectif : Trouver un ordonnancement des travaux en entrée et une affectation des travaux aux machines qui minimisent le temps total de production et le nombre de changements d'outils

45

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Flow Shop Hybride

Exemple 3 : Usine manufacturière

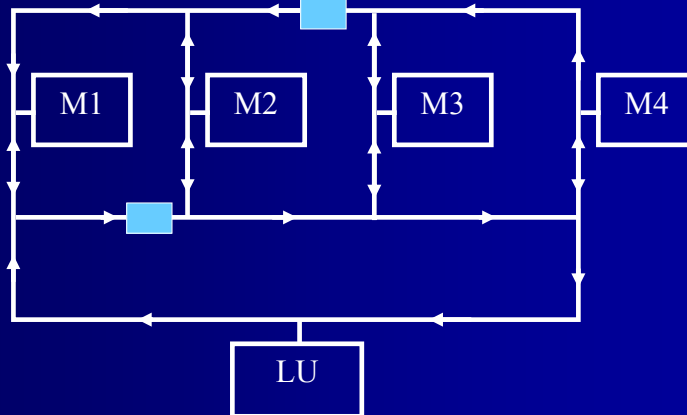


46

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Job Shop avec transport

Exemple d'une topologie



47

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Job Shop avec transport

Complexité

Résolution conjointe de deux problèmes NP-complets :

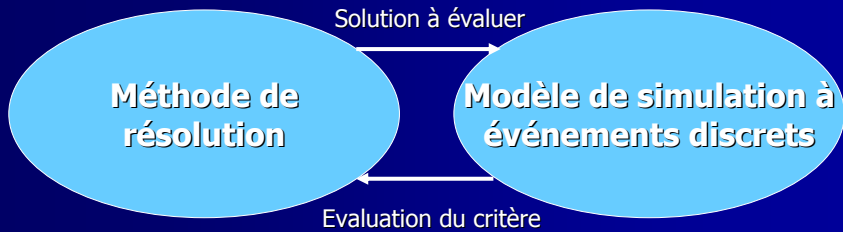
- Job Shop Scheduling Problem
- Vehicle Scheduling Problem

48

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Job Shop avec transport

Couplage méthode - modèle



49

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Job Shop avec transport

Jeux d'essai [Ulusoy & Bilge, 1993]

- 40 instances :
 - 4 machines, 2 véhicules
- 10 jeux de données :
 - 5 à 8 pièces, 13 à 23 opérations
- 4 topologies

50

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Job Shop avec transport

Résultats : comparaison avec la littérature

Les trois méthodes mises en œuvre (méthode de recherche locale itérée, recuit simulé, méthode hybride) sont toujours au moins aussi bonnes que le meilleur résultat de la littérature.

23 nouvelles bornes supérieures (sur 40 instances)

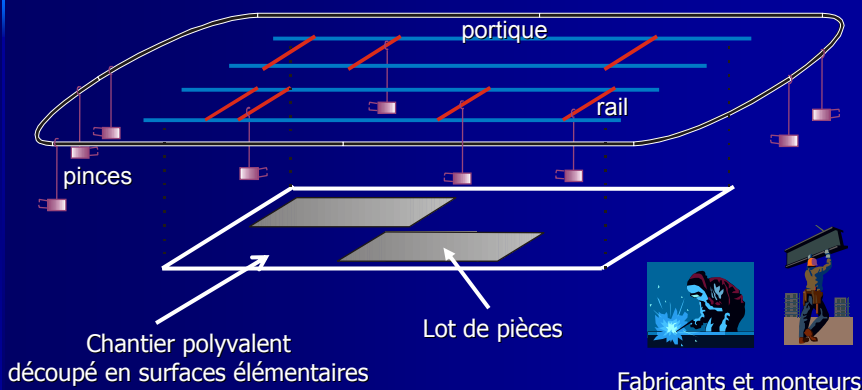
Instance	Littérat.	Résult.
Ex24	113	108
Ex31	105	99
Ex44	126	121

Instance	Littérat.	Résult.
Ex71	118	111
Ex72	85	79
Ex104	164	159

51

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

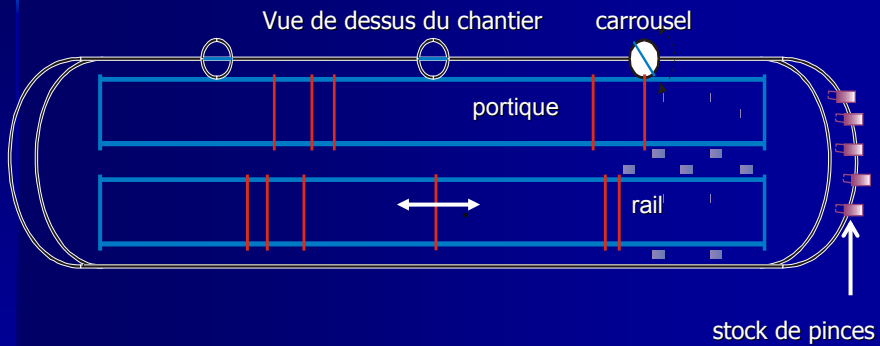
Exemple : Chantiers polyvalents



52

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Chantiers polyvalents

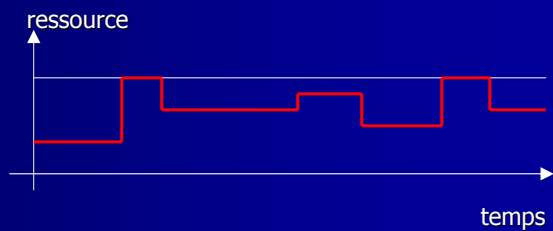


53

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Chantiers polyvalents

- Ressources :
- Surface élémentaire
 - Pince
 - Rail
 - Armoire électrique
 - Carrousel
 - Monteur
 - Fabricant

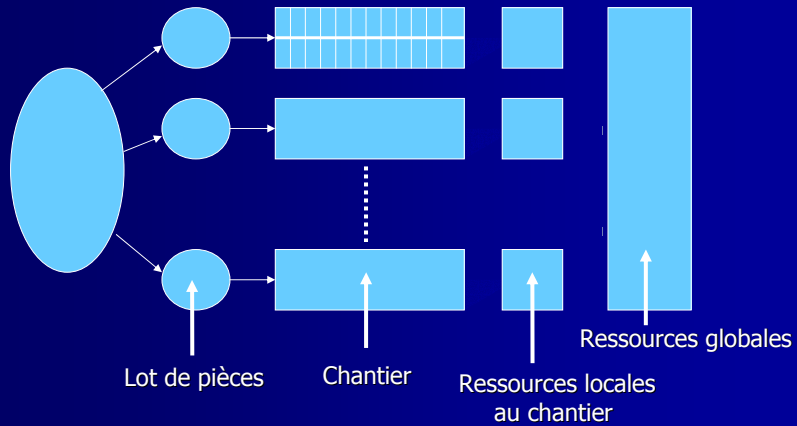


Une ressource est globale ou locale

54

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

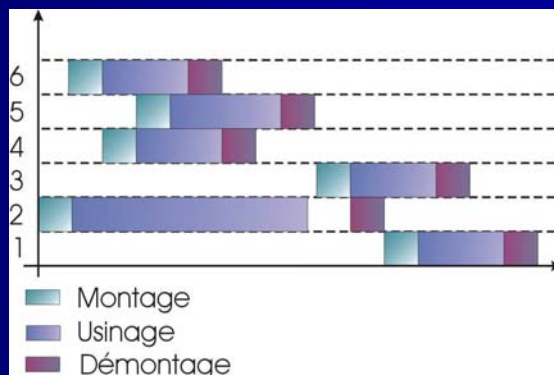
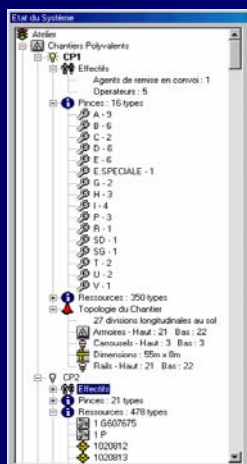
Exemple : Chantiers polyvalents



55

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Chantiers polyvalents



56

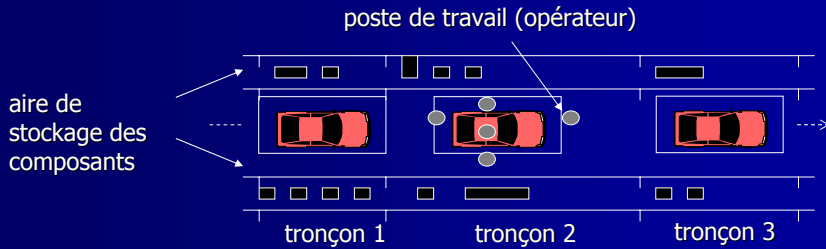
Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Line balancing



Objectifs

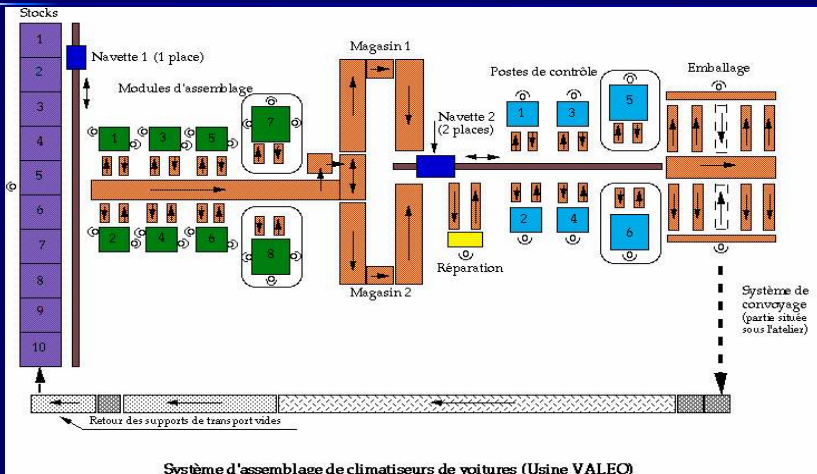
- minimiser le nombre de gammes déplacées
- n'ouvrir que les postes nécessaires
- lisser la charge de travail



57

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Exemple : Système d'assemblage



58

Système d'assemblage de climatiseurs de voitures (Usine VALEO)

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Conclusion

Problématique très large

- Ordonnancement d'entités de flux
- Affectation de ressources, d'opérations
- Planification des mouvements des moyens de transport
- Agencement
- Dimensionnement
- Planification de la production

59

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Perspectives

- Job shop flexible
- Problèmes de transport
- Extensions du RCPSP
- Problèmes multi-critères
- Systèmes intégrés de gestion
- Contexte stochastique
- ...

60

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

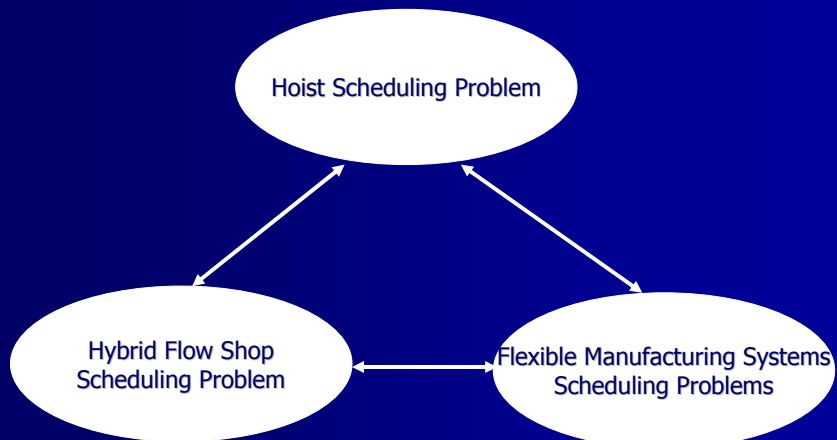
Le groupe Bermudes

- Le thème de recherche du groupe Bermudes est l'ordonnancement au sens large.
- Le groupe de travail Bermudes, créé en Juin 1996, est composé de 26 laboratoires et comprend environ 250 membres.
- Site Web :
<http://bermudes.univ-bpclermont.fr>

61

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Le groupe Bermudes : la problématique



62

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Le groupe Bermudes : objectifs

- Offrir aux doctorants un cadre d'expression et d'échanges
- Faciliter l'accès à la connaissance dans le domaine de l'ordonnancement
- Réaliser une typologie des problèmes et définir et valider les notations pour les problèmes étudiés
- Proposer des méthodes de résolution
- Renforcer et développer la collaboration entre les laboratoires

63

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

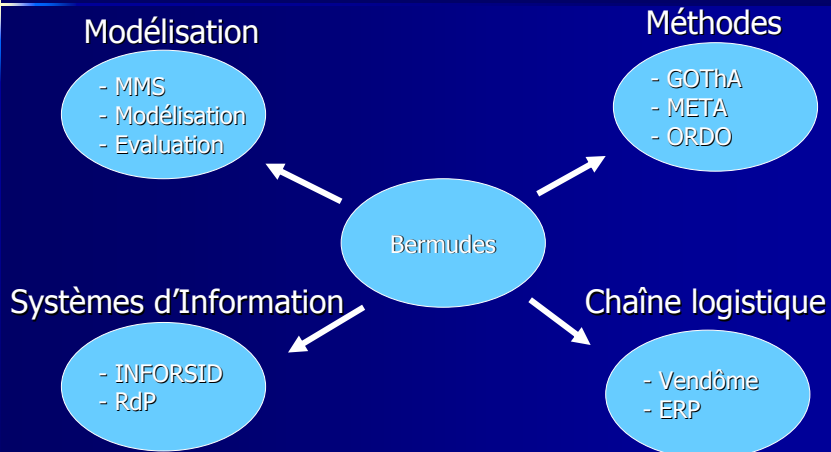
Le groupe Bermudes : Problématique

- Résolution de classes de problèmes d'ordonnancement complexes résistant aux techniques classiques
- Proposition de méthodes et d'outils de résolution de problèmes théoriques et de problèmes industriels

64

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Liens du groupe Bermudes avec d'autres groupes



65

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Actualités et perspectives du groupe Bermudes

- Participation aux Actions Spécifiques CNRS « Recherche Opérationnelle » et « Production et Logistique »
- Action transversale inter-GDRs :
 - GOTHa : GDR ALP
 - ORDO : GDR ARP
 - Bermudes : GDR MACS
- Nouveau GDR MACS (Modélisation, Analyse et Conduite de Systèmes) composé de deux pôles :
 - Automatique
 - Sciences et Techniques de la Production (de biens et de services)
- Prochaines réunions : Clermont (13 Juin) et Tours (Septembre)

66

Journée "Automatique et Optimisation" – Université de Paris 12 – 20 Mars 2003

Quelques références

- Ouvrage collectif : Ordonnement de la production, coordonné par P. Lopez et F. Roubellat, HERMES
- P. Brucker : Scheduling algorithms, Springer, 2001
- J. Carlier, P. Chrétienne : Problèmes d'ordonnement (modélisation / complexité / algorithmes), Masson, 1988
- M. Pinedo : Scheduling, theory, algorithms, and systems, Prentice Hall, 1995
- M. R. Garey, D. S. Johnson : Computers and Intractability – A Guide to the Theory of NP-Completeness, W.H. Freeman And Company, 1979
- ...