

Gestion de la chaîne logistique

Ce chapitre offre une vue globale sur les principales caractéristiques de la gestion de la chaîne logistique. Les différents niveaux de décisions (stratégique, tactique et opérationnel) et les différentes étapes dans la planification de la chaîne logistique sont décrits. Une classification des systèmes de production est présentée, et une description plus détaillée sur la planification et l'ordonnancement de la production, qui font l'objet d'étude de cette thèse, est mise en avant.

[1.1 Introduction](#)

[1.2 Description de la chaîne logistique](#)

[1.3 Systèmes de production](#)

[1.4 Planification de la production](#)

[1.5 Ordonnancement de la production](#)

[1.6 Conclusion](#)

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons les principaux aspects de la gestion de la chaîne logistique, en mettant l'accent sur les étapes de planification et d'ordonnancement de la production. Dans la plupart des approches et des systèmes d'information pour la gestion de la chaîne logistique, les différentes étapes de planification sont étudiées de manière séparée. Le but de ce chapitre est d'expliquer, dans un premier temps, la structure décisionnelle de la chaîne logistique, à travers laquelle les différentes étapes sont liées, dans des échelles de temps différentes, par des flux d'informations et de matières.

La coordination des flux logistiques est primordiale pour assurer une gestion efficace de la chaîne d'approvisionnement globale. Cependant, il est souvent difficile de trouver un compromis entre tous les participants de la chaîne, de telle sorte que le bénéfice soit global et équitable, puisque chaque entité cherche à maximiser son propre bénéfice, sans tenir compte de la performance globale. Mais le challenge n'est pas seulement associé à la collaboration entre les différents participants de la chaîne logistique. Le problème dans la synchronisation de décisions est aussi présent au niveau interne. Pour améliorer la performance à moyen et long terme ou simplement, pour éviter la faillite, une entreprise doit tenir compte des contraintes internes et externes concernant les différentes étapes de planification de la chaîne logistique. Nous discutons plus en détail ces aspects dans la Section 1.2, où nous décrivons le rôle des participants, la structure décisionnelle, et les principales activités liant les flux de matières et d'informations.

Un facteur important à prendre en compte lorsque l'on analyse les possibles stratégies de gestion de la chaîne logistique est de connaître la nature du système. L'activité économique peut être transformatrice de produits ou de services, ou les deux. Nous nous focalisons dans ce travail sur les systèmes de production, et plus particulièrement sur les systèmes de production à flux discrets. Une classification des systèmes manufacturiers est présentée dans la Section 1.3.

De la même manière, parmi les activités impliquées dans la gestion de la chaîne logistique, nous nous intéressons particulièrement dans ce travail à la production. Donc, nous présentons en détail, dans les Sections 1.4 et 1.5, les étapes de management de la production, notamment la planification et l'ordonnancement. Nous expliquons les méthodes de gestion de la production couramment utilisées et leurs limitations. Finalement, dans la Section 1.6, nous présentons les conclusions de ce chapitre.

1.2 Description de la chaîne logistique

La chaîne logistique est un système intégrant un ensemble d'entreprises, de personnes, de machines, d'outils, de technologies, d'informations, etc., où le but est de satisfaire les demandes des clients finaux, à travers la transformation de matière, ayant pour point d'origine les fournisseurs de matières premières. Une chaîne logistique est composée principalement de fournisseurs, de fabricants, de distributeurs, de détaillants et de consommateurs.

Ces participants sont liés par des flux de matières et d'informations, comme illustré dans la Figure 1.1. Le flux d'informations démarre chez les clients avec les spécifications de la demande, qui est transmise aux détaillants (des commerçants de produits à l'unité, par petit volume). Étant donné que les détaillants ne sont pas des producteurs, ils ont besoin d'approvisionner périodiquement leurs stocks avec les produits demandés par les clients. Ce sont les distributeurs qui assurent cet approvisionnement, en suivant la demande transmise par les détaillants. De la même manière, les distributeurs envoient de l'information aux fabricants avec la demande de produits nécessaires pour approvisionner les détaillants. Finalement, compte tenu de la demande de produit fini réalisée par les distributeurs, les fabricants transmettent une demande de matière première et/ou en composants aux fournisseurs, afin de pouvoir fabriquer les produits.

Dans le sens inverse, le flux de matières démarre chez les fournisseurs. Ces matières sont transformées en produits finis par les fabricants et elles sont récupérées (souvent aussi stockées) par les distributeurs, qui les distribuent aux détaillants, pour être finalement achetées par les clients finaux. Le terme de *logistique interne* est souvent associé au management des flux entre les fournisseurs de matières premières ou composants et les fabricants; tandis que la gestion des flux à partir des fabricants jusqu'aux clients finaux est souvent appelée *logistique externe* [43].

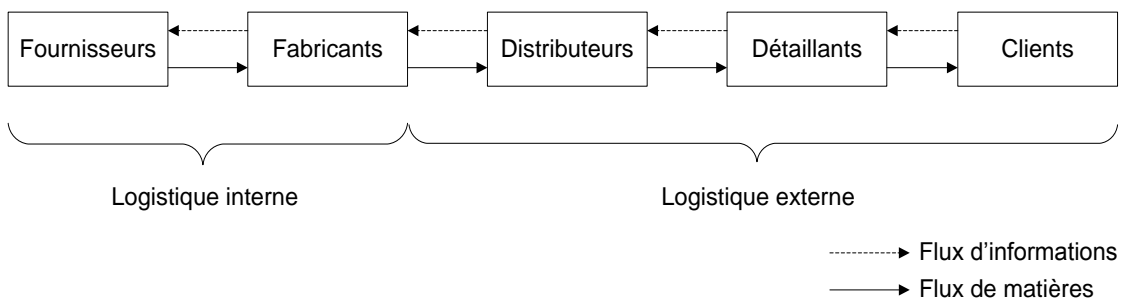


FIGURE 1.1 – La chaîne logistique [165]

Chaque groupe de participants du même maillon peut aussi constituer une chaîne logistique, faisant partie de la chaîne logistique globale. Ainsi par exemple, il peut y avoir plusieurs fabricants intégrant la même chaîne, où chaque usine produit des composants pour les autres usines et en même temps des produits pour les clients finaux. De manière similaire, les centres de distribution peuvent constituer un réseau, permettant la circulation et l'entreposage de produits entre eux, afin de réduire les coûts de transport et de stockage, ainsi que les délais de livraison.

En suivant le flux de matière, nous pouvons établir que chaque participant a des fournisseurs et des clients. Ainsi, les fournisseurs des distributeurs sont les fabricants, et ses clients sont les détaillants. En pratique, les entreprises ne suivent pas une stratégie de management globale de la chaîne d'approvisionnement, et considèrent seulement leurs fournisseurs et leurs clients directs pour gérer les opérations logistiques [57]. Ceci entraîne la perte d'information, circulant à partir des consommateurs finaux, et se traduit en une visibilité limitée du marché et des capacités de production, de stockage et de distribution des autres participants. Ceci peut faire varier les temps d'approvisionnement et peut engendrer des ruptures de stock (et potentiellement la perte de clients) ou un sur-stockage indésirable, incriminant les coûts de gestion. Ce phénomène de perturbation des décisions en management de la chaîne logistique et connu sous le nom d'« *Effet coup de fouet* » [145].

Une stratégie de management global de la chaîne logistique implique la planification synchronisée des activités liant les flux d'information et de matière sur un horizon à long terme. Les activités de planification d'une chaîne logistique sont organisées en pratique en trois niveaux de décisions, à savoir : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel [209].

1.2.1 Niveaux de décisions en la planification de la chaîne logistique

Le **niveau stratégique** comprend les décisions qui ont un impact sur le long terme (plusieurs années). Ces décisions sont prises au plus haut niveau de l'entreprise et contraignent toutes les activités de planification aux niveaux tactique et opérationnel. Les décisions stratégiques incluent : la conception du réseau logistique, la conception du produit et les offres commerciales et la planification des ventes. La conception du réseau logistique consiste à :

- Déterminer le nombre d'usines, leur localisation et leur taille.
- Déterminer le nombre d'entrepôts, leur localisation et leur taille.
- Déterminer la nature du système de production et le nombre et type de ressources nécessaires (opérateurs, machines, outils, etc.)
- Identifier et sélectionner les fournisseurs, les distributeurs, les grossistes, les détaillants et les autres participants de la chaîne logistique.

Le **niveau tactique** est basé sur un horizon à moyen terme, de l'ordre de quelques mois, et consiste à planifier les activités d'approvisionnement, de production, de distribution et des ventes, de façon à atteindre les objectifs fixés dans le plan stratégique. Il s'agit de définir les dates d'approvisionnement, les quantités et périodes de production et moyens de distribution, pour assurer la satisfaction de la demande dans les délais, à un coût minimal. Les activités tactiques sont contraintes par la capacité des ressources.

Le **niveau opérationnel** comprend les activités à court terme (de l'ordre de quelques jours ou semaines), i.e. les activités d'exécution. Ceci correspond à l'achat de matière première et des composants, à l'affectation de tâches de production (opérations) aux machines, à la détermination de tournées de transports et l'entreposage et à l'élaboration d'un plan détaillé de ventes.

Une limite importante en management de la chaîne logistique est que les différents niveaux de décisions sont le plus souvent traités de manière séparée et hiérarchique, où les objectifs du niveau supérieur deviennent des contraintes pour le niveau immédiatement inférieur. Les contraintes du niveau inférieur sont habituellement mal considérées dans le niveau supérieur, ce qui fait que les solutions prises au niveau supérieur ne sont pas forcément réalisables. Nous en discutons plus en détail, en mettant l'accent sur l'étape de production, dans la Section 1.4.

Il existe aujourd'hui des logiciels de planification qui offrent un bon degré de cohérence dans la synchronisation des flux logistiques. Ce sont les Systèmes de Planification Avancée (APS), dont nous discutons dans la Section 1.4.3. Bien que les niveaux de décisions continuent à être traités de manière hiérarchique, le partage d'information entre eux permet dans la plupart des cas l'obtention de solutions réalisables [51]. La qualité des décisions peut, néanmoins, être considérablement améliorée, en intégrant les niveaux de décisions.

1.2.2 Activités de la chaîne logistique

De manière transversale aux niveaux de décisions, les différentes activités de transformation des flux de matières et d'informations sont menées. Ces étapes font le lien entre les participants de la chaîne logistique et sont principalement : l'approvisionnement, la production, la distribution et les ventes [128]. L'**approvisionnement** est l'étape qui consiste à approvisionner de les matières premières nécessaires pour fabriquer les produits, selon les spécifications indiquées dans le plan de production. Il faut que l'approvisionnement permette de respecter les quantités et les périodes de production décidées. L'approvisionnement est donc l'étape faisant le lien entre les fournisseurs et les sites de production. Lorsque l'on définit le plan d'approvisionnement, on doit tenir compte de la capacité de production des fournisseurs et des délais d'obtention et de

livraison. Dans une chaîne logistique comptant plusieurs fournisseurs, les facteurs différenciateurs au moment de choisir le fournisseur d'un produit i à un instant t sont le prix de vente et les délais de production et de livraison, sans oublier la qualité des matières premières (et/ou composants) qui peut varier d'un fournisseur à un autre.

La **production** est l'étape qui consiste en la fabrication de produit fini, à travers la transformation de la matière première issue de l'approvisionnement. Cette transformation peut être faite en une ou plusieurs opérations, et chaque opération implique la création de valeur ajoutée. Les produits finis doivent satisfaire les besoins des clients, à savoir : fonctionnalité, qualité et délais d'obtention. Les décisions à prendre dans cette étape sont : combien, quand et comment produire. Ces décisions ont pour but de satisfaire pleinement la demande client au moindre coût. Nous discutons ces facteurs qui ont une incidence sur les politiques de production dans la Section 1.3.

La **distribution** est l'activité permettant de mettre à disposition des consommateurs les produits élaborés par les fabricants. Elle est le lien entre les producteurs et les détaillants. Un distributeur doit récupérer, transporter, stocker et répartir, les produits fournis par les fabricants. À la fin, les produits doivent être à disposition des détaillants, en respectant les délais de livraison. L'objectif est de livrer tous les détaillants dans les délais, au moindre coût possible, en utilisant au mieux des ressources (véhicules) limitées. Le problème de distribution implique en particulier l'affectation des produits aux véhicules et la sélection des tournées, avec l'objectif de minimiser le nombre de véhicules et/ou de minimiser la distance parcourue.

Finalement, les **ventes** représentent l'étape où les produits sont acquis par les clients finaux. Ceci correspond donc au flux de matière entre les détaillants et les consommateurs. L'objectif est de satisfaire la demande au moindre coût. À ce stade, les coûts sont associés au management des stocks. Il s'agit donc de minimiser la somme des coûts de stockage et de rupture de stock. Dans certains secteurs économiques, comme l'alimentaire, il faut tenir compte de la péremption des produits et gérer les stocks de façon à réduire le nombre de produits avec date de péremption dépassée.

Pour plus de détails sur le management de la chaîne logistique, le lecteur peut consulter [210].

1.3 Systèmes de production

Un système de production est une organisation de personnes, machines, outils et d'autres composants, qui servent à transformer des matières premières en produits finis, destinés à la

consommation de clients finaux. La transformation d'un produit peut nécessiter une ou plusieurs opérations à réaliser sur une ou plusieurs machines ou stations de travail.

Si les produits finis sont fabriqués juste à partir de matières premières, mais ne requièrent pas l'assemblage ou l'intégration de composants, il s'agit d'un **système mono-niveau**. Si la fabrication des produits finis requiert l'inclusion d'autres produits (composants), le processus correspond à un **système multi-niveaux**. La différence entre ces deux types de systèmes est que dans le cas multi-niveaux, il existe une nomenclature ou *liste BOM* (Bill Of Materials) qui définit les besoins de production ou demandes internes, entre tous les produits (composants et produits finis) faisant partie du processus de fabrication ; tandis que dans les systèmes mono-niveau, chaque produit a une demande externe, mais il n'y a pas de demandes internes entre les produits. Le nombre de niveaux fait référence au plus grand nombre de liens de dépendance entre un composant basique (produit sans composants) et un produit fini, en passant par tous les composants intermédiaires. Un exemple de *nomenclature à plusieurs niveaux* est présenté dans la Figure 1.2. Dans les systèmes mono-niveau, on parle souvent de *nomenclature à un niveau*.

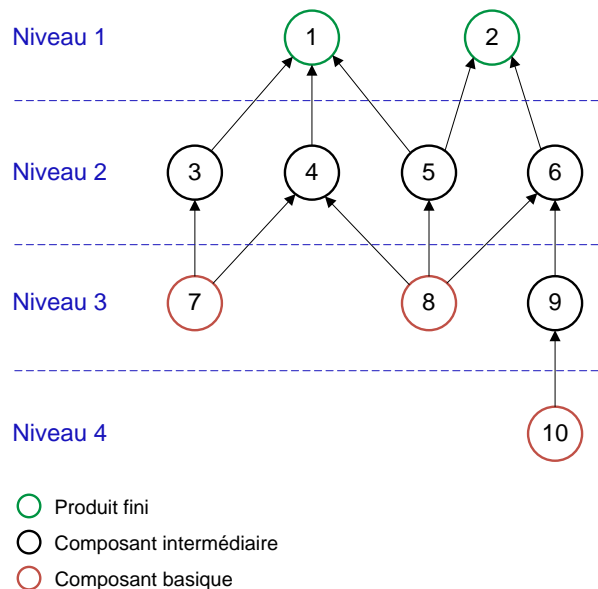


FIGURE 1.2 – Exemple de nomenclature à plusieurs niveaux

Dans la gestion d'un système de production, le but est de satisfaire la demande client au moindre coût possible. Pour ce faire, plusieurs politiques de production peuvent être implémentées, à savoir : la production à la demande, la production sur stock, l'assemblage à la demande et la conception à la demande [118].

La **production à la demande** consiste à ne déclencher la fabrication d'un article que lorsque la demande client est confirmée, ce qui permet de réduire les inventaires de produits semi-finis et de produits finis. Cette politique permet donc de diminuer les coûts de stockage. Pour plus de détails sur ce mode de production, le lecteur peut consulter [138].

La **production sur stock** est basée sur les prévisions de la demande, et consiste à démarrer le processus de fabrication avant d'avoir une demande confirmée. Ceci permet de réduire les délais de livraison (intervalle de temps entre la commande client et la livraison du produit) et les coûts de production.

L'**assemblage à la demande** consiste à construire un stock de produits semi-finis, en attendant l'arrivée de la demande. Une fois que la demande est confirmée, les produits sont assemblés et livrés aux consommateurs. C'est donc une stratégie qui combine les deux politiques précédentes : production sur stock pour obtenir des produits semi-finis et production à la demande pour réaliser l'assemblage final.

Dans la **conception à la demande**, une fois que la demande arrive, l'entreprise et le client conçoivent ensemble le produit, ce qui fait que chaque article fabriqué est unique. Une fois le produit conçu, la matière première est commandée, et une fois l'approvisionnement réalisé, la production et la distribution sont successivement enchaînées. À travers cette politique, il n'y a pas d'inventaires, mais il est difficile d'estimer les temps de production et les besoins en ressources. Par conséquent, il est compliqué de maîtriser la capacité du système et de respecter les délais d'obtention. Le système adoptant cette stratégie doit être flexible.

Dans un système de production, plusieurs politiques de production peuvent être implémentées. Cela dépend de la nature des produits, des contraintes du système de production, du comportement de la demande, des coûts de production et de stockage et des durées opératoires. Ainsi, dans un même atelier, certains produits peuvent suivre une politique de production sur stock, d'autres une production à la demande, et d'autres une combinaison de plusieurs politiques [118].

En gestion de stocks, il est commun d'utiliser les termes *flux poussé* et *flux tiré*, pour faire référence à la circulation de matières (en tant que matières premières, produits semi-finis et produits finis) dans les modes de production sur stock et de production à la demande, respectivement. Ainsi, dans un système à flux poussé, la matière est « poussée » tout au long du processus de fabrication étape par étape (une fois qu'une opération est terminée, l'opération suivante est déclenchée). D'autre part, dans un système à flux tiré, la demande client génère un besoin de produit fini, qui à la fois génère une demande de composants (chaque composant pouvant demander aussi d'autres composants), pour au final générer une demande de matière

première. Une fois que la demande de matière première arrive chez le fournisseur, le flux de matières est déclenché.

Un autre terme utilisé, lié au type de production *juste à temps* [118], est celui de *flux tendu*, qui consiste à générer le minimum de stock possible dans toutes les étapes de production. Il correspond souvent à un système suivant un flux tiré avec des lignes de production équilibrées.

Les systèmes de production sont classés en deux grands groupes : les systèmes à flux continus et les systèmes à flux discrets ou intermittents [171], comme détaillé sur la Figure 1.3.

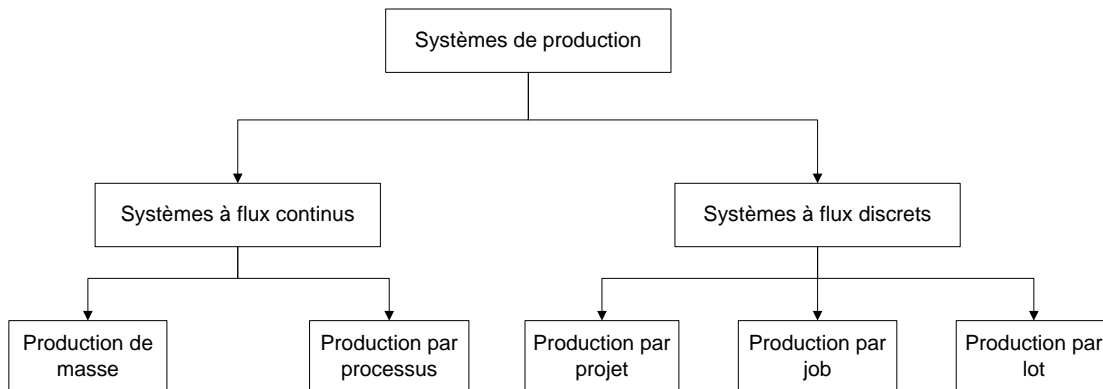


FIGURE 1.3 – Types de systèmes de production [178]

1.3.1 Systèmes à flux continus

Dans les systèmes de production à flux continus, les produits sont standardisés et circulent sans interruption tout au long de la ligne de production, le volume de production est normalement élevé, le taux de production est ajusté selon la prévision de la demande et le séquençement et l'ordonnancement sont standardisés (inchangéables). Les produits finis sont stockés dans des entrepôts, en attendant l'arrivée progressive de la demande. La politique de production suivie est celle de *production sur stock*.

Les systèmes à flux continus peuvent être classés en : *systèmes de production de masse* et *systèmes de production par processus*.

1.3.1.1 Production de masse

La production de masse est caractérisée par un gros volume de production, où des produits standard passent par différentes étapes ou opérations de manière continue. L'ordre de passage des produits sur les stations de travail est toujours le même et il n'y a quasiment pas

de temps d'attente, ce qui fait que l'inventaire de produits semi-finis est faible. Ce système est généralement composé des lignes d'assemblage et il est dans la plupart des cas complètement automatisé. Seules des opérations mineures sont effectuées par des opérateurs. Parmi les systèmes de production de masse, nous trouvons l'assemblage final d'automobiles, la production d'aliments et de boissons, d'essence, de médicaments et d'autres produits chimiques, etc.

1.3.1.2 Production par processus

La production par processus implique la transformation de composants en produits finis, à travers des réactions et des traitements irréversibles, qui suivent des recettes ou des formules spécifiques. En tenant compte que le système est dédié à la fabrication d'un produit en particulier, l'affectation des opérations aux ressources est fixe et le système reste très peu flexible. L'inventaire de produits semi-finis est presque inexistant (contrairement à celui de produits finis) et il y a très peu d'intervention humaine (les ressources sont majoritairement des machines). C'est particulièrement le cas de l'industrie pharmaceutique, de l'industrie du papier, de l'élaboration de boissons, de la fonderie, du raffinage du pétrole, de la production de gaz naturel, des centrales électriques, de la production de fibres synthétiques, etc.

1.3.2 Systèmes à flux discrets

Les systèmes de production à flux discrets sont caractérisés par un flux de matières interrompu à volume moyen ou faible, où les produits sont différenciables. L'affectation des produits aux ressources varie selon les spécifications des produits (demande client) et selon la disponibilité des ressources (temps de production différents). Ils peuvent être classés en : *production par projet*, *production par job* et *production par lot*.

1.3.2.1 Production par projet

Le mode de production par projet est caractérisé par un flux à bas volume et un système flexible. La demande est imprévisible et les spécifications demandées sont rarement répétitives, ce qui fait que les produits sont uniques. Normalement, dans le processus de fabrication, le produit reste dans un seul endroit, et ce sont les ressources qui se déplacent. Une fois que le produit est terminé, les ressources sont démontées, vu que la probabilité d'utiliser les mêmes ressources et dans la même disposition est presque nulle. La gestion de délais est une problématique majeure dans ces systèmes, surtout lorsque plusieurs projets sont abordés en même temps. La politique de production suivie est celle de *conception à la demande*.

Les systèmes de production par projet sont particulièrement présents dans le domaine de la construction. À titre d'exemple, nous pouvons mentionner la construction de bâtiments, de ponts et de navires.

1.3.2.2 Production par job

La production par job est caractérisée par un volume limité de production (à l'unité ou par lots de petite taille). Les produits sont fabriqués selon les spécifications du client, donc la production n'est pas standard mais le système est normalement flexible (l'organisation de l'atelier peut être adaptée pour traiter des commandes client différentes). Une seule commande est traitée à la fois, l'inventaire de produits semi-finis est important et les coûts de production sont élevés. Par contre, les ressources sont flexibles. La politique de production peut être *conception à la demande* ou *production à la demande*.

Ce type de production est présente dans les processus de confection, de réparation des équipements, de peinture et décoration, etc.

1.3.2.3 Production par lot

La production par lot est le processus où des produits similaires sont fabriqués par groupes, et pas unitairement. Les produits d'un lot suivent ensemble le processus de fabrication étape par étape. Ce mode de production permet de réduire les coûts unitaires et d'augmenter les niveaux de productivité. Cependant, les temps de lancement de la production entre lots peuvent être importants, et il faut gérer des niveaux non-négligeables d'inventaire de matières premières et de produits semi-finis. Plusieurs politiques de production peuvent être combinées, à savoir : la production sur stock, l'assemblage à la demande et la production à la demande. Le choix dépend de la variabilité de la demande. Si la demande est connue à l'avance, une production à la demande sera la stratégie à suivre. Si la demande est incertaine, il faudra construire du stock, soit de matières premières (et/ou des composants) avec une politique d'assemblage à la demande, soit de produits finis avec une politique de production sur stock.

La production par lot amène à un problème de dimensionnement de lots, qui consiste à choisir la taille des lots de produits dans chaque période de l'horizon de planification (plusieurs jours, semaines ou mois), pour satisfaire la demande client. Dans un tel problème, l'objectif est de minimiser la somme des coûts de fabrication, de stockage et de lancement de la production, entre autres. La fonction objectif peut être réduite à la somme des coûts de lancement de la production et de stockage si le coût de fabrication est considéré constant quand toute la demande est satisfaite, sans rupture de stock.

La production par lot est largement utilisée dans des secteurs économiques divers. À titre d'exemple, nous pouvons citer la production de pain, de médicaments, de peintures, d'appareils électroniques, de fourniture, etc.

Dans ce travail, nous nous intéressons aux systèmes à flux discrets, et plus spécifiquement, à la production par lot.

1.4 Planification de la production

Selon le schéma décisionnel de la planification de la chaîne logistique, le management de la production est organisé en pratique en trois niveaux de décision : stratégique, tactique et opérationnel. Le terme de *planification de la production* fait référence aux décisions prises au niveau tactique. L'objectif est de :

- déterminer les périodes de production (*quand produire ?*)
- déterminer les quantités de production (*combien produire ?*)

Ces décisions correspondent à gérer le flux de production et les inventaires. Elles sont soumises à plusieurs contraintes, comme : la capacité de production, la satisfaction de la demande, les périodes de maintenance, la capacité de stockage, les contraintes de calendrier, les quantités de production maximale et minimale, la nomenclature, etc.

Selon le type de système de production (continu ou discret), des stratégies et des modèles mathématiques différents peuvent être adoptés afin d'optimiser le plan de production, où le but est de minimiser la somme de tous les coûts liés à la production, à savoir : coûts de stockage et de rupture de stock, coûts de fabrication, coûts de lancement (setup) de la production, coûts de maintenance, coûts de main d'œuvre additionnelle, etc.

Au niveau opérationnel, l'objectif est d'ordonnancer la production, de façon à ce que le plan de production (délais et quantités) déterminé au niveau tactique soit respecté. L'allocation de ressources pour chaque ordre de fabrication doit être décidée, avec le but de non seulement garantir un plan de production réalisable, en respectant toutes les contraintes, mais aussi de fournir la meilleure solution possible. C'est-à-dire que les décisions opérationnelles doivent permettre de réaliser la meilleure allocation de ressources possible (séquencement) et de fixer les meilleures dates de début et de fin des ordres de fabrication (ordonnancement). Selon la stratégie adoptée dans la gestion de production, ou selon le comportement du système, des critères différents d'optimisation peuvent être considérés. Nous discutons plus en détail de l'ordonnancement de la production dans la Section 1.5.

Le défi le plus important en planification de production est la gestion de la capacité. La planification tactique idéale doit tenir complètement compte des contraintes de capacité du niveau opérationnel, c'est-à-dire, des contraintes détaillées concernant l'ordonnancement. Néanmoins, cette information est difficile à intégrer et peut requérir des capacités de calcul (du point de vue informatique) importantes. Dans les dernières décennies, des solutions logicielles ont été conçues pour faciliter la planification de la production, mais les stratégies adoptées ne mènent pas, dans beaucoup de cas, vers des plans de production réalisables au niveau opérationnel.

1.4.1 Progiciels de Gestion Intégrée (ERP)

Les progiciels de gestion intégrée (Enterprise Resource Planning ou ERP) [148] sont des outils informatiques qui permettent de prendre des décisions de différente nature, concernant les différents départements ou fonctions de l'entreprise. Les fonctions qui sont normalement considérées par les ERP sont :

- Gestion des ressources financières (Financial Resource Management ou FRM)
- Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management ou SCM)
- Gestion des ressources humaines (Human Resource Management ou HRM)
- Gestion de la relation client (Customer Relationship Management ou CRM)
- Planification des ressources de production (Manufacturing Resource Planning ou MRP-II)

Le concept d'ERP a été créé en 1995, avec pour but de coordonner les différentes fonctions de l'entreprise avec la production comme activité principale. Il est le résultat de l'évolution des systèmes de gestion de production, qui ont commencé avec l'approche de *calcul des besoins nets* (ou planification des besoins en composants) [188] en 1965. Cette méthode, connue par le sigle MRP, permettait juste de calculer les quantités de production de tous les composants des produits finis, en suivant la structure de la nomenclature, sans tenir compte de la capacité. Vu la difficulté pour déterminer des plans de production réalisables au niveau opérationnel, la méthode de *planification des ressources de production* (MRP-II) [204] a été créée en 1979. MRP-II incorpore MRP en tant que module de planification à moyen terme, et considère la capacité dans le processus de planification, à travers différentes étapes avec différents niveaux d'agrégation de l'information.

C'est justement le fait d'agréger la capacité qui génère des problèmes pour calculer des plans de production cohérents. La phase critique est le lien entre la planification et l'ordonnancement de la production, deux des étapes les plus importantes en management de la chaîne logistique. En effet, les ERP ne garantissent pas, à notre connaissance, une cohérence entre les décisions tactiques et opérationnelles. Le problème principal, associé à l'approche de **Calcul des besoins**

nets (Material Requirements Planning ou MRP), est que la planification et l'ordonnancement sont réalisés de manière séparée et séquentielle, en suivant la structure hiérarchique des niveaux décisionnels. Dans ce contexte, les décisions tactiques (tailles de lots et périodes de production) sont considérées comme données d'entrée ou des contraintes pour le problème d'ordonnancement. Dans certains cas, les plans de production proposés au niveau tactique, sans tenir compte des contraintes d'ordonnancement, ne peuvent pas être respectés au niveau opérationnel (ils sont infaisables). De plus, dans l'approche MRP, la capacité est considérée infinie quand les tailles de lots sont déterminées, ce qui fait qu'un plan de production ne peut être mis en œuvre qu'à condition de réaliser plusieurs changements au niveau opérationnel. Ces modifications sont liées à l'utilisation d'heures de travail supplémentaires, de la sous-traitance, ou simplement au fait de décider de ne pas satisfaire certaines demandes ou de les satisfaire avec du retard. Dans tous les cas, ces décisions entraînent des coûts additionnels qui peuvent être très importants.

Cette incohérence dans la gestion de la capacité est bien connue depuis plusieurs décennies, et le problème a été pris en compte dans l'approche MRP-II. Cependant, la planification et l'ordonnancement se font toujours d'une manière séparée. Pour cette raison, les contraintes de capacité, détaillées au niveau opérationnel, deviennent agrégées au niveau tactique. L'objectif de MRP-II est de déterminer des solutions réalisables, sans chercher à optimiser le plan. Lorsqu'un plan de production réalisable n'est pas obtenu au niveau tactique (après la phase de MRP), des modifications sont réalisées sur le plan MRP ou sur le **plan directeur de production** (Master Production Schedule ou MPS) [118]. Souvent, la méthode MRP-II n'est pas capable de fournir des solutions réalisables. Une stratégie utilisée pour éviter des plans infaisables, consiste à surestimer la capacité. Cependant, le plan de production proposé n'est pas approprié dans la plupart des cas, car la production peut finir avant la date planifiée, générant ainsi des inventaires de produit semi-fini additionnels, ce qui représente des coûts supplémentaires. Les étapes de planification de la méthode MRP-II sont détaillées dans la Section 1.4.2.

Pour garantir la cohérence entre les décisions de planification et d'ordonnancement dans les systèmes de production complexes, des contraintes d'ordonnancement détaillées doivent être considérées dans les modèles mathématiques de dimensionnement de lots [144, 47]. Ouenniche *et al.* [174] et Dauzère-pères et Lasserre [48] ont étudié l'impact des décisions de séquençement sur la planification de la production. Une description sur les méthodes d'optimisation discrète pour l'intégration de la planification et de l'ordonnancement de la production peut être consultée dans [95].

Une approche récente pour gérer de manière efficace la capacité est le concept de **Système de Planification Avancée** (Advanced Planning and Scheduling ou APS), dont l'objectif est de déterminer des solutions optimales, en considérant non seulement les décisions concernant la

production, mais aussi l'approvisionnement, la distribution et les ventes [72]. Les systèmes APS sont intégrés dans les systèmes ERP, avec pour but d'optimiser la chaîne logistique globalement. Néanmoins, les différentes activités de la chaîne logistique sont affectées à des modules différents, et la résolution se fait donc de manière hiérarchique. L'avantage par rapport à MRP-II est la facilité offerte pour échanger les flux d'informations entre les différents modules, qui permet de favoriser l'obtention des solutions réalisables, sans toutefois le garantir. Une opportunité d'amélioration importante dans les APS est au niveau des formulations mathématiques, sur lesquelles la communauté scientifique focalise actuellement les travaux de recherche. Parfois, les modèles mathématiques utilisés pour planifier la chaîne logistique considèrent des contraintes qui ne permettent pas d'utiliser la capacité de façon optimale, ou ils ne sont pas adaptés à des problèmes spécifiques, et parfois la capacité de calcul des ordinateurs est insuffisante. En plus, les solveurs commerciaux ne sont pas souvent capables de résoudre des problèmes de grande taille combinant des variables continues et discrètes. Nous discutons plus en détail l'approche APS dans la Section 1.4.3.

1.4.2 Planification des ressources de production (MRP-II)

La première étape en planification de la chaîne logistique consiste à établir un **plan stratégique** pour le long terme (sur plusieurs années). Dans ce plan, les directives principales concernant l'évolution de l'activité économique de la chaîne sont considérées. Les décisions concernées ont un rapport avec la conception de la chaîne, le positionnement sur le marché et les politiques internes. À partir du plan stratégique, des objectifs sont fixés pour gérer la planification de la production et de la capacité.

L'apport de la méthode MRP-II est le fait d'intégrer la capacité dans le processus de décisions pour construire le plan de production, comme illustré sur la Figure 1.4.

MRP-II démarre avec la planification de la demande, qui consiste à définir les commandes clients fixes à satisfaire tout au long de l'horizon de planification, ainsi que les demandes prévues, selon des méthodes de prévision. À partir de cette planification, la prochaine étape consiste à élaborer le plan industriel et commercial (Sales and Operations Planning ou S&OP), en prenant en compte une vision agrégée de la capacité, où la consommation de ressources de production est estimée de manière globale. Ce plan doit satisfaire les objectifs du plan stratégique et la demande planifiée. L'étape suivante consiste à créer un plan directeur de production (MPS), en tenant compte de la capacité sommaire planifiée, qui correspond également à une capacité agrégée. Il sert à planifier la production des produits finis. Ensuite, le calcul des besoins nets (MRP) est réalisé à moyen terme, compte tenu d'une vue détaillée de la capacité, à travers une

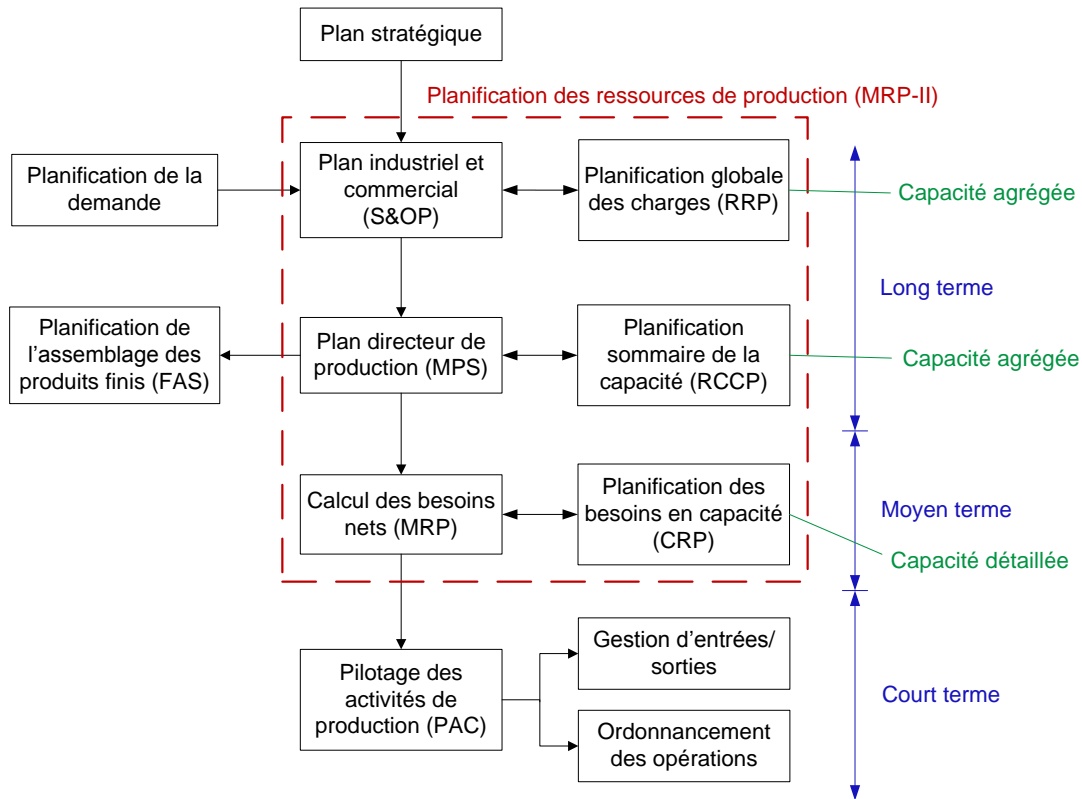


FIGURE 1.4 – Planification de la production et de la capacité avec MRP-II

planification des besoins en capacité (CRP). L'étape suivante, à court terme, est le pilotage des activités de production (PAC), où l'ordonnancement est effectué. Si aucun ordonnancement ne permet de respecter les délais (plan de production non réalisable), on retourne vers l'étape de MRP, pour proposer un nouveau plan, et ensuite on exécute à nouveau le module PAC. Ces deux étapes sont exécutées de façon itérative jusqu'à ce que le plan de production et d'approvisionnement soit réalisable au niveau ordonnancement.

Dans ce qui suit, nous décrivons brièvement les étapes de planification de la production et de la capacité à travers MRP-II. Pour des plus amples détails, le lecteur peut consulter [118] et [141].

1.4.2.1 Planification de la production

– Plan industriel et commercial

Son but est d'associer les décisions commerciales à la capacité de production globale, de façon à définir des objectifs de production par famille de produits, permettant de maximiser le profit. Les décisions commerciales consistent à planifier la demande sur le long terme et par périodes, en se basant sur des méthodes de prévisions. Les demandes deviennent des contraintes pour le S&OP, qui doit garantir leur satisfaction, tout en respectant la charge globale (capacité) estimée. Les données de sortie du S&OP correspondent à des quantités de production par période, par famille de produit.

– Plan directeur de production

Il a pour but de définir les objectifs de production de tous les produits finis (tailles de lots et périodes de production), ou d'un ensemble de configurations possibles de produits finis, dans le cas des environnements de production de type *assemblage à la demande*, tout au long d'un horizon de planification à long ou à moyen terme. Les objectifs fixés dans le S&OP sont considérés comme des contraintes, c'est-à-dire qu'il faut respecter les projections de ventes et les ordres de production prévus. Le MPS prend en considération une estimation agrégée de la capacité disponible, à travers une *planification sommaire de la capacité* (RCCP), et permet d'assurer le lien entre la demande du marché et la capacité d'approvisionnement des sites de production.

– Calcul des besoins nets

C'est une procédure qui consiste à planifier les quantités de production de tous les produits composants de la nomenclature, de manière à satisfaire les besoins des produits finis. Chaque produit est planifié de façon indépendante dans un ordre hiérarchique, en commençant par les produits les plus agrégés. L'objectif est de : (i) garantir la disponibilité de composants et de matière première pour réaliser la production, (ii) garantir la disponibilité de produits finis pour satisfaire la demande client, (iii) maintenir un niveau d'inventaire le plus petit possible et, (iv) planifier les ordres de fabrication, les dates de livraison et les dates de réapprovisionnement.

La procédure MRP peut être résumée à travers les deux étapes suivantes. À noter que l'étape 2 est réalisée systématiquement et hiérarchiquement jusqu'à planifier tous les produits de la nomenclature.

1. Les tailles de lots des produits les plus agrégés sont déterminées sans tenir compte de la capacité.
2. Les tailles de lots des prédécesseurs directs sont déterminées, en tenant compte des délais d'approvisionnement et en respectant les besoins internes (en matière) des successeurs directs.

La planification est donc effectuée niveau par niveau, en commençant par les produits finis. Les contraintes de nomenclatures sont respectées, mais il n'y a pas de garantie que le plan de production soit optimal, puisque les tailles de lots des produits les plus agrégés contraignent la planification des autres produits. Ceci est un inconvénient du point de vue de la qualité de la solution, mais l'inconvénient majeur est la non-prise en compte des contraintes de capacité, ce qui entraîne, la plupart du temps, la modification du plan de production au niveau opérationnel, au moment où les décisions d'ordonnancement sont prises. Ce manque d'information fait que MRP ne convient pas à des systèmes de production complexes, comme les job-shops et les flow-shops.

1.4.2.2 Planification de la capacité

– Planification globale des charges (Resource Requirements Planning ou RRP)

C'est une procédure qui consiste à mesurer la capacité globale du système de production, en termes de main d'œuvre, de machines et d'autres ressources, pour respecter le plan industriel et commercial (S&OP). Si d'après cette mesure de la capacité, le S&OP est réalisable, la prochaine étape est l'élaboration du plan directeur de production (MPS). Dans le cas contraire, si les ressources sont insuffisantes, deux alternatives sont possibles :

1. Augmenter la capacité de production, en développant l'infrastructure, en achetant des nouvelles machines, en augmentant le nombre de postes de travail, en contractant de la main d'œuvre externe, etc.
2. Modifier le S&OP. Cette mesure est adoptée lorsque le retour sur investissement de l'augmentation de la capacité est jugé inintéressant à long terme.

– **Planification sommaire de la capacité (Rough-Cut Capacity Planning ou RCCP)**

C'est une étape de validation des ressources nécessaires pour suivre le MPS. Un calcul de la capacité globale nécessaire pour fabriquer tous les produits finis, dans les périodes établies par le MPS, est réalisé, en tenant compte des ressources disponibles. S'il s'avère que le MPS est réalisable avec les ressources existantes, aucune mesure additionnelle n'est adoptée, donnant suite ainsi au calcul des besoins nets (MRP) à court terme. Par contre, si la capacité est insuffisante, les stratégies suivantes sont considérées :

1. Modifier le MPS, de façon à ce que la capacité soit satisfaite.
2. S'il n'est pas possible de modifier le MPS, en respectant les contraintes du S&OP, remonter d'un niveau dans la structure décisionnelle pour modifier le S&OP, et recalculer ensuite le MPS.

Il existe trois méthodes pour planifier la capacité à ce stade : la méthode des facteurs globaux, la méthode de macro-gammes et la méthode des profils des ressources. Le choix de la méthode dépend de la précision désirée (le niveau de détail ou de désagrégation de la capacité).

– **Planification des besoins en capacité (Capacity Requirements Planning ou CRP)**

Elle consiste à déterminer tous les besoins en main d'œuvre, en machines et en matière (y compris les produits composants), ainsi que les délais d'approvisionnement, de façon à satisfaire le plan de production issu du MRP (toutes les tailles de lots sont considérées). La capacité calculée est donc plus détaillée que celle définie dans les étapes de RRP et RCCP. S'il est impossible de respecter la capacité avec le plan de production courant, les mesures suivantes sont adoptées :

1. Modifier le plan de production des produits composants (au niveau du MRP).
2. Si la modification du MRP n'entraîne pas le respect de la capacité, remonter d'un niveau et modifier le MPS.

3. S'il est encore impossible de satisfaire la capacité, modifier le S&OP ou investir en une augmentation de la capacité.

La méthode CRP requiert comme données d'entrée : la nomenclature, les gammes de fabrication, les temps opératoires standard, les délais d'approvisionnement et les ordres de production du MRP (tailles de lots de tous les produits de la nomenclature sur toutes les périodes de l'horizon de planification). Le calcul de la capacité est beaucoup plus précis que dans les méthodes associées à RCCP, mais l'effort de calcul est plus important.

1.4.3 Systèmes de planification avancée (APS)

Les APS ont pour mission de déterminer la solution optimale concernant la planification globale de la chaîne logistique. Non seulement les décisions de production (planification et ordonnancement) sont considérées, mais aussi l'approvisionnement, la distribution et les ventes. Le problème global est décomposé en différents modules de planification, avec des interactions de flux verticaux (liant les niveaux stratégique, tactique et opérationnel) et horizontaux (liant les différentes activités de planification). Une vision globale des interactions des modules de planification de la chaîne logistique dans un APS est illustrée sur la Figure 1.5.

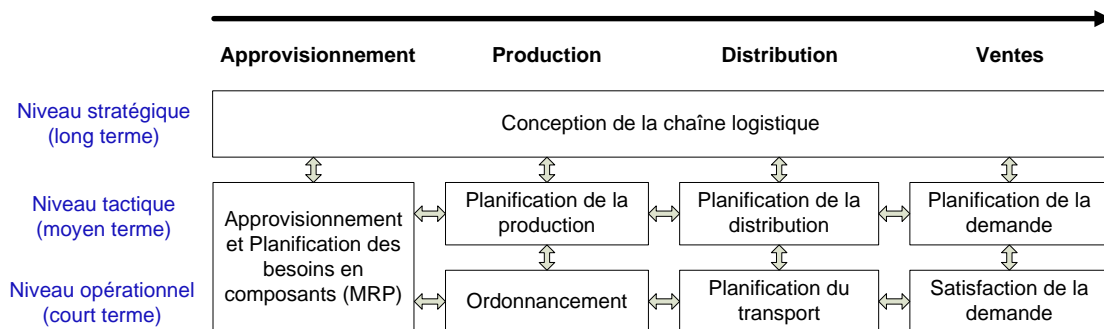


FIGURE 1.5 – Matrice de planification de la chaîne logistique [72]

Contrairement aux ERP classiques utilisant la méthode MRP-II, qui suit une logique de construction de solution manuelle, l'approche APS modélise chaque étape de planification (approvisionnement, production, distribution et satisfaction de la demande) comme un programme linéaire en nombres entiers ou mixte [185], et elle utilise différentes méthodes de *recherche opérationnelle* pour résoudre ces modèles mathématiques, le but étant d'obtenir une solution optimale [72]. Pour assurer la cohérence des décisions et éviter les problèmes de MRP-II, chaque

modèle mathématique inclut des contraintes liées aux problèmes adjacents (problèmes ayant une influence directe sur le flux de matière ou d'information). Ainsi, par exemple, le problème d'ordonnancement tient compte des contraintes issues de la planification de la production (taille de lots et délais) et des contraintes dérivées de la planification du transport (disponibilité des véhicules).

Le challenge le plus important à gérer dans un APS est la faisabilité du point de vue informatique (technologique). Les problèmes d'optimisation associés aux étapes de planification de la chaîne logistique, ayant souvent une grande complexité, peuvent conduire à un effort de calcul (mémoire physique et temps de calcul) très important. Pour réduire l'effort de calcul, les informations partagées entre les modules sont souvent agrégées, et certaines considérations mathématiques sont faites afin de privilégier certains objectifs (par exemple, subordonner les décisions d'approvisionnement aux décisions de planification), et ne pas avoir à gérer des objectifs multiples.

Le caractéristique commune des APS est le partage d'information des différents modules. Cependant, il n'y a pas de version standard définissant la coordination des flux entre les différentes activités. En effet, le mode de fonctionnement des APS peut varier grandement d'un logiciel/vendeur à l'autre. Ainsi, quelques compagnies proposent un seul type de logiciel, qui s'adapte avec plus ou moins de pertinence aux situations particulières de l'industrie ; tandis que d'autres conçoivent leurs systèmes en fonction du client, avec les contraintes et les besoins spécifiques de la chaîne logistique en question. Nous pourrions donc dire que ces dernières suivent un mode de production de type *conception à la demande*, comme nous avons vu dans la Section 1.3. L'inconvénient du premier type de concepteur d'APS est que le système peut être difficile à adapter dans certains cas, et la performance peut ne pas correspondre aux attentes. D'autre part, les délais de développement, dans le deuxième cas, peuvent être très importants, les coûts sont plus élevés et le logiciel éventuellement moins flexible (pas adapté si le système de production évolue régulièrement en fonction des besoins du marché). Une vue d'ensemble sur les principaux APS disponibles sur le marché international, et une comparaison des deux systèmes les plus utilisés (SAP APO et Oracle) sont présentées dans [51].

En ce qui concerne la planification de la production, certains APS adoptent la logique de MRP-II, en construisant un S&OP et un MPS avec différents niveaux de détail sur la capacité ; d'autres systèmes proposent une seule étape de planification, réalisée au niveau tactique, avec des contraintes de capacité relativement détaillées, mais qui n'intègrent pratiquement jamais les contraintes d'ordonnancement détaillées [77].

Les APS diffèrent aussi dans la façon dont les étapes de planification de la production et d'ordonnancement interagissent. D'une part, certains logiciels proposent un module unique pour

la planification et l'ordonnancement, où les décisions peuvent être prises simultanément. Cependant, les modèles mathématiques utilisés pour planifier la production contraignent souvent l'utilisation exacte de la capacité, en limitant le nombre deancements de production (setups) par période, pour garantir la faisabilité du plan de production à court terme, sans avoir à inclure des contraintes d'ordonnancement détaillées, l'ordonnancement étant réalisé période par période. Dans des problèmes d'ordonnancement complexes (où plusieurs produits sont en compétition sur l'utilisation de plusieurs ressources), ces modèles peuvent s'avérer inefficaces. De plus, l'effort de calcul nécessaire pour résoudre un tel modèle est très élevé. D'autre part, d'autres APS proposent deux modules séparés, avec une méthode hiérarchique et un échange itératif d'informations permettant de faire évoluer, de façon permanente, les décisions de deux modules, jusqu'à obtenir un plan de production réalisable au niveau ordonnancement. Dans ce type d'APS, les modèles de planification tactique peuvent inclure des contraintes d'ordonnancement plus ou moins agrégées, qui ne garantissent pas complètement la faisabilité du plan et, même si les informations sont partagées entre les modules, il existe une perte de données, qui dépend du niveau d'agrégation des contraintes liant les modules, et une exploration réduite de l'espace des solutions. L'efficacité d'un APS dépend directement de la qualité des modèles mathématiques et des techniques de résolution utilisées (souvent le recuit simulé, la recherche taboue et les algorithmes génétiques [212]). Nous discutons, dans le Chapitre 2, des travaux modélisant et résolvant des problèmes de planification de la production avec intégration des contraintes d'ordonnancement.

L'intégration des décisions se fait de manière similaire pour connecter la planification de la production avec la planification de la distribution, et l'ordonnancement avec la planification du transport. Dans tous les cas, les décisions déterminées par un APS sont en général réalisables et beaucoup plus cohérentes que celles d'un ERP classique, où la planification de la production est faite à travers la méthode MRP-II, et où les contraintes de distribution ne sont pas considérées. En pratique, on peut trouver des APS intégrés dans des ERP, pour réaliser la planification de la chaîne logistique, tout en partageant des données avec les différents modules de l'ERP [77].

1.5 Ordonnancement de la production

L'étape d'ordonnancement de la production consiste à organiser, à court terme, les différentes ressources de l'atelier de production, de manière à suivre le mieux possible le plan de production déterminé dans l'étape de planification, c'est-à-dire, respecter les délais de production. Il s'agit d'affecter les opérations de production de tous les jobs (ordres de fabrication) aux ressources et de décider de leurs dates de début et de fin. De mauvaises décisions d'ordonnancement

ment peuvent occasionner des délais et des inventaires de produits semi-finis additionnels, ce qui peut déstabiliser la chaîne logistique. Dans des systèmes complexes, avec plusieurs ressources et des produits différents, il est difficile d'estimer la capacité de production à l'avance, et par conséquent, de calculer un plan de production réalisable au niveau ordonnancement. De plus, des incertitudes liées aux activités de maintenance et aux opérations manuelles peuvent aussi conditionner la mise en œuvre des décisions opérationnelles.

1.5.1 Configurations d'ateliers de production

La manière avec laquelle l'ordonnancement est réalisé dépend de la configuration de l'atelier de production, i.e. du nombre de ressources, de leur emplacement et de leur capacité à traiter les différentes opérations. Les types de configurations de ressources que l'on peut retrouver sont les suivantes :

– Atelier à une seule machine

Dans ce type d'ateliers, une seule ressource est disponible pour le traitement de tous les jobs. Donc, soit les produits requièrent uniquement une opération ou les ressources sont polyvalentes (elles peuvent réaliser plusieurs opérations). Ce type d'atelier correspond au problème d'ordonnancement le plus basique et le plus étudié dans la littérature. D'ailleurs, dans certains cas, des problèmes d'ordonnancement complexes peuvent être décomposés et ramenés à l'étude de plusieurs problèmes à une seule machine. Quelques exemples de travaux traitant le problème d'ordonnancement à une seule machine sont : [106], [44], [196], [124], [125] et [126].

– Atelier à machines parallèles

Le principe de ce type d'ateliers est similaire à celui à machine unique, i.e. chaque job passe par une seule ressource, sauf qu'ici il y a plusieurs ressources en parallèles disponibles pour réaliser l'opération. En ordonnancement, le modèle à machines parallèles est donc une généralisation du modèle à machine unique. Nous pouvons distinguer entre deux types d'ateliers à machines parallèles, ceux où les machines sont identiques, pouvant toutes traiter tous les jobs, et ceux où toutes ou une partie des ressources sont différentes, et ne peuvent donc pas traiter tous les jobs, ou elles peuvent les traiter mais avec des durées opératoires et des niveaux de qualité différents. Le problème d'ordonnancement

associé à ce type d'atelier est résolu, entre autres, dans [83] et [191].

– **Atelier de type flow-shop**

Contrairement aux ateliers à une seule machine et à machines parallèles, dans un flow-shop, chaque job requiert plusieurs étapes de transformation (opérations) sur différentes ressources, qui sont placées dans des stations de travail en série. Tous les jobs suivent la même séquence de fabrication et le but est habituellement de définir l'ordre de traitement des jobs. Comme tous les jobs doivent suivre la même séquence, des temps d'attente importants peuvent être générés entre les stations, ce qui peut entraîner un niveau élevé d'inventaire de produits semi-finis. Quelques travaux scientifiques sur le problème d'ordonnancement dans un flow-shop sont : [10], [12] et [173].

Une variante du flow-shop est le flow-shop flexible, où à chaque station il y a plusieurs ressources en parallèle capables de traiter la même opération. Donc, il s'agit d'affecter chaque job à une des machines disponibles, station par station. Ceci permet d'accélérer le flux de production et de réduire les inventaires de produits semis-finis. Ce problème est par exemple traité dans [117].

– **Atelier de type job-shop**

Comme dans un flow-shop, le job-shop comporte plusieurs ressources (ou stations de travail) différentes et chaque job doit passer par plusieurs ressources avant d'être transformé en produit fini. La différence réside dans le séquençement des opérations. Dans un job-shop, les séquences entre jobs peuvent être différentes. Par exemple, le job i doit être traité chronologiquement sur les ressources A , B , C , et D ; tandis que le job j doit suivre la séquence (C, B, D, A) .

Des temps d'attentes et des inventaires de produits semis-finis sont générés entre les stations de production, et les temps de réglage (temps de setup) des machines pour passer d'un produit à un autre peuvent être importants. Ceci impose une maîtrise de la capacité de production au moment de planifier les quantités de production, afin de pouvoir programmer pour chaque tâche ou opération une date de début et une date de fin cohérentes, i.e. réalisables. Quelques travaux scientifiques sur le problème d'ordonnancement dans un job-shop peuvent être consulter dans [119], [25] et [159].

Comme pour le type d'atelier précédent, il existe aussi le job-shop flexible, avec plusieurs ressources polyvalentes en parallèle par station de travail. Donc, non seulement il faut or-

donnancer le mieux possible les opérations, mais aussi déterminer la meilleure affectation aux ressources. Le problème d'ordonnancement du job-shop flexible est aussi connu aussi sous le nom de *Multiprocessor Job-Shop*. Le lecteur intéressé par ce type de problème peut consulter [49].

– **Atelier de type open-shop**

Ce type d'atelier, rarement rencontré dans la pratique, est un système multi-jobs et multi-ressources avec des séquences différentes entre jobs, comme le job-shop. La différence est que la gamme de fabrication n'est pas stricte, c'est-à-dire, l'ordre dans lequel un job doit être traité sur les ressources n'est pas imposé. Autrement dit, toutes les séquences permettant à un job de passer sur les ressources de sa gamme opératoire sont réalisables.

Une description plus détaillée des ateliers de production, du point de vue de l'ordonnancement, est présentée dans [182]. Un état de l'art sur le problème d'ordonnancement associé aux différents ateliers de production peut être consulté dans [15].

1.5.2 Contraintes d'ordonnancement

L'ordonnancement de la production est soumis au respect de certaines contraintes, selon la nature du système de production. Les contraintes les plus étudiées dans la littérature, faisant partie de notre thématique, sont décrites dans ce qui suit. Pour plus de détails sur ces contraintes et d'autres le lecteur peut consulter [181].

– **Contraintes de précédence**

Dans la fabrication de certains produits, il est obligatoire de respecter un ordre spécifique de traitement d'opérations défini par la gamme de fabrication, afin que le produit ait les caractéristiques désirées. De manière similaire, il est aussi possible que la production d'un job i requiert la réalisation anticipée du job j .

– **Contraintes de sélection des machines**

Dans des ateliers à machines parallèles, il se peut que certains produits ne puissent pas être traités sur certaines machines. Ceci restreint le nombre de séquences possibles et

limite donc, indirectement, la capacité.

– **Contraintes de main d’œuvre**

Dans des systèmes de production non-automatisés, la participation d’opérateurs dans le processus de fabrication est requise. Chaque opérateur ayant différentes qualifications et différentes expertises, l’affectation de la main d’œuvre aux machines est aussi importante que le séquençement des opérations. Pour garantir un niveau de qualité désiré ou une productivité élevée, certains systèmes peuvent limiter l’ensemble d’opérateurs disponibles par machine ou par station de travail.

– **Contraintes de séquençement**

Pour garantir la cohérence de l’ordonnancement, des contraintes de séquençement liant les dates de début et de fin de toutes les opérations peuvent être considérées. Elles permettent de respecter l’ordre de traitement des opérations sur chaque machine indépendamment, et sont donc complémentaires aux contraintes de précédence, qui garantissent la cohérence des dates de début et de fin des opérations appartenant à la même gamme de fabrication.

– **Contraintes de maintenance**

Les contraintes de maintenance sont utilisées pour tenir compte des activités de conditionnement, de réparation et d’inspection des objets matériels faisant partie du processus de fabrication, c’est-à-dire, les outils, les machines, les chariots, les entrepôts, etc. Les activités de maintenance sont souvent représentées dans les problèmes d’ordonnancement par des périodes d’indisponibilité.

– **Temps et coûts de réglage dépendant des séquences**

Dans certains systèmes, l’ordre de séquençement des jobs sur une machine a un impact sur le coût et le temps de production, spécifiquement à l’étape de réglage ou lancement (ou *setup*). Ainsi, le coût et le temps de setup, lorsque l’on passe de la production de l’article i à l’article j , ne sont pas les mêmes que lorsque l’on change les paramètres de la machine pour passer du produit i au produit k . Ces contraintes sont assez souvent présentes dans

les systèmes où une diversité importante de produits est fabriquée dans le même atelier.

– **Contraintes de capacité de stockage et de temps d’attente**

Souvent modélisées dans les problèmes de planification, les contraintes de capacité de stockage peuvent aussi être considérées dans les problèmes d’ordonnancement, en décomposant la période longue de planification en plusieurs périodes courtes avec un indicateur du niveau de stock par période. Selon les dates de fin des opérations, le niveau de stock de produits finis et semis-finis peut varier. De manière similaire, les temps d’attente entre stations de travail peuvent différer en fonction des dates de début et de fin. Afin d’éviter des longs temps d’attente et des niveaux de stock ingérables ou indésirables, des bornes (ou limites) sur la capacité de stockage et le temps d’attente sont, dans certains cas, imposées.

– **Préemption**

La préemption est la caractéristique du système permettant d’interrompre le traitement d’une opération, pour en traiter une autre. Dans la plupart de problèmes d’ordonnancement étudiés dans la littérature, la préemption est non autorisée, c’est-à-dire, une fois qu’une opération démarre sur une machine, elle doit être terminée avant de pouvoir affecter une nouvelle tâche à la machine.

– **Contraintes de transport**

Dans un réseau comportant plusieurs sites de production, tenir compte des contraintes de transport peut servir à prendre des meilleures décisions concernant l’ordonnancement. Les contraintes de transport peuvent être : les dates de disponibilité de véhicules, les dates souhaitées de livraison, la capacité des véhicules, etc. Une bonne synchronisation entre l’ordonnancement et le transport peut aider à réduire le coût de stockage de produits finis.

1.5.3 Critères d’optimisation

L’objectif dans un problème d’ordonnancement est de séquencer les opérations sur les ressources le mieux possible, de manière à respecter le plan de production, tout en optimisant un critère. Le critère peut être vu comme un indicateur de la performance de l’activité de production et peut varier selon la nature du système, le comportement de la demande et la

configuration de l'atelier. Les critères liés à notre thématique [181] les plus étudiés sont les suivants :

– **Minimiser le temps total de cycle (*makespan*)**

Connu aussi sous le terme de *makespan*, le temps total de cycle C_{max} est le critère le plus étudié et le plus utilisé en pratique, puisqu'il a un impact direct sur plusieurs autres critères. Le C_{max} est la date de fin la plus grande parmi tous les jobs à fabriquer. Soit C_j la date de fin du job j , alors $C_{max} = \max_j C_j$. Autrement dit, le temps total de cycle, est la date de fin du dernier job à être fabriqué.

– **Maximiser le taux de production**

Souvent donné par la capacité de la machine goulot (machine à faible taux de production qui conditionne la vitesse du processus de fabrication et génère du stock en amont), le taux de production est le principal indicateur de la productivité (nombre de pièces produites par unité de temps) et sa maximisation permet d'améliorer le niveau de service au client (ou niveau de réponse à la demande). Intrinsèquement, maximiser le taux de production permet de minimiser le temps total de cycle, et inversement.

– **Minimiser le retard maximum**

Le retard L_j d'un job j est la différence entre sa date de fin réelle C_j et sa date de fin souhaitée d_j . Le retard maximum L_{max} est donc associé au job dont la valeur $C_j - d_j$ est la plus grande. Un critère similaire est la minimisation du nombre de jobs en retard.

– **Minimiser le temps total de lancement de la production ou de réglage (temps de setup)**

Le temps de réglage d'une machine, avant de lancer la production d'un job, peut varier en fonction de la séquence et peut être élevé. Donc, il peut être plus avantageux d'éviter les changements de réglage, en limitant le nombre de produits différents par machine.

- **Minimiser le coût total de lancement de la production ou de réglage (coût de setup)**

Comme pour le critère précédent, les coûts de setup peuvent aussi être très importants et peuvent varier en fonction de la séquence. Néanmoins, le temps et le coût de setup associés à un même changement d'opération peuvent être indépendants, c'est-à-dire, les deux critères peuvent être en concurrence. Minimiser le coût de setup est un bon choix dans les systèmes où ce coût est élevé par rapport au coût de stockage.

- **Minimiser le stock de produits semi-finis (WIP)**

Le WIP est l'inventaire d'un produit à un état intermédiaire de son processus de fabrication, i.e. le stock de produits pouvant exister entre les différentes opérations de la gamme de fabrication. Dans des systèmes avec temps d'attente élevés entre stations de travail, cet inventaire peut être important, et dans certains cas (produits périssables ou obsolètes, par exemple), il peut être difficile à gérer. Donc, le coût d'inventaire de produits semi-finis peut être important.

- **Minimiser le coût de stockage de produits finis**

Dans des systèmes où les coûts d'inventaire sont élevés, il est indispensable de gérer le flux de production de façon à stocker le moins possible. Le mode de production à la demande peut favoriser la diminution des stocks, mais si les coûts de setup sont importants, il peut être plus avantageux de produire de manière anticipée, et donc de stocker. Par ailleurs, dans le mode de production sur stock, contrôler le taux de production en fonction du niveau de stock de sécurité désiré est une stratégie pour réduire les coûts.

- **Minimiser le temps maximum de livraison**

Dans un système comportant plusieurs sites de fabrication, où chaque site peut fournir des composants aux autres, le temps de livraison peut avoir une influence sur la durée de stockage et sur le niveau de service aux clients. Cependant, ce critère est peu utilisé en ordonnancement, car les sites ont tendance à planifier et à ordonnancer la production sans tenir compte des contraintes des autres sites (contraintes de logistique interne).

– **Minimiser le coût de transport**

Dans un système multi-sites, il est aussi important de tenir compte du coût de transport associé à la livraison. La détermination de routes et l'affectation de produits aux véhicules est souvent un facteur à considérer. Entre le temps et le coût de transport il n'y a pas forcément une relation linéaire, et il peut s'avérer impossible de minimiser le temps et le coût de transport.

– **Minimiser le temps total de flux**

Le temps de flux d'un job i est la différence entre sa date début au plus tôt r_j et sa date de fin C_j . Minimiser le temps de flux permet donc de réduire les temps d'attente, et par conséquent, les inventaires de produits semi-finis.

Tous ces critères sont reliés, et souvent les décisions prises pour en optimiser un ont une influence sur les autres indicateurs. Donc, selon les caractéristiques du système de production (ainsi que le comportement de la demande), des critères différents peuvent être utilisés pour ordonnancer la production. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'intégration de la planification et de l'ordonnancement de la production, avec pour objectif de minimiser le coût total. Ce coût est une fonction qui dépend en particulier des coûts de stockage et de setup, et permet donc de trouver un équilibre entre ces deux critères.

Pour de plus amples détails au sujet de l'ordonnancement de la production, le lecteur est invité à consulter [181].

1.6 Conclusion

Nous avons posé dans ce chapitre les bases de notre étude de l'intégration de la planification et de l'ordonnancement de la production dans une chaîne logistique. Ainsi, nous avons décrit la configuration générale d'une chaîne logistique, en expliquant les étapes principales de gestion, les niveaux décisionnels et les contraintes les plus communes, dans le milieu industriel. Nous avons classé les différents types de systèmes de production, selon la nature des flux de matières. Le type de système auquel nous nous intéressons par la suite est un système à flux discrets avec un mode de production par lots et une configuration d'atelier de type job-shop.

D'une manière plus approfondie, nous avons expliqué les étapes de planification et d'ordonnancement de la production dans la gestion de la chaîne logistique. Nous avons décrit les

objectifs et les contraintes impliqués dans chaque étape, ainsi que les approches les plus utilisées pour gérer ces aspects dans un système de production. La principale faiblesse des approches existantes consiste en la difficulté d'intégrer les décisions tactiques et opérationnelles, ce qui rend les solutions tactiques irréalisables ou sous-optimales à court terme, pouvant conduire, dans beaucoup de cas, à des pertes économiques. L'utilisation d'une approche intégrée, à la place d'une méthode hiérarchique, est pourtant un facteur qui peut s'avérer d'une importance cruciale et faire la différence dans le contexte économique actuel, qui connaît de plus en plus une forte concurrence dans la plupart des secteurs industriels.

L'intégration des décisions tactiques et opérationnelles dans l'étape de production repose sur une coordination efficace entre la planification et l'ordonnancement, deux activités très importantes en management de la chaîne logistique. Néanmoins, intégrer les contraintes de planification et d'ordonnancement requiert le développement d'une méthode de résolution dédiée.

Afin de présenter les avantages et les limites des approches qui cherchent à réduire l'incohérence entre la planification et l'ordonnancement, nous passons en revue, dans le Chapitre 2, les travaux scientifiques portant sur ces deux problèmes.