

ORDONNANCEMENT D'ATELIER

Chapitre I : Généralités

I.1 INTRODUCTION

Toute entité économique (entreprise industrielle, entreprise du bâtiment, administration, sous-traitant, ...) doit assurer la cohérence technique et économique de la réalisation du produit et/ou service avec le contrat qui la lie au client. Cette réalisation doit amener la satisfaction du client (voir concept de qualité) en respectant le cahier des charges, les délais, et les coûts. Pour cela il faut effectuer deux types de gestions :

- Une gestion technique : spécifications, délais,
- Une gestion économique : coûts, prix de revient ...

Les différentes méthodes utilisées permettent de faire apparaître clairement et rapidement les données liées à la réalisation d'un projet, telles que :

- Les temps, les délais,
- Les moyens, ou ressources,
- Les coûts.

De plus, ces méthodes peuvent permettre de prévoir au moment opportun, les contrôles qui s'imposent en cours de réalisation (le suivi).

I.2 HISTORIQUE

La plupart des méthodes ont été mises au point pour mener à bien l'effort de reconstruction après la seconde guerre mondiale.

La méthode « PERT » (Program Evaluation and Research Task ou Program Evaluation and Review Technic) a été mise au point lorsque les Etats-Unis ont entrepris de créer leur force d'attaque nucléaire (sous-marins et fusée Polaris). Il fallait aller vite pour rattraper le retard pris sur l'URSS. Ce projet était soumis à de nombreux problèmes techniques :

- Délai fixé,
- Coordination de 250 fournisseurs et 9000 sous-traitants.

ORDONNANCEMENT D'ATELIER

Pour obtenir l'efficacité maximale des efforts de chacun pour l'agencement du projet, il fallait disposer d'une méthode systématique **de planification, de contrôle, et de correction**.

La création de la méthode PERT fut décidée dans ce but, et son utilisation ramena la durée du projet de six ans à deux ans et demi.

Dans le même temps pour les mêmes raisons d'autres méthodes ont fait leur apparition : réseaux de PETRI, méthode MPM (Méthode des Potentiels Métra) en France, diagrammes de GANTT, ou encore graphes « chemin de fer ».

I.3 Ordonnancement

Ordonnancer : Programmer les séquences de fabrication de produits différents sur les mêmes équipements c'est-à-dire fournir aux ateliers un ordre de réalisation des ordres de fabrication sur tous les postes de travail

La théorie d'ordonnancement est une branche de la recherche opérationnelle, qui consiste à ordonner un ensemble d'opérations tout en satisfaisant un ensemble de contraintes et en optimisant un ou plusieurs objectives. L'ordonnancement joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs d'activités à savoir, en : informatique (ordonnancement de processus), administration (établissement d'un emploi du temps, gestion des ressources humaines), industrie (gestion des ateliers de production), construction (gestion des chantiers routiers), logistique (gestion des livraisons et des stocks).

Parmi ces nombreux types de problèmes d'ordonnancement, nous nous sommes intéressés dans le cadre de cette thèse aux problèmes d'ordonnancement d'ateliers dans les systèmes de production.

Un atelier de production est un espace physique où la fabrication se déroule. Il est composé de ressources humaines et matérielles, et caractérisé par les types de tâches à exécuté, les type de ressources et la gamme de fabrication, que nous présentons en détail dans les sous-sections suivantes.

ORDONNANCEMENT D'ATELIER

Remarque

L'ordonnancement n'est pas utile lorsque la production est du type continu ou quasi continu (exemple cimenterie, aciérie ou production automobile) car il consiste essentiellement à déterminer l'ordre de réalisation des travaux lors de la production.

Or dans une production continue l'ordre des travaux est figé

Exemple : dans une chaîne d'assemblage d'un appareil de petit électroménager fabriqué en très grande série, la gamme de montage est fixe, seule est importante la présence des composants au bon endroit, au bon moment et en nombre suffisant.

L'ordonnancement est surtout utilisé dans les productions de type discontinu pour les petites et moyennes séries (ateliers).

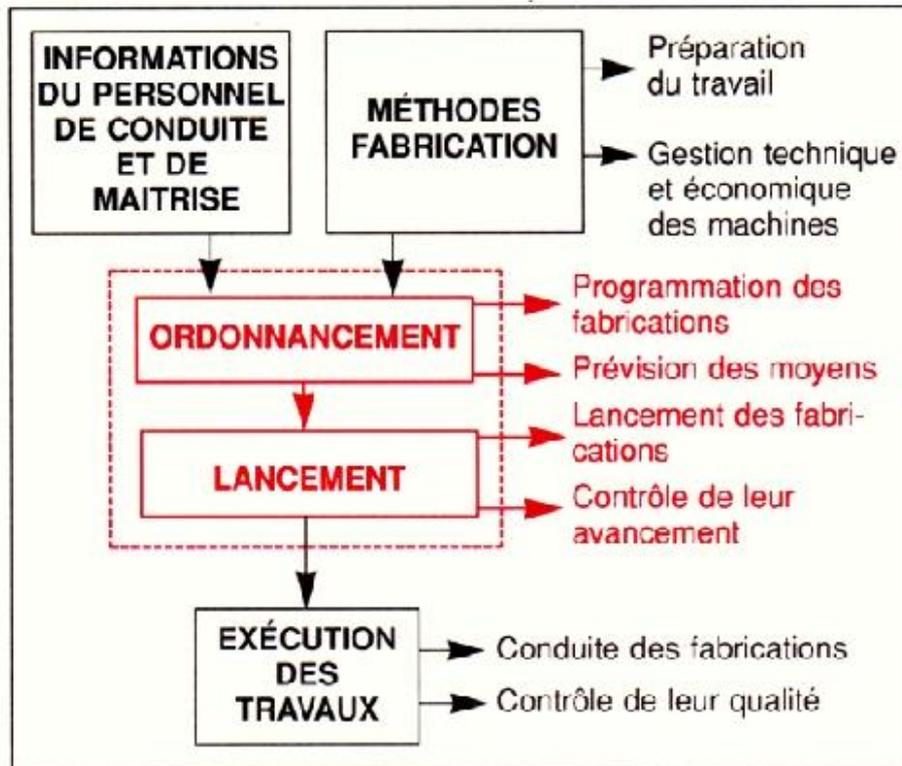
Il consiste, à partir des ordres de fabrications issus du système MRP (s'il existe) ou à partir des commandes fermes ou prévisionnelles de clients, à définir l'ordre de passage des fabrications sur les postes de charge et ensuite à réaliser le lancement et le suivi de la production.

I.4 FONCTION ORDONNANCEMENT

L'ordonnancement est la fonction qui, responsable de la fixation des délais, prévoit les moyens de réalisation, les affecte en temps opportun et veille à leur mise en œuvre.

La figure 1a précise les relations fonctionnelles de l'ordonnancement et du lancement avec les autres fonctions de l'entreprise.

ORDONNANCEMENT D'ATELIER



1a Situation des fonctions ordonnancement et lancement dans la fabrication.

Exemples :

Exemple du menuisier

Un menuisier doit réaliser 4 commandes

	à livrer dans	temps de travail
1 table	4 jours	2 jours
6 chaises	6 jours	5 jours
1 vaisselier	7 jours	2 jours
1 commode	5 jours	4 jours



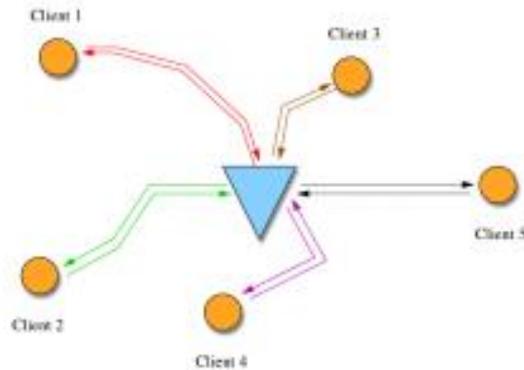
- Minimiser le plus grand retard
- Minimiser le nombre de commandes en retard

ORDONNANCEMENT D'ATELIER

Exemple : Ordonnancement en transport routier



- Des clients à livrer en direct depuis un entrepôt
- Une flotte de camions à disposition
- Comment effectuer les livraisons



Livraison à effectuer dans la journée

	durée A/R + Chargement	fenêtre de livraison
client 1	90 mn	6h - 8h30
client 2	80 mn	7h - 8h
client 3	70 mn	7h - 9h
client 4	120mn	7h30 - 9h30
...

- Livrer toutes les commandes à l'heure
- Minimiser les pénalités de retard/avance

ORDONNANCEMENT D'ATELIER

Gestion de quais de déchargement

- Porte-containers/cargos à décharger
- Des quais avec des équipements et des longueurs différentes
- Comment gérer le plan d'amarrage ?
- Pour maximiser le débit du port, minimiser les temps d'attente des cargos, obtenir un amarrage équitable



Ordonnancement d'atelier :



- Atelier de montage/Ligne de production
- Les produits passent d'un poste à un autre : jobs avec un ensemble d'opérations à réaliser
- Machines spécifiques (dédiées) pour réaliser les opérations
- Allocation fixée des ressources aux opérations

Chapitre II : Types d'ordonnancement

II.1 Deux types d'ordonnancement sont possibles :

- **L'un centralisé**, où l'on va définir pour chaque centre de charge un calendrier prévisionnel de fabrication, distribuer les ordres de lancement et contrôler l'exécution des fabrications. Permet l'établissement d'un planning d'utilisation des ressources de l'atelier et d'obtenir ainsi des informations quant aux dates de livraison possibles. Mais cet ordonnancement s'avère peu réaliste car on essaie de gérer de façon déterministe un univers aléatoire et dynamique.

De nombreuses causes viennent perturber le planning initial :

L'arrivée de nouvelles commandes (ou de nouveaux OF), certaines peuvent être urgentes.

- Les temps inter-opérateurs peuvent varier suivant le type de fabrication, la charge de l'atelier.
- Les temps opératoires eux aussi sont des moyennes et peuvent varier par exemple en fonction de l'expérience de l'opérateur.
- Les pièces défectueuses retardent et perturbent la fabrication ainsi que :
 - les pannes de machines
 - l'absentéisme
 - les retards de livraison

Or le moindre retard sur une phase peut décaler l'ensemble des autres phases.

- **L'autre décentralisé**, qui consiste à gérer devant chaque poste de charge la file d'attente des ordres de fabrications en choisissant l'ordre de passage en fonction de règles de priorité locales.

L'ordonnancement décentralisé ne permet pas de faire de prévisions ni de planning car les décisions sont prises au pied de chaque machine.

Dès qu'une machine a terminé un lot l'opérateur choisit en fonction d'une règle de priorité définie à l'avance l'OF suivant.

L'application de cet ensemble de décisions locales est censée atteindre les objectifs globaux de l'atelier.

On peut distinguer deux types de règles de priorité, les règles locales qui ne concernent que les lots de la file d'attente devant la machine.

Par contre les règles globales prennent en compte les autres centres de charge de l'atelier.

II.2 Ordonnancement centralisé

L'ordonnancement centralisé implique une connaissance précise des gammes de fabrication ainsi que des temps opératoires.

Il consiste à établir un planning des travaux, c'est-à-dire à placer sur un diagramme (machines temps ou OF temps) les phases à réaliser sous formes de barres dont la longueur est proportionnelle au temps.

Ce planning est à court terme mais il reste néanmoins statique car entre deux planifications, il ne prend pas en compte l'arrivée d'une nouvelle commande ou d'un nouvel OF.

Le planning doit respecter plusieurs objectifs tels que respect des délais, diminution des stocks et en cours, utilisation au mieux des postes de travail et des ressources etc.

Deux démarches de planification se retrouvent dans la littérature, la première qui essaie d'optimiser la production en employant des algorithmes permettant de trouver la meilleure solution, la deuxième plus pragmatique qui ne cherche pas la meilleure solution mais une solution satisfaisante.

La première démarche se heurte à un nombre de combinaisons considérable.

En effet si l'on considère un seul centre de production avec n produits (P1, P2, P3, P4) en attente devant cette machine, le nombre de combinaisons possibles du passage de ces produits sur le centre est de $n!$ (*n factorielle*) :

P1, P2, P3, P4 ou P1, P2, P4, P3 ou P1, P3, P2, P4 ou P1, P3, P2, P4 ou P1, P3, P4, P2 etc.

Si l'on considère que ces n produits doivent passer sur c centres de production le nombre de combinaisons devient $(n!)^c$ en supposant qu'un produit ne passe qu'une seule fois sur une machine et que l'ordre de passage sur les centres de production est identique.

Elle ne peut satisfaire qu'un seul objectif par exemple minimiser le temps total de production mais ne prend pas en compte par exemple le fait qu'un produit a un délai de réalisation très court (commande urgente).

II.3 Formulation d'un problème d'ordonnancement

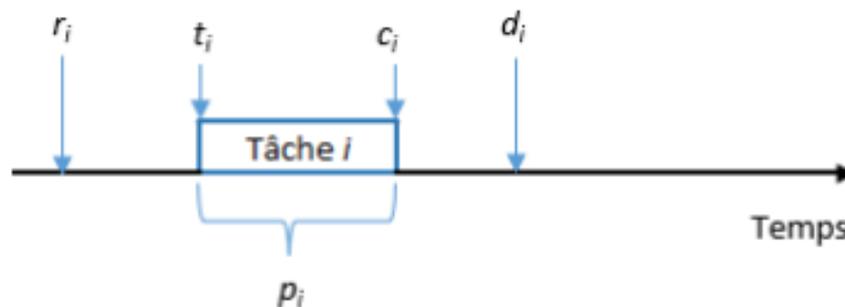
Dans un problème d'ordonnancement, quatre notions fondamentales interviennent : les tâches, les ressources, les contraintes et les objectifs. Dans ce qui suit, on donnera une définition détaillée de chacun de ces notions.

II.3.1 Les tâches

Une tâche est une entité élémentaire de travail localisé dans le temps par une date de début t_i (start time) et une date de fin c_i (completion time), dont la réalisation est caractérisée par une durée positive p_i (processing time) telle que $p_i = c_i - t_i$

Certaines caractéristiques relatives à l'exécution d'une tâche sont définies ainsi :

- Une date de disponibilité (release date) qui correspond à la date de début au plus tôt.
- Une date d'échéance (due date) qui correspond à la date de fin au plus tard.
- Un poids (weight) qui représente le facteur de priorité qui dénote l'importance de la tâche i relativement aux autres.



Caractéristique d'une tâche

On distingue deux types de tâches :

- Des tâches morcelables qui peuvent être exécutées par morceaux par une ou plusieurs ressources.
- Des tâches non-morcelables (indivisibles) qui doivent être exécutées en une seule fois et ne peuvent pas être interrompues avant qu'elles ne soient complètement achevées.

Remarque : Généralement, en ordonnancement d'atelier, le terme « tâche » correspond à une « opération » et le terme « travail » ou « job » désigne l'ensemble d'opérations constituant le même job.

II.3.2 Les ressources

1. Selon leurs disponibilités au cours du temps, on trouve :

- Les ressources renouvelables, comme c'est le cas pour les machines, personnels, équipements, etc. La ressource est dite renouvelable si après avoir été utilisée par une ou plusieurs opérations, elle est à nouveau disponible en même quantité.
- Les ressources non-renouvelables, souvent appelées ressources consommables ou bien ressources financières. On dit que la ressource est non-renouvelables si ça

ORDONNANCEMENT D'ATELIER

disponibilité décroît après avoir été allouée à une opération. C'est le cas pour la matière première, budget.

- Les ressources doublement contraintes, ces ressources combinent les contraintes liées aux deux catégories précédentes. Leur utilisation instantanées et leur consommation globale sont toutes les deux limitées. C'est le cas des ressources d'énergie (pétrole, électricité, etc.).

2. Selon leurs capacités, on trouve :

- Les ressources disjonctives (ou non-partageables), il s'agit des ressources qui ne peuvent exécuter qu'une seule opération à la fois c'est le cas par exemple de machine outil ou robot manipulateur.
- Les ressources cumulatives (ou partageables), il s'agit des ressources qui peuvent être utilisé par plusieurs opérations simultanément (équipes d'ouvriers, poste de travail, etc.).

II.3.3 Les contraintes

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre conjointement les variables de décision. En d'autres termes, les contraintes représentent les conditions à respecter lors de la construction de l'ordonnancement pour qu'il soit réalisable. Plus les contraintes sont nombreuses, plus le problème d'ordonnancement devient plus difficile.

Dans les problèmes d'ordonnancement, deux types de contraintes sont distingués : les contraintes temporelles et les contraintes de ressources.

1. Les contraintes temporelles décrivent les interdépendances temporelles entre les opérations, elles intègrent :

- Les contraintes de dates limites : c'est des contraintes imposées individuellement à chaque opération i . Par exemple, l'opération i ne peut débuter avant une certaine date (livraison de matière première, conditions climatiques, etc.) ou encore l'opération i ne peut commencer avant sa date de disponibilité r_i et doit être terminée avant une date d'échéance d_i .
- Les contraintes d'antériorité : c'est des contraintes qui relient la date de début ou la date de fin de deux opérations par une relation linéaire. De manière générale, c'est des

ORDONNANCEMENT D'ATELIER

contraintes qui décrivent le positionnement relatif de certaines opérations par rapport à d'autres, c'est le cas par exemple des gammes opératoires dans les d'ateliers de production.

2. Les contraintes de ressources traduisent l'utilisation et la disponibilité des ressources utilisées par les opérations. Deux types de contraintes liées à la nature cumulative ou disjonctive des ressources peuvent alors être distingués.

- Les contraintes disjonctives : ces contraintes imposent la non-réalisation simultanée de deux opérations sur la même ressource.
- Les contraintes cumulatives : ces contraintes expriment le fait qu'à tout instant, le total des ressources utilisées ne dépasse pas une certaine limite fixée.

II.3.4 Les objectifs

Les objectifs dits aussi les critères d'évaluation sont les indicateurs de performance sur lesquels se base le choix d'un ordonnancement satisfaisant. En ordonnancement, les critères à optimiser consistent à minimiser ou maximiser une fonction objectif. Cette fonction objectif est généralement liée aux temps, aux ressources ou bien aux coûts.

1. les objectifs liés au temps : c'est la catégorie des objectifs les plus étudiés en optimisation, parmi les plus classiques, nous pouvons citer :

- Le temps total d'exécution : connue sous le nom de makespan et défini par $C_{max} = \max_{i \in E} C_i$ (E désigne l'ensemble d'opération à ordonnancer) qui représente la date de fin du job le plus tardif. La minimisation de ce critère est souvent rencontrée puisque ça conduit à une meilleure utilisation de ressources (productivité).
- La somme des dates d'achèvement des jobs : on lui réfère aussi comme total flow time ou total completion time définie par $\sum_{i \in E} C_i$.
- Le retard algébrique maximal : connue sous le nom de lateness et défini par $L_{max} = \max_{i \in E} L_i$, tel que $L_i = C_i - d_i$ est le retard algébrique pour chaque opération. L'objectif de la minimisation du retard algébrique maximal consiste donc à minimiser la quantité L_{max} .

ORDONNANCEMENT D'ATELIER

2. Les objectifs liés aux ressources : les objectifs de ce type correspondent par exemple à :

- Maximisation de la charge d'une ressource e.g., maximiser l'utilisation de la machine ayant un bon rendement ou la machine la moins gourmand en énergie, etc.
- Minimisation de nombre de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble d'opérations.

3. Les objectifs liés au coût : ces objectifs consistent généralement à minimiser les coûts de lancement, de production, de stockage, ou de transport.

II.4 Typologie des problèmes d'ordonnancements

Une typologie des problèmes d'ordonnement dans un atelier peut s'opérer selon le nombre et la nature des machines ainsi que l'ordre d'enchaînement des opérations (gamme de fabrication).

Deux grandes familles de problèmes d'ordonnement se présentent. La première famille regroupe les problèmes pour lesquels chaque job nécessite une seule opération. La deuxième regroupe ceux dont les jobs nécessitent plusieurs opérations.

II.4.1 Problèmes à une opération :

En se basant sur la configuration des machines, nous distinguons pour la première catégorie :

- **Problèmes à une machine :** les problèmes d'atelier à une machine (single machine problem) consistent à ordonner, sur une seule machine, des jobs constitués d'une seule opération.
- **Problèmes à machines parallèles :** les problèmes d'atelier à machines parallèles (parallel machine problem) sont une généralisation des problèmes à une machine. Ce type d'atelier se caractérise par le fait que chaque opération peut être réalisée par n'importe quelle machine, disposée en parallèle, mais n'en nécessite qu'une seule. Le problème d'ordonnement consiste donc à déterminer l'affectation des opérations aux machines puis le séquençage de ces opérations sur chaque machine.

ORDONNANCEMENT D'ATELIER

Dans le dernier cas, il est possible de distinguer trois classes de machines :

- Machines parallèles identiques (identical parallel machines) : la durée d'exécution des opérations est la même sur toutes les machines.
- Machines parallèles uniformes (uniform parallel machines) : la durée d'exécution des opérations varie uniformément en fonction de la performance de la machine choisie.
- Machines parallèles indépendantes ou non liées (unrelated parallel machines) : les durées opératoires dépendent complètement des machines utilisées.

II.4.2 Problèmes à plus d'une opération

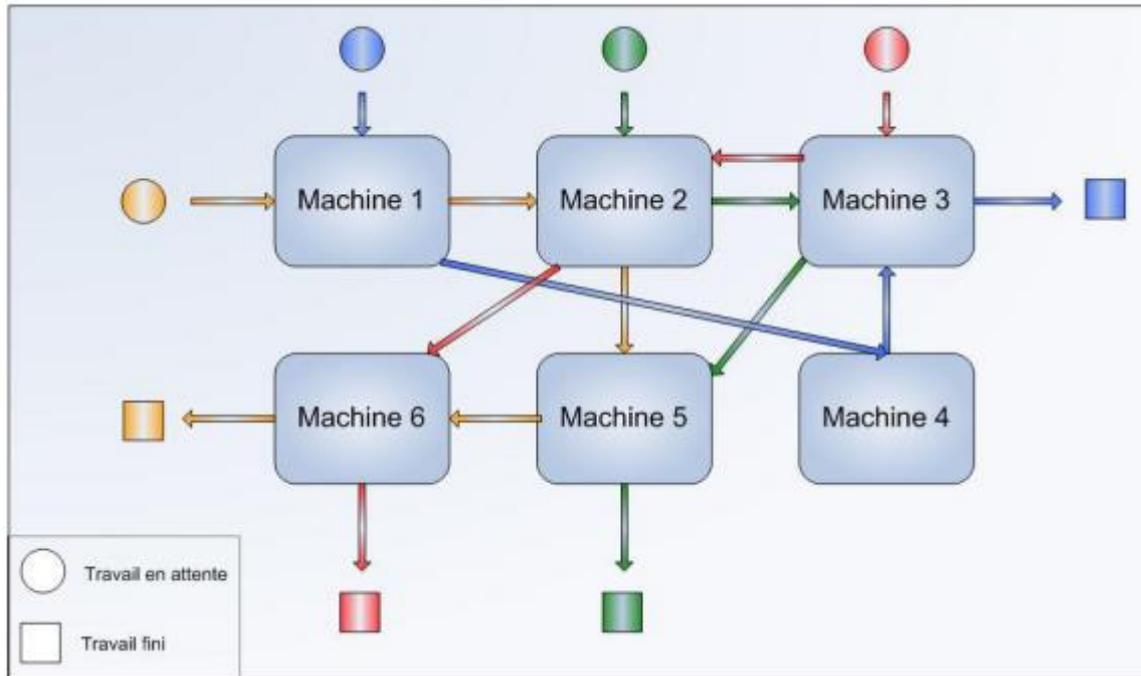
Les problèmes de la deuxième catégorie sont dits problèmes d'atelier du fait de la nécessité du passage de chaque job sur deux ou plusieurs machines dédiées. Suivant le mode de passage des opérations sur les différentes machines, trois types d'ateliers sont distingués à savoir :

- **Problèmes Flow-Shop** : les ateliers de type Flow-Shop appelés également ateliers à cheminement unique, il s'agit d'un ensemble de m machines disposées en séries. Toutes les opérations de tous les jobs passent par les machines dans le même ordre (flot unidirectionnel).
- **Problèmes Job-Shop** : dans cette classe d'ateliers, appelés aussi ateliers à cheminements multiples, chaque opération passe sur les machines dans un ordre fixé, mais à la différence du Flow-Shop, cet ordre peut être différent pour chaque job (flot multidirectionnel).
- **Problèmes Open-Shop** : dans cette classe d'ateliers, appelés aussi ateliers à cheminement libre, les gammes opératoires des différents jobs ne sont pas fixées a priori contrairement au problème d'atelier Job-Shop. Les opérations d'un même job peuvent donc être exécutées dans un ordre quelconque. Le problème consiste d'une part à déterminer le cheminement de chaque job et d'autre part à ordonnancer les jobs en tenant compte des gammes trouvées.

Exercice

À quel type d'atelier correspond cette figure ?

ORDONNANCEMENT D'ATELIER



- Flow Shop
- Job Shop
- Open Shop