

Optimisation des lignes d'usinage

Au fil du temps, la production¹ a évolué au rythme des époques. Elle est passée de l'ère de l'industrie primaire qui se réduisait alors à l'agriculture, la pêche, la chasse et l'exploitation minière, à l'industrie secondaire qui s'est développée essentiellement autour de produits tangibles. Le début du XIX^{ème} siècle a été marqué par les pionniers de l'économie tels que Adams Smith (1723-90) et John Stuart Mill (1806-73) qui ont introduit la notion de manufacture² et le concept de commercialisation des produits sur le marché. Enfin, la dernière phase a débuté à la fin du XIX^{ème} siècle pendant laquelle l'industrie tertiaire a élargi le concept de production à la création d'utilités au sens de services [Hit96].

Dans ce qui suit, nous introduisons les systèmes de production d'une façon générale en portant un intérêt particulier aux systèmes d'usinage car se sont ces derniers qui font l'objet de l'étude menée dans cette thèse. Ainsi, nous rapportons d'abord la terminologie retenue dans ce mémoire puis nous présentons de manière plus détaillée les différents types de systèmes auxquels nous nous sommes intéressés.

1.1 Description des systèmes de production

Plusieurs définitions sont attribuées à la production, nous en rapportons quelques unes que nous citons par ordre chronologique.

D'après Dano [Dan66], la production a été définie comme étant une série de transformations de l'état de matières premières à l'état de produits finis ; chacune de ces transformations correspond à des changements physiques ou chimiques des matières traitées. Askin et Standridge [AS93] proposent la définition suivante : «*la production est le passage d'une conception à un produit fini*». Quant à Hitomi [Hit96], il la définit comme l'action de créer un élément tangible ou non tangible (un service).

Ces définitions englobent l'ensemble des types de systèmes de production : ainsi qu'il s'agisse d'assemblage, de montage ou d'usinage elles restent valables. Toutefois et en dépit

¹Le terme production est apparu en 1483, il provient du mot latin *producere*.

²Le mot manufacture vient du mot latin *manu factum* qui signifie fait à la main.

des propriétés communes que peuvent avoir ces types de systèmes, les systèmes d'usinage ont des caractéristiques qui leur sont propres.

1.1.1 Terminologie générale

Un système de production transforme de la matière première qui lui est fournie en entrée pour en faire un produit fini en sortie. Le système est composé d'un ou de plusieurs postes de travail appelés, plus communément, *stations*. Une station consiste généralement en un groupement de machines ou d'opérateurs humains qui effectuent de façon répétitive les mêmes opérations [HS00].

Les opérations qui sont effectuées dans ces stations peuvent être séparées entre celles effectuées par des opérateurs humains et celles qui sont réalisées par des machines (automatisées). Nous utilisons le terme de *pièce* pour désigner l'entité en cours de transformation dans le système mais également le produit fini qui en résulte. Selon le type de production, une pièce peut être un composant à usiner ou un élément à assembler. De plus, toutes les pièces qui sont dans le système de production, quelque soit leur état, sont considérées comme des *en-cours* [HS00]. Parmi ces derniers, il faut distinguer les *stocks tampons* qui peuvent être mis en place entre les stations selon la politique de gestion retenue. Leur objectif est de couvrir la production pour pallier aux aléas du système tels que les défaillances des machines [DP06].

1.1.2 Mesures de performance

Concernant les mesures de performances d'un système de production, la plus utilisée est sans doute le *taux de productivité* ou productivité (appelé par les anglo-saxons : *throughput*). La productivité d'un système correspond au nombre d'unités produites par unité de temps. À l'inverse, si nous raisonnons par rapport au temps nécessaire à la production d'un produit c'est du *temps de cycle* dont il s'agit. En pratique, il correspond au temps qui sépare la sortie de deux produits du système. La productivité est à l'évidence inversement proportionnelle au temps de cycle. Ainsi, pour augmenter la productivité d'un système il est indispensable de réduire son temps de cycle.

Néanmoins, il est à signaler qu'il existe une autre définition du temps de cycle qui le détermine comme étant le temps que passe la pièce dans le système de production. Ce qui revient à cumuler les temps des postes de travail du système lorsque ceux-ci sont agencés en série. Pour éliminer toute ambiguïté, nous désignons ce dernier par *temps de séjour*.

Une mesure importante de performance est le coût unitaire estimé comme étant le rapport entre le coût de fonctionnement dans une période donnée et le nombre de produits fabriqués dans cette période. Pour un coût global fixe, il est clair que plus la productivité est importante moins le coût unitaire est élevé. De la même manière, pour une productivité fixe, plus le coût global est faible plus le coût unitaire est réduit.

1.1.3 Des principes de base

L'étude du comportement d'un système de production est un problème complexe. Par exemple, si un système comporte K postes de travail et que chacun d'entre eux peut prendre m états³ alors le système a K^m états potentiels. Ce nombre peut très vite atteindre une très grande valeur, ce qui le rend difficile à étudier [AS93].

Selon la façon dont sont disposés les postes de travail, nous distinguons les lignes sérielles où les postes sont en série, de celles où chaque station en série est dupliquée en des postes en parallèle. Il faut également noter les architectures mixtes où certaines stations sont composées que d'un seul poste de travail alors que d'autres en ont plusieurs en parallèle. Dans nos travaux, nous nous sommes intéressés aux lignes sérielles qui présentent deux avantages majeurs : elles sont simples à gérer et moins onéreuses.

1.2 Les lignes d'usinage

1.2.1 L'usinage

L'usinage tient une place importante dans l'industrie mondiale et tout particulièrement dans l'industrie européenne. Le rapport du centre européen des statistiques [Joh06] permet de le confirmer car la fabrication des machines et équipements représente la troisième division manufacturière en Europe en terme de valeur ajoutée. Celle-ci se chiffre à 165 milliards d'euro, ce qui représente 10,8% de la valeur ajoutée totale de l'industrie manufacturière européenne. Ce rapport permet également de voir que le marché des machines-outils représente plus de 14 milliards d'euros, soit 8,8% de la production des machines et équipements.

L'usinage par enlèvement de copeaux a de nombreuses spécificités influençant directement l'organisation de ces systèmes de production. De ce fait, leur étude nécessite une attention particulière et une prise en compte minutieuse de ces caractéristiques. Dans ce qui suit, nous introduisons les opérations les plus fréquentes dans l'usinage avant d'aborder plus en détail les différents types de lignes d'usinage [Wik06].

- **Le perçage** : cette opération d'usinage permet de faire un trou dans une pièce. Celui-ci peut être de bout en bout ou ne pas déboucher.
- **Le fraisage** : cette opération est réalisée à l'aide de fraises qui permettent d'enlever de la matière en combinant un mouvement double composé d'une rotation et d'un déplacement vertical (ou horizontal).
- **Le taraudage** : un trou taraudé correspond à la forme complémentaire d'une vis ou tige filetée. Techniquement, il s'agit d'un trou lisse dans lequel on opère un filetage.
- **L'alésage** : cette opération, qui permet d'affiner la surface intérieure d'un cylindre, a pour but de calibrer la précision dimensionnelle dictée par des normes industrielles de qualité.

³Les états peuvent correspondre à différentes opérations effectuées.



FIG. 1.1 – Quelques pièces fabriquées par PCI Scemm

La combinaison de l'ensemble de ces opérations permet de réaliser des pièces complexes telles que celles que nous rapportons dans la figure 1.1. Ces images nous proviennent de notre partenaire industriel PCI qui est le leader français de la conception, la réalisation et la mise en service de biens d'équipement industriels⁴.

1.2.2 Les lignes d'usinage dédiées

La production de masse a connu un grand essor en employant les principes d'interchangeabilité et de division du travail. Développé en France au XVIII^{ème} siècle, le principe d'interchangeabilité considère que les composants élémentaires pour la fabrication d'un produit fini sont identiques et donc interchangeables [AS93]. On devrait alors pouvoir prendre n'importe quel composant et l'utiliser pour la production de toute instance de produit. Quant à la division de la tâche, elle permet une simplification du travail, sa standardisation et sa spécialisation. Ainsi, une activité complexe est subdivisée en tâches élémentaires (opérations) qui peuvent être effectuées séparément sur différents postes de travail.

Ford est sans doute celui qui a révolutionné les systèmes de production en introduisant le principe du flux de produits passant par plusieurs stations. Un exemple qui illustre bien ce cas de figure, est le modèle de voiture *T* de Ford qui a été produit à plus de 15 millions d'exemplaires entre 1908 et 1927 [Hit96].

La justification théorique de la production de masse a été présentée la première fois en 1910 par K. Bücher. Le principe est simple, en considérant le coût fixe a et le coût variable bx où x est la quantité fabriquée, le coût total est donné par :

⁴PCI Scemm représente une filiale de PCI, elle est centrée sur les activités liées à l'usinage et siège à St Etienne. PCI Scemm compte de nombreux clients notamment des constructeurs automobiles et constitue le premier fournisseur de PSA Peugeot Citroën.

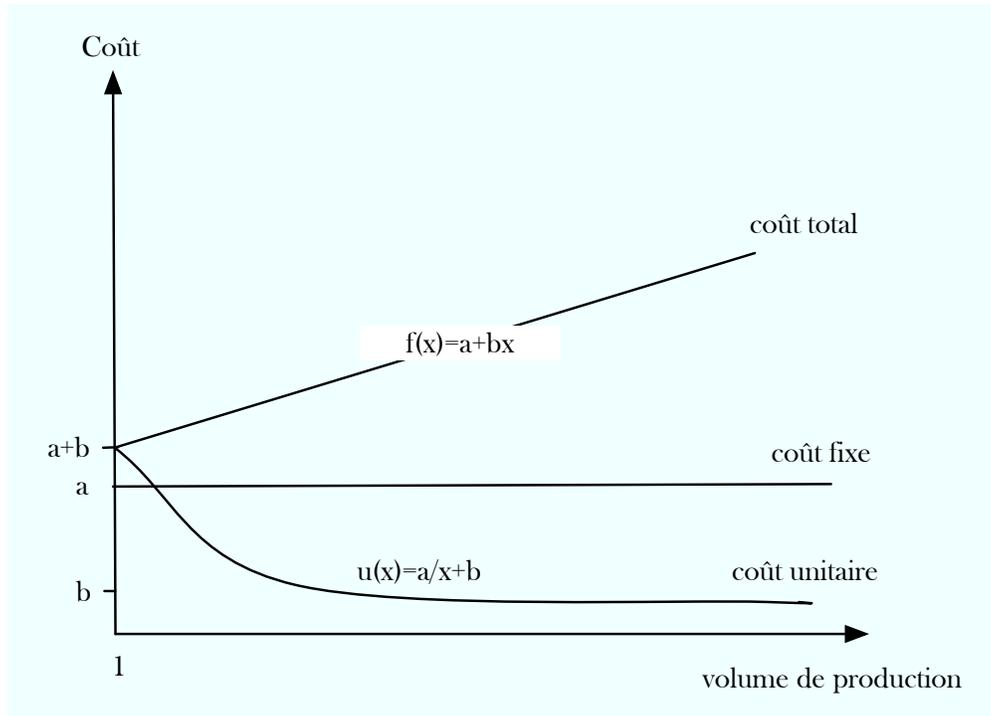


FIG. 1.2 – Principe de la production de masse

$$f(x) = a + bx \quad (1.1)$$

et le coût de production unitaire moyen est donné par :

$$u(x) = a/x + b \quad (1.2)$$

L'équation (1.2) permet de voir clairement que le coût unitaire est directement lié au volume, plus celui-ci est important plus le coût unitaire est faible.

Les lignes d'usinage dédiées sont conçues pour la production d'un seul type de produits ou des variantes proches. Ces lignes sont utilisées pour la grande série, car elles ont une grande capacité de production ce qui engendre un coût de revient unitaire relativement faible.

La mise en place des lignes dédiées présente de nombreux avantages, ainsi nous évoquons les plus importants :

1. Une très grande productivité. En effet, les volumes produits peuvent atteindre des millions de pièces, ceci réduisant le prix de revient [Fin04].
2. Une grande précision dans l'usinage en raison de la fixation des outils.
3. Il y a besoin de moins de pièces de rechange car l'équipement est standardisé.
4. La qualité des produits et la stabilité de leur caractéristiques est sans doute une des spécificités les plus attrayantes de ce type de lignes. En effet, celles-ci ont un haut

degré d'automatisme, ce qui minimise le risque de fabriquer des produits de mauvaise qualité.

5. Ces lignes peuvent fonctionner jusqu'à 30 ans avec des modifications tous les 7 ans environ.
6. L'amortissement de ces lignes se fait dès les premières années, elles ont, de ce fait, un coût de revient très compétitif.

Les lignes dédiées à la production de masse présentent toutefois quelques inconvénients, parmi lesquels :

1. La rigidité du système ne simplifie pas l'évolution de la production vers d'autres types de produits.
2. La mise en œuvre d'un tel système est coûteuse.
3. La capacité de production de ces lignes est fixe et le système n'est pas évolutif, c'est-à-dire sa configuration et son taux de production sont figés pour toute sa durée de vie.
4. Dans la pratique, les lignes dédiées sont sous-utilisées et fonctionnent souvent en sous-régime. Une étude de [MT99] montre que de telles lignes ne sont utilisées en moyenne qu'à 53 % de leur capacité effective. Les auteurs expliquent ce taux d'utilisation par le changement de la demande pour certains produits entre le moment où le produit est conçu et celui où la ligne est mise en fonctionnement. Cette sous-utilisation crée un manque à gagner et monopolise des fonds qui pourraient être fructifiés.

Il est toutefois important de noter que lorsque la demande est importante (atteignant plusieurs millions par an) et stable durant un certain nombre d'années, ce type de lignes devient de loin la meilleure solution en termes de rentabilité. Dans ce cas, l'importance des fonds immobilisés impose une vraie réflexion quant à l'optimisation du coût de l'investissement.

Un des principes des lignes dédiées réside dans la réduction du temps de cycle ce qui a une influence directe sur la réduction des coûts de fabrication unitaires. L'amélioration des flux est également possible en raison de la concentration des opérations uniquement à valeur ajoutée.

Pour conclure, les lignes d'usinage dédiées sont économiques et très rentables à condition que les volumes de production soient importants. Il est également important de souligner que ces lignes se prêtent bien à l'optimisation dans le sens où le critère à optimiser est facile à identifier (minimiser le coût unitaire). Par ailleurs, l'intérêt des lignes dédiées est également lié au fait que leur structure représente une forme d'organisation de base pour les autres systèmes, c'est-à-dire que l'ensemble des problèmes qui se posent lors de l'optimisation d'une ligne dédiée sont également présents lors de la conception des autres types de lignes.

Le champs d'application des lignes dédiées s'est sensiblement réduit depuis les années 80. Il reste néanmoins très important pour nombre de constructeurs de lignes d'usinage, il représente, pour PCI-Scemm par exemple, près de 40% de leur production globale (voir site de PCI, [PCI06]). Par ailleurs, les industriels cherchent des réponses pour faire face aux nouvelles conditions du marché qui est caractérisé par une demande souvent volatile pour

les produits finis. De ces préoccupations sont nés les concepts de *mass customization*, des produits et lignes modulaires composées d'unités standard qui sont facilement remplaçables et interchangeables. Ces systèmes permettent de réduire la diversification en élargissant le champ d'application des lignes dédiées à la grande série.

1.2.3 Les lignes d'usinage flexibles

Les systèmes flexibles (FMS, pour *Flexible Manufacturing Systems*) permettent l'usinage de plusieurs types de produits, appartenant à une famille large. Par famille nous entendons les produits ayant des dimensions proches et des caractéristiques géométriques similaires, ainsi que les mêmes classes de tolérances, afin qu'ils puissent être usinés par le même équipement. Les lignes flexibles mettent en place des machines programmables, la partie logicielle prend en charge les changements éventuels tels que les programmes d'usinage ou l'ordonnancement des produits à fabriquer. L'objectif de ce système est de produire plusieurs types de produits et de faire face à des changements possibles durant le fonctionnement du système en termes de volumes fabriqués. Ces lignes assurent un passage rapide d'un type de produit à un autre mais elles présentent un certain nombre d'inconvénients :

1. Les systèmes flexibles sont très onéreux car ils emploient des machines de type CNC (pour *Computer Numeric Control*). Les machines de ce type sont fabriquées avant la planification des processus. À ce stade, les spécificités de l'usinage ne sont pas encore connues, ce qui amènent les constructeurs à intégrer le plus de fonctionnalités au risque de ne pas les employer par la suite.
2. Le développement de la partie logicielle est également onéreuse.
3. À l'inverse des machines dédiées, qui ne contiennent que des outils fixes mais qui permettent une grande précision, les machines CNC fonctionnent sur le principe de changements fréquents d'outils. La forte flexibilité des machines est directement liée à la possibilité de les reprogrammer à souhait en changeant d'outils au détriment d'une perte de précision, ce qui se répercute sur la qualité des produits et donc sur la productivité.
4. En raison des rapides avancées technologiques, ces machines sophistiquées sont très rapidement sujettes à obsolescence.
5. L'étude menée dans [MUKH02] met en évidence les enjeux économiques pour l'industrie manufacturière qui met en place des systèmes de production flexibles. L'étude met en avant le manque à gagner induit par l'investissement dans les systèmes de type FMS, ce dernier est souvent lourd pour une flexibilité superflue, car deux tiers des industriels déclarent ne pas utiliser leur FMS à son entière capacité. Un questionnaire, fait auprès des industriels, rapporte qu'ils sont 75 % à exprimer leur besoin de passer à un système moins coûteux. Les auteurs suggèrent de répondre à ces besoins avec les systèmes basés sur des machines modulaires avec unités standard et une architecture ouverte afin de permettre une conversion efficace et rapide⁵.

⁵La conversion serait possible grâce à l'ajout et à la suppression de modules sans affecter l'ensemble du système.

1.2.4 Les lignes d'usinage reconfigurables

Les systèmes reconfigurables, notés *RMS* (pour *Reconfigurable Manufacturing Systems*), sont introduits dans [KHJ⁺99]. Les auteurs y justifient le besoin des industries manufacturières, dicté par la conjoncture économique, d'acquies des systèmes de production capables de s'adapter aux perpétuels changements du marché.

Un système manufacturier reconfigurable est conçu depuis le début pour permettre des changements simples dans sa structure physique afin de répondre à la fluctuation dans la demande en termes de volume et de type de produits [KHJ⁺99].

Les auteurs précisent que les caractéristiques clés d'un système reconfigurable résident dans les points suivants :

- **Modularité** : les lignes reconfigurables ont une structure physique et logicielle modulaire. Une telle structure simplifie et accélère la reconfiguration. En fait, l'utilisation des machines modulaires composées d'unités standard et des architectures ouvertes facilitent l'ajout et la suppression de modules sans affecter toute la ligne. La modularité est présente à plusieurs niveaux : ainsi, une machine est considérée comme un module à l'échelle de la ligne, de la même façon, une broche est un module pour une tête d'usinage.
- **Intégrabilité** : l'intégration des modules dans le système devient possible au moyen d'interfaces capables de prendre en charge les nouveaux composants.
- **Personnalisation de la flexibilité** : le principe est de fournir la juste flexibilité nécessaire pour la fabrication d'une famille définie et restreinte de produits. Comme les machines sont construites après la définition de la famille des produits il devient possible de fournir la juste flexibilité⁶.
- **Ajustabilité** : pour que la ligne puisse être en adéquation avec la demande en terme de capacité de production, l'ajustement des stations permet d'ajouter ou de supprimer des machines, mais également d'augmenter ou de diminuer la capacité d'une machine par la modification de sa structure, en l'occurrence par l'ajout ou la suppression de broches pour une unité d'usinage.
- **Convertibilité** : les fonctionnalités de la ligne doivent pouvoir être transformées pour produire de nouveaux types de produits.
- **Diagnosticabilité** : les défaillances du système doivent pouvoir être détectées automatiquement et corrigées.

Une comparaison des RMS avec différents types de systèmes de production est faite dans [MUK00]. Ainsi, ce paradigme nouvellement introduit devrait pouvoir apporter de nombreux avantages, notamment la flexibilité à juste mesure. Il nous semble pourtant qu'il reste de nombreuses questions auxquelles il faut répondre avant d'atteindre les objectifs visés. Les interrogations qui nous semblent les plus cruciales sont les suivantes :

⁶Contrairement aux lignes flexibles qui offrent une flexibilité absolue mais le plus souvent inutile, le principe des lignes reconfigurable est d'offrir une flexibilité à juste mesure limitée à la fabrication des produits d'une famille restreinte définie au préalable.

- L'absence d'interfaces standards est l'inconvénient majeur. Celles-ci doivent prendre en charge l'architecture des machines modulaires de façon à permettre des évolutions du système.
- Nous n'avons pas suffisamment de recul pour juger de l'efficacité de tels systèmes. En effet, le principe n'a été introduit qu'en 1999, ces systèmes sont donc toujours en phase expérimentale, ils n'ont pas encore pu confirmer ni leur fiabilité ni leur productivité à juste mesure.
- Une imprécision réside dans la définition de la famille de produit. La conception du RMS est définie autour d'une famille restreinte de produits qui nécessite une anticipation sur la demande du marché en termes de type des produits à fabriquer dans l'avenir. À long terme, il semble difficile de faire des prévisions fiables. Nos partenaires industriels et fournisseurs d'équipement pour les constructeurs automobiles nous le confirment : «*il n'a jamais été possible de présager des changements effectifs qui concernent l'évolution des produits*».
- La flexibilité apportée en principe par les RMS est limitée à une famille dont la définition elle-même est imprécise. Cette dernière restreint l'évolution des RMS aux prévisions faites au moment de sa conception qui peut être décalée de la réalité. De surcroît, les produits d'une famille doivent être intrinsèquement proches. Par exemple il faut qu'ils aient en commun un minimum d'opérations [KL98]. Ce dernier point est capital, pourtant il n'a pas été abordé dans les travaux cités.

1.3 La conception des lignes d'usinage

La conception des lignes d'usinage exige une démarche globale qui nécessite la résolution de plusieurs problèmes interconnectés [AS93]. Idéalement, les décisions relatives à tous ces problèmes doivent être considérées simultanément, seulement le problème global est si complexe qu'il devient indispensable de le décomposer en plusieurs phases, chacune répondant à des décisions moins complexes. Les ouvrages de référence en cette matière [AS93, Hit96] proposent plusieurs décompositions possibles. Nous avons opté pour celle offrant le plus de détails [AS93].

La conception du produit doit être réalisée le plus en amont avant la planification des processus et l'étude de l'affectation des opérations de production aux postes de travail. L'étude du flux et des moyens de transport sont également à considérer. Dans la suite, nous décrivons ces étapes plus en détail :

- **La conception du produit** : cette phase correspond à la définition du produit répondant à un besoin du marché. Il s'agit de donner une description formelle et précise d'un produit futur. Des outils de CAO (pour Conception Assisté par Ordinateur repris de *CAD* qui signifie en anglais *Computer Aided Design*) offre un cadre pratique pour réaliser une telle démarche en proposant la possibilité de représenter le produit en trois dimensions avec des points définissant sa géométrie, sa typologie et ses caractéristiques.
- **Planification de processus** (*Process planning*) : cette étape s'intéresse à la définition des gammes de fabrication. Un ordre partiel entre les opérations est notamment établi.

En outre, c'est lors de cette phase que les contraintes technologiques sont définies. Cette étape nécessite une véritable compréhension de la faisabilité des opérations et des besoins fonctionnels décrits lors de la conception du produit.

- **Configuration (ou affectation des opérations)** : À ce stade, on étudie l'affectation des opérations aux stations de travail (agencement logique) de façon à ajuster la productivité du système à la demande. C'est également à ce niveau que l'on détermine les différents outils pour effectuer ces opérations. Lorsque de tels outils peuvent être sélectionnés, il devient impératif de veiller au respect des contraintes définies précédemment entre les opérations, en particulier des contraintes de précedence.
- **Flux et moyen de transport** : afin de permettre une meilleure gestion de flux, il est nécessaire d'étudier le flux des produits dans le système de production et l'agencement physique des équipements (facilities layout) qui concerne la façon de disposer les machines. Quant au choix des moyens de transport, il faut qu'il soit cohérent avec la décision définissant l'architecture du système qui est prise antérieurement. En effet, un convoyeur linéaire conviendra mieux à une structure linéaire du système.

La prise en compte simultanée de l'ensemble de ces problèmes est en pratique très difficile, aussi la démarche usuellement adoptée procède de façon hiérarchique en considérant les étapes les unes après les autres. Il est, cependant, souvent indispensable de revenir sur des étapes antérieures lorsque les décisions qui y sont prises s'avèrent inadéquates. Un exemple de mise en pratique d'une telle démarche est proposée dans [ZZX02], ce schéma est rapporté dans la figure 1.3 qui reprend les étapes décrites précédemment en montrant les différentes interactions possibles.

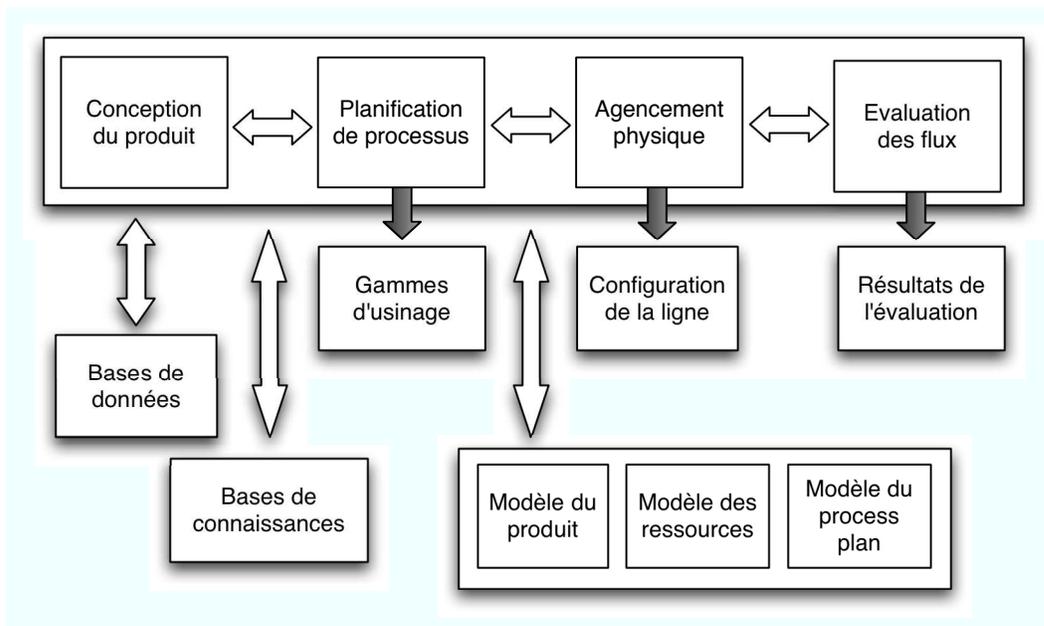


FIG. 1.3 – Démarche globale pour la conception d'une ligne d'usinage

La modélisation des caractéristiques du produit permet de réaliser la description du

produit à fabriquer nécessaire pour les étapes suivantes. Ensuite, la planification de processus permet de proposer plusieurs gammes pour alimenter l'étape de l'agencement physique (qui est représentée par la troisième et quatrième étapes dans notre description ci-dessous). Lors de cette étape une configuration de la ligne est établie en tenant compte de la productivité voulue et du coût des équipements. Enfin, une évaluation des flux et du coût de la ligne est réalisée en prenant compte de l'ensemble des décisions qui ont été prises auparavant. Ainsi, lorsque l'évaluation des résultats n'est pas satisfaisante, le concepteur est en mesure d'apporter des modifications à tous les niveaux allant de la conception du produit jusqu'à l'agencement. De plus, la figure illustre l'échange qui existe lors de la conception du produit avec une base de données dans laquelle sont stockées des solutions type.

La démarche proposée dans cette thèse est similaire à celle de [ZZX02]. Cependant, dans le cas de la figure 1.3, il s'agit d'un atelier flexible pour lequel l'affectation des opérations aux postes de travail est réalisée en temps réel, ce qui explique l'absence de cette phase dans le schéma rapporté. En effet, les centres d'usinage sont en général équipés pour effectuer un maximum d'opérations tandis que pour les lignes dédiées les opérations à affecter sont plus précises dans le sens où il n'y a que les opérations sollicitées pour la fabrication du produit sélectionné qui sont présentes sur la ligne. C'est pourquoi le problème de l'affectation des opérations se pose lors de la conception de la ligne juste après la définition des gammes, c'est-à-dire à l'étape de l'agencement logique et physique définissant la configuration de la ligne.

Nos travaux s'inscrivent dans une démarche globale similaire au schéma précédent. Plus particulièrement, notre intérêt se positionne à cheval entre la phase de planification de processus et celle de l'affectation des opérations aux postes de travail (agencement logique). Ainsi, notre démarche concerne le bureau de méthodes mais aussi celui de la fabrication car nous nous intéressons à la fois au choix d'une gamme mais aussi à l'affectation des opérations aux stations en précisant les équipements à mettre en place.

Jusqu'à présent, des avancées incontestables dans la CAO ont permis de réduire le temps de la conception des produits à l'inverse de la phase de configuration des systèmes de fabrication pour laquelle moins d'efforts ont été fournis. Cette dernière devient le goulot d'étranglement du cycle de vie du produit [Das03]. Il est évident que l'application de méthodes basées sur des modèles mathématiques efficaces réduirait le temps de réalisation de cette phase et permettrait un gain considérable sur le temps de conception global : produit-process-système de fabrication. D'autre part, l'analyse et l'optimisation de la configuration doivent être réalisées le plus en amont possible pour éviter des changements trop tardifs dans la spécification du produit et de son système de fabrication car cela engendrerait des coûts prohibitifs.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre contribution. Plus exactement, nous nous plaçons dans un contexte d'usinage pour apporter des réponses efficaces aux questions relatives à la structuration des lignes dédiées et reconfigurables utilisant des machines multi-broches.

Nous proposons dans la figure 1.4 [DGL⁺04], un schéma global reprenant la démarche adoptée. La figure permet de situer notre approche dans un contexte plus général en présence des diverses informations qui sont définies dans les autres phases. Ces informations peuvent être déterminées en amont, elles sont alors traitées comme données d'entrée telles

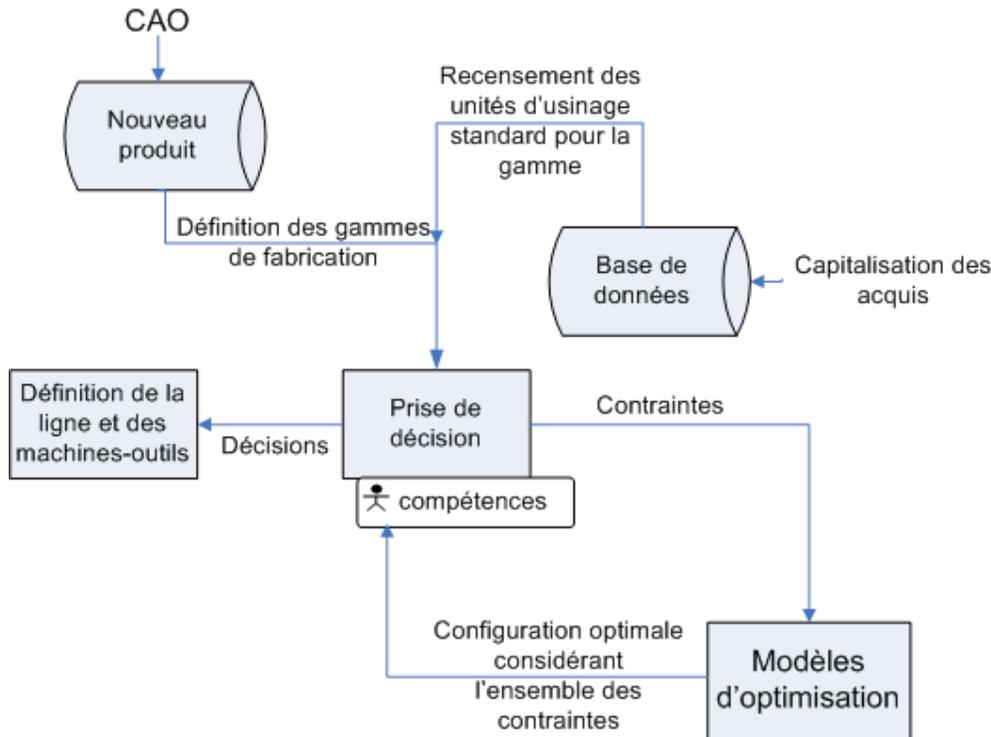


FIG. 1.4 – Schéma global pour l'intégration de méthodes d'aide à la décision

que l'ensemble des unités d'usinage disponibles (qui sont stockées dans une base de données) Ces unités sont caractérisées par leur coût, le temps d'usinage et les opérations effectuées.

Par ailleurs, le concepteur formule des contraintes qui sont inhérentes aux technologies utilisées (gammes d'usinage retenues lors du process plan) mais aussi des contraintes issues de son expérience. Il est intéressant de voir que l'approche proposée peut être intégrée dans un schéma itératif global. Ceci permet en particulier aux décideurs de relancer la résolution pour modifier les structures proposées (solutions fournies) au moyen de l'ajout de contraintes supplémentaires. Ainsi, les décideurs sont en mesure d'intégrer leur savoir-faire et leurs compétences pour mettre à profit leur expérience. L'ensemble des données d'entrée est ainsi constitué pour que le modèle d'optimisation puisse trouver une solution optimale respectant les contraintes fournies. La solution procure en sortie les unités d'usinage qui seront placées sur chaque station et le nombre de stations à mettre en service. Le cœur de cette approche réside dans la modélisation des contraintes et l'optimisation du modèle obtenu, c'est précisément de ces sujets que nous traitons dans cette thèse.

1.4 Enjeux de l'optimisation lors de la configuration des lignes d'usinage

Les enjeux économiques sont importants pour les entreprises manufacturières qui mettent en place des systèmes d'usinage automatisés en raison du coût d'acquisition des unités d'usinage et machines-outils. Ces entreprises doivent investir lourdement dans l'installation et la mise en œuvre des lignes qu'elles fabriquent d'une part et pour sa reconfiguration d'autre part. Ces coûts se répercutent en grande partie sur le prix du produit fini et doivent, par conséquent, être minimisés.

Par ailleurs, dans le cas des lignes dédiées à la grande série dont la structure est figée, une erreur commise à ce stade est quasiment irrémédiable (ou coûterait très cher). À l'inverse, si un gain est réalisé à cette étape, des bénéfices considérables peuvent être obtenus en tenant compte de l'effet d'échelle.

Une fois que les phases de conception du produit à fabriquer et de planification des processus sont en partie réalisées, il faut commencer à déterminer la configuration de la ligne en termes de sélection des unités d'usinage et de leur affectation aux stations.

Qu'il s'agisse de conception préliminaire ou de reconfiguration les problèmes de décision restent les mêmes, à savoir :

1. Quelles sont les unités d'usinage à choisir pour assurer la productivité visée ?
2. Combien de stations de travail faut-il installer afin d'assurer la productivité voulue tout en minimisant le coût de la ligne ?
3. Comment affecter les unités d'usinage aux stations ?
4. Dans quel ordre activer les unités d'usinage sur chaque station ?

Dans ces circonstances, il devient intéressant, voire indispensable, pour les décideurs, de détenir un outil d'aide à la décision leur permettant de trouver la meilleure configuration en termes de coût de mise en place de la ligne comportant les coûts d'acquisition des unités d'usinage et des stations de travail. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux rapportés dans cette thèse. La démarche proposée est basée sur une approche exacte employant des modèles mathématiques pour répondre aux problèmes de décision qui se posent lors de la phases du choix de la gamme (process plan) et celle de l'affectation des opérations.

Ces problèmes se posent pour tous les types de lignes d'usinage. En effet, qu'il s'agisse d'une conception préliminaire dans le cas de lignes dédiées ou d'une reconfiguration dans le cas de lignes flexibles ou reconfigurables, il faut choisir un ensemble d'unités pour effectuer la gamme d'opérations sélectionnée. Néanmoins, l'objectif lors d'une conception préliminaire peut être différent de celui à considérer lors d'une reconfiguration. Dans le dernier cas, il peut être pertinent de considérer également le temps et le coût de reconfiguration. Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que le critère de coût considéré, dans notre étude, ne se limite pas au coût de l'investissement uniquement, il peut être de nature diverse. Ainsi, il peut représenter un temps et un coût de reconfiguration ou un tout autre critère.

1.5 Problématique

1.5.1 Descriptif des lignes étudiées

L'objectif de cette thèse est d'apporter les meilleures solutions aux problèmes inhérents à la conception/reconfiguration qui se posent pour les lignes d'usinage. Ces lignes sont dites sérielles (*tandem lines* dans la littérature anglosaxonne), et couvrent une large classe des systèmes d'usinage : machine à transfert circulaire, machine à transfert linéaire, ligne de transfert, . . . Chaque station est équipée d'une ou de plusieurs unités d'usinage. Les stations sont reliées entre elles à l'aide d'un système de transfert, le plus souvent un convoyeur.

Lorsque la ligne est en fonctionnement, une pièce est positionnée en face de chacune des stations de sorte que les unités d'usinage de ces dernières puissent effectuer leurs opérations. L'activation des unités, qui se matérialise par l'enclenchement de l'ensemble des broches, marque le début d'un cycle et l'arrêt de la dernière tête⁷ délimite la fin de ce même cycle. Ainsi, la station goulot (celle qui a le temps d'exécution le plus long) définit le temps de cycle de la ligne. Nous notons L pour désigner la ligne et S_k pour la station avec l'indice k . La figure 1.5 représente le schéma d'une telle ligne.

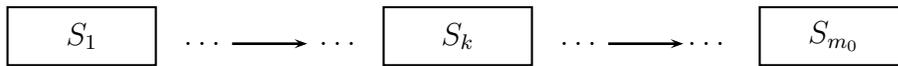


FIG. 1.5 – Schéma d'une ligne

De nombreux travaux existent dans la littérature étudiant les stocks tampons dans ce type de ligne, nous rapportons ici quelques références comme suit : [DG89],[DDX89],[DES06] et [DP06]. Actuellement, les industriels ont tendance à placer les stocks entre les lignes. Ainsi, dans notre étude, nous supposons que les stocks sont uniquement en amont ou/et en aval à la ligne, ce qui nous permet de ne pas en tenir compte lors de l'étude de la configuration de la ligne.

1.5.2 Modes d'activation des unités d'usinage

À présent, nous allons développer plus en détail les unités d'usinages qui composent une station ainsi que leurs différents modes de fonctionnement.

Avant d'aborder les modes d'activation des unités composant une station, il est nécessaire de définir l'unité d'usinage elle-même. Pour ce faire, nous présentons des têtes multi-broches et des têtes mono-broche.

Dans le cas d'une tête multi-broches, plusieurs broches combinées sur une unité d'usinage⁸

⁷Par dernière tête à s'arrêter, nous entendons celle qui a le temps d'exécution le plus long de toute la ligne.

⁸Les termes tête et unité d'usinage peuvent être utilisées indifféremment.

permettent l'exécution de 7 opérations en parallèle. Une telle tête d'usinage est illustrée dans la figure 1.6, elle permet d'exécuter 6 opérations simultanément⁹. L'utilisation d'unités d'usinage multi-broche permet de réduire le temps d'exécution de l'ensemble des opérations. Le temps nécessaire pour effectuer toutes les opérations d'une même tête d'usinage peut être estimé au plus grand temps d'exécution de ses opérations. Toutefois, cette estimation n'est pas la seule et a fait l'objet de nombreux travaux.



FIG. 1.6 – Tête multi-broches de PCI Scemm

Selon le temps de cycle à respecter et la faisabilité technique, il peut être plus judicieux de choisir un type d'activation des unités d'usinage par rapport à un autre. Ce mode régit l'enclenchement des unités d'usinage appartenant à une même station. La décision inhérente à ce choix n'est pas l'objet de l'étude proposée mais elle doit néanmoins être prise en amont à notre étude de manière à pouvoir l'intégrer lors de la modélisation des contraintes relatives au temps de cycle. Les modes d'activation existants sont au nombre de trois, nous les désignons par mode : parallèle, séquentiel et mixte. Plus précisément, nous les décrivons comme suit :

- **Le mode parallèle** : toutes les unités travaillant sur la même station sont activées simultanément. Plus précisément, les unités d'usinage de toutes les stations sont enclenchées en même temps par un mouvement synchrone. Le début d'un cycle correspond au moment où toutes les unités sont enclenchées pour effectuer leurs opérations. Lorsque les têtes de toutes les stations ont terminé l'exécution de leurs opérations, le cycle est achevé et la pièce est transférée à la station suivante où un autre cycle est effectué.
- **Le mode séquentiel** : les unités d'usinage appartenant à la même station sont activées de façon séquentielle. Ainsi, la seconde unité n'est enclenchée qu'une fois que la première unité ait terminé l'exécution de ses opérations. Quand la seconde unité termine, à son tour, son travail la troisième tête est enclenchée et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les têtes d'usinage de la station aient terminé. Enfin, la pièce est transférée à la station suivante, où les opérations de celle-ci sont effectuées pendant un autre temps de cycle.

⁹Lorsqu'il n'y a qu'une seule broche sur une tête, celle-ci est dite mono-broche.

La figure 1.7 est un exemple d'une station ayant deux unités d'usinage multi-broche activées de façon séquentielle par rotation du support.



FIG. 1.7 – Une station avec le mode séquentiel (PCI Scemm)

- **Le mode mixte** : la station est composée de plusieurs étages qui s'exécutent en séquence. Chaque étage est défini comme un sous-ensemble d'unités d'usinage activées, elles-mêmes, en parallèle. Ainsi, la pièce arrive sur la ligne et le premier étage de la première station est positionné en face de la pièce, de façon à permettre à ses têtes d'effectuer toutes leurs opérations. Une fois que celles-ci ont terminé, le deuxième étage de la première station est positionné à son tour, face à la pièce qui reste immobile, et les têtes du second étages sont activées. Le processus est réitéré jusqu'à ce que tous les étages de la première station aient terminé. Lorsque tous les étages de toutes les stations ont achevé leurs opérations un cycle est terminé. La pièce est déplacée vers la station suivante et un autre cycle commence.

Le cas mixte est clairement une généralisation des deux premiers cas, il se ramène au cas parallèle lorsque les stations ne comportent qu'un seul étage. Par ailleurs, il revient au cas séquentiel lorsque les étages ne contiennent qu'une seule unité d'usinage.

Nous décrivons à présent l'ensemble des données d'entrée du problème de configuration considéré.

1.5.3 Les données

Les lignes étudiées font intervenir différents types d'opérations telles que : le perçage, le taraudage, le fraisage, l'alésage, etc.

L'ensemble des opérations à effectuer pour l'usinage de la pièce à fabriquer, noté \mathbf{N} , est déterminé dans les phases antérieures de conception de produit et de process plan (dans un premier temps, nous ne considérons qu'un seul type de produit à fabriquer).

Nous supposons également que nous connaissons **l'ensemble des unités d'usinage** capables d'effectuer une ou plusieurs opérations nécessaires à la fabrication du produit, nous le notons \mathbf{B} . En fait, selon que l'étude de conception soit préliminaire pour une ligne non existante ou bien qu'elle concerne une reconfiguration, les décideurs sont amenés à constituer différemment l'ensemble des unités d'usinage disponibles. Nous citons les points qui nous semblent les plus fréquents, comme suit :

1. Une étude de disponibilité sur le marché des unités d'usinage. À cette étape, il s'agit de récolter les informations sur les différentes possibilités en termes d'unités d'usinage capables d'effectuer une ou plusieurs opérations nécessaires à la fabrication du produit.
2. En cas de présence de compétences ou d'un savoir-faire en matière de conception et de fabrication d'unités d'usinage, celles-ci peuvent être acquises par ce moyen.
3. Des unités encore opérationnelles peuvent être réutilisées, deux situations se présentent alors, nous les décrivons comme suit :
 - (a) Si la ligne est à concevoir, les unités peuvent être récupérées à partir d'autres lignes de production qui ont été mises hors de fonctionnement à condition que les unités soient toujours opérationnelles.
 - (b) Si la ligne est à reconfigurer alors les unités avec lesquelles le système fonctionne, en l'occurrence celles qui sont présentes sur la ligne, sont intégrées dans la liste de disponibilité car elles sont toujours valables et candidates pour effectuer les opérations qui leurs correspondent. Néanmoins, si de nouvelles opérations doivent être introduites alors il faut compléter la liste des unités d'usinage disponibles avec des unités capables d'exécuter ces nouvelles opérations. De même, si certaines opérations ne sont plus à effectuer alors la liste des disponibilités est mise à jour et les unités correspondantes sont à écarter.

Dans notre étude, chaque unité d'usinage est décrite par l'ensemble d'opérations qu'elle effectue, son coût et son temps d'exécution (opératoire). Ces paramètres sont pris en compte comme des données du problème.

Nous considérons également des contraintes relatives aux caractéristiques des unités. Celles-ci peuvent représenter la charge à ne pas dépasser, leurs dimensions ou leur capacité de production. Nous résumons, dans ce qui suit, les notations propres aux données des unités d'usinage :

- l'ensemble \mathbf{B} des unités d'usinage disponibles est supposé connu. Une unité d'usinage est définie par l'ensemble des opérations qu'elle effectue.
- le coût de l'unité $b \in \mathbf{B}$ est donnée par q_b ,

- t_b désigne le temps opératoire pour effectuer toutes les opérations de l'unité b .

La sous-section qui suit est dédiée à la contrainte de temps de cycle qui découle directement de la productivité souhaitée. Nous distinguons naturellement les trois modes d'activation en précisant pour chacun d'eux l'expression de temps de cycle en fonction des temps opératoires des unités qui équipent la ligne.

1.5.4 Le temps de cycle

En pratique, la productivité visée est estimée sur la base du volume annuel à atteindre. De ce dernier est déduite la productivité par unité de temps en tenant compte des éventuelles interruptions qui pourraient perturber la production. Une borne supérieure sur le temps de cycle T_0 en est déduite, c'est-à-dire la limite de temps accordé aux stations pour achever toutes leurs opérations. Le temps de cycle effectif (réel) est noté T , il est déterminé par le temps de la station goulot, c'est-à-dire celle qui a le plus grand temps d'exécution. Ainsi :

$$T = \max_{k=1,\dots,m} \{TS_k\}, \quad (1.3)$$

où m est le nombre de stations et TS_k est le temps de travail de la station S_k ; ce dernier dépend du mode d'activation des unités d'usinage et, selon le cas, sa valeur est déterminée ainsi :

1. **Le mode parallèle** : lorsque les unités sont activées de façon simultanée, le temps de travail de toute station est déterminé par l'unité d'usinage qui a le plus grand temps d'exécution parmi toutes celles qui l'équipent, *i.e.*

$$TS_k = \max_{b \in S_k} \{t_b\}, \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (1.4)$$

Le temps de cycle effectif de la ligne correspond au maximum des temps de travail des stations. Dans ce cas précis, T_0 est déterminé par l'unité ayant le plus grand temps d'exécution.

$$T = \max_{k=1,\dots,m} \{\max_{b \in S_k} \{t_b\}\} \quad (1.5)$$

2. **Le mode séquentiel** : les unités sont activées de façon séquentielle au sein de chaque station. Par conséquent, le temps de travail de chacune d'entre elles est égal au cumul des temps d'exécution de ses unités :

$$TS_k = \sum_{b \in S_k} t_b, \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (1.6)$$

On en déduit que :

$$T = \max_{k=1,\dots,m} \left\{ \sum_{b \in S_k} t_b \right\} \quad (1.7)$$

3. **Le mode mixte** : Nous désignons par s_j^k le j^{me} étage de la k^{me} station. Comme l'exécution de toutes les unités appartenant au même étage se fait en parallèle, le temps opératoire Ts_j^k de l'étage s_j^k est par conséquent déterminé par le plus grand temps d'exécution des unités de cet étage.

$$Ts_j^k = \max_{b \in s_j^k} \{t_b\}, \quad \forall k = 1, \dots, m \quad \forall j = 1, \dots, q_0 \quad (1.8)$$

Au sein d'une station, l'exécution séquentielle de ses étages, implique un temps de travail, que l'on note TS_k , qui est égal au cumul des temps de ses étages :

$$TS_k = \sum_{j=1}^{q_0} Ts_j^k, \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (1.9)$$

Tel que q_0 est le nombre maximum d'étages possibles dans une station.

Par conséquent :

$$T = \max_{k=1, \dots, m} \sum_{j=1}^{q_0} \max_{b \in s_j^k} \{t_b\} \quad (1.10)$$

À présent que nous avons examiné formellement les répercussions engendrées par le choix d'un mode d'activation sur le calcul du temps de cycle, nous décrivons, par la suite, les autres types de contraintes que nous prenons en compte.

1.5.5 Les contraintes

Nous considérons des contraintes qui décrivent des incompatibilités entre les unités d'usinage ne devant pas travailler sur le même poste de travail. Nous introduisons le terme **contraintes d'exclusion** pour y faire référence. Pour illustrer ces contraintes, nous prenons l'exemple d'une station qui a une charge électrique maximale à ne pas dépasser. Pour toutes les combinaisons d'unités d'usinage ayant un cumul de charge supérieure à cette limite, il faut introduire des contraintes interdisant leur affectation simultanée à une station quelconque.

Pour prendre en compte des impératifs de précision nécessitant l'exécution de certaines opérations sur la même station nous introduisons les **contraintes d'inclusion**. Par exemple, si une grande précision est requise pour la distance entre deux trous alors il devient impératif d'effectuer les deux opérations de perçage sur la même station. En particulier, si chaque trou est effectué sur une station distincte, les chances de parvenir à la précision requise seront fortement compromises en raison du transfert de la pièce entre les stations.

Par ailleurs, certaines opérations requièrent une exécution postérieure à l'accomplissement d'autres opérations. Ces contraintes définissent un ordre partiel entre l'ensemble des opérations. Il s'agit alors des **contraintes de précédence**. Par exemple, avant d'effectuer une opération de perçage, une encoche est, le plus souvent, requise afin de procéder au perçage sans dommage.

Une limite sur **la capacité de la ligne** en nombre de stations est également prise en compte. Celle-ci représente une limite sur l'espace disponible pour la mise en place de la ligne, comme elle peut représenter une charge totale à ne pas dépasser.

De même, **la capacité des stations** en termes d'unités supportables est également prise en considération. Ainsi, le nombre maximum d'emplacements, prévus par le constructeur, pour équiper les stations, peut également être intégré dans le modèle au moyen de ces contraintes.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les systèmes de production de façon générale, puis nous avons mis l'accent sur les lignes d'usinage de façon plus particulière car ce sont ces dernières qui nous intéressent. Nous avons introduit la problématique qui fait l'objet de notre étude et qui se pose pour les trois types de lignes abordées, à savoir : les lignes d'usinage dédiées, les lignes d'usinage flexibles et les lignes reconfigurables. Nous posons le problème comme la sélection d'un ensemble d'unités d'usinage pour fabriquer un produit donné en prenant en compte plusieurs types de contraintes et minimisant le coût total. Le présent problème, tel qu'il a été posé, n'a fait l'objet d'aucune étude au préalable, sa modélisation et sa résolution sont pourtant capitales au vu de l'importance des enjeux économiques. Dans cette thèse, nous proposons d'y apporter quelques réponses en abordant le problème avec des approches exactes en raison du gain potentiel qui peut être réalisé avec les solutions optimales.

À présent, nous allons introduire quelques méthodes d'optimisation afin de pouvoir présenter par la suite les travaux de la littérature que nous avons jugés proches de la problématique introduite dans le présent chapitre.