

Ateliers flexibles d'usinage

par **Michel JUBIN**

Responsable du Service « Études Avancées », Département Automatisation et Organisation de la Production, CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques)

1. Caractéristiques des ateliers flexibles	B 7 030 - 2
1.1 Historique	— 2
1.2 Définitions	— 2
1.2.1 Le concept de flexibilité	— 2
1.2.2 Les différents aspects de la flexibilité	— 3
1.3 L'usinage, domaine de prédilection des ateliers flexibles	— 3
1.4 Classification des systèmes flexibles	— 4
1.4.1 Le compromis productivité/flexibilité	— 4
1.4.2 Proposition d'une classification	— 4
1.5 Avantages et inconvénients des ateliers flexibles	— 5
2. Exemples	— 6
2.1 Exemple 1 : Atelier flexible de la SNECMA au Creusot (Saône-et-Loire)	— 6
2.2 Exemple 2 : la cellule flexible de travail du tube de Poirier SA	— 7
3. Conception des systèmes flexibles	— 8
3.1 Nécessité d'une démarche méthodique	— 8
3.2 La démarche de conception des cellules flexibles d'usinage proposée par le CETIM	— 9
3.2.1 Premier palier de la démarche ou phase qualitative : l'analyse globale de la production, son rôle dans la définition des structures types de cellules	— 9
3.2.2 2 ^e palier de la démarche ou phase quantitative statique : choix des matériels, dimensionnement, chiffrage	— 9
3.2.3 3 ^e palier de la démarche ou phase quantitative dynamique : simulation de fonctionnement, vérification des objectifs	— 10
3.2.4 4 ^e palier de la démarche ou évaluation économique	— 10
4. Conclusion	— 10
Références bibliographiques	— 12

Une évolution particulièrement importante des techniques de production a pris place vers la fin des années 60, caractérisée par l'avènement de l'**automatisation flexible** (§ 1.2.1).

Elle est le fruit de la **conjonction entre** :

- une évolution des besoins : marché de plus en plus diversifié, éclatement des variantes, petits lots... ;
- une évolution de l'offre : la machine-outil à commande numérique (MOCN) arrive dans son ère industrielle, les robots industriels apparaissent (le premier aux États-Unis en 1968), ainsi que les minicalculateurs industriels et les automates programmables (1969) ; les microcalculateurs sont arrivés plus tard (1978).

Dès son apparition, l'automatisation flexible de la production a été étroitement liée à l'usinage. Aujourd'hui encore, ce domaine reste prépondérant parmi les différentes réalisations en place.

En effet, d'une part **l'usinage** est de loin le procédé le plus employé en mécanique ; il est réalisé sur des machines-outils spécifiques vis-à-vis d'opérations, mais universelles, c'est-à-dire non liées à une pièce particulière : tours, fraiseuses, perceuses...

D'autre part **l'automatisation** de l'usinage est un souci de toujours. Elle met en jeu la fonction usinage proprement dite, ainsi que des fonctions annexes tout aussi importantes : transfert, stockage, chargement, positionnement, bridage, contrôle...

Avec l'automatisation flexible apparaît également la notion de **système** : des éléments de provenances diverses sont associés entre eux pour constituer un atelier flexible, d'où des difficultés :

- au niveau de la **conception** des futures installations : compatibilité des éléments, performance des communications, nécessité d'un maître d'œuvre ;
- en **exploitation** : fiabilité du système, supervision de l'ensemble, formation du personnel.

Cette notion de système préfigure **l'intégration**, dont le but est d'améliorer la circulation des données par la réalisation de nouvelles liaisons entre plusieurs fonctions informatisées, sans se limiter à l'atelier. L'objectif est de décloisonner, par étapes, une entreprise industrielle afin d'améliorer l'échange des données entre ses différents services : conception, fabrication, maintenance, gestion de production, gestion administrative et commerciale. Il s'agit de définir une informatisation cohérente, planifiée dans le cadre d'un schéma directeur, en visant l'unicité et le partage des données. C'est le nouveau défi des années 90.

Ce sujet, déjà publié dans la rubrique Automatique dans le traité Informatique industrielle, intéresse certainement le mécanicien. C'est pourquoi nous le publions aussi dans le présent volume.

1. Caractéristiques des ateliers flexibles

1.1 Historique

Le premier atelier flexible voit le jour aux États-Unis en 1967 ; d'autres réalisations suivent puis s'étendent au Japon (1970) et à l'Europe.

Le domaine concerné est au départ essentiellement le fraisage de pièces de type carter, pour l'aviation, le machinisme agricole, l'armement ou la machine-outil... Ce sont en effet des pièces produites en petites et moyennes séries, qui sont parfaitement adaptées à la technologie alors disponible (centres d'usinage à commande numérique, palettes et convoyeurs), et leur forte valeur ajoutée permet de contribuer à la rentabilité de l'installation.

Le développement est ensuite rapide dans les années 80, quoique dans le même temps la notion de **cellule** (cf. (§ 1.4)) remplace peu à peu celle **d'atelier** : en effet, l'atelier demeure une installation très onéreuse (de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de francs jusqu'à plus de 100 MF) et nécessite une étroite adéquation entre une production identifiée et stable dans le temps, bien que diverse, et les moyens mis en œuvre. Par ailleurs, d'autres évolutions se manifestent :

■ les progrès du **robot industriel** ouvrent la voie à de nouvelles applications :

- tournage en usinage ;
- constitution de cellules flexibles pour d'autres procédés (peinture, soudage, parachèvement, assemblage, palettisation) ;
- les développements de la **commande numérique (CN)** s'étendent à d'autres domaines que l'usinage, ouvrant là aussi la voie aux ateliers flexibles :
- découpe (poinçon, laser, jet d'eau) ;
- cintrage ;
- usinage par électro-érosion (UEE) ;
- pliage ;
- traitement de surfaces ;

■ le **champ d'application** des ateliers flexibles dépasse la mécanique : travail du bois, du cuir...

1.2 Définitions

1.2.1 Le concept de flexibilité

« **Atelier flexible** » est la traduction plus ou moins heureuse, mais communément adoptée, du vocable anglais « **Flexible Manufacturing System** », souvent abrégé en **FMS**. En donner une définition en français est assez difficile, celle établie par M. Pruvost (École Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suisse) contient les points importants.

« Un atelier flexible permet la production **automatique** de pièces de types **divers** et en quantités **variables**. Les opérateurs n'interviennent **pas directement** dans le processus de fabrication et limitent essentiellement leurs interventions à l'entretien. L'ordonnancement de la production est géré par un **système informatique** ».

Le concept de flexibilité est issu de quelques constats : de plus en plus, les lois du marché imposent un certain nombre de contraintes aux produits industriels, aussi bien d'ailleurs aux biens d'équipement qu'aux produits de grande consommation. Ces contraintes doivent être prises en compte au niveau de la production, de son organisation et des moyens à mettre en œuvre pour l'assurer.

■ **Les produits ont notamment une durée de vie** qui tend à se raccourcir ; la concurrence incite en effet à modifier plus souvent les produits existants ou à les remplacer par d'autres, plus performants ; par ailleurs, la tendance est de proposer à la clientèle plusieurs variantes de produits de base ou des options. Ces diverses contraintes se traduisent par le fait qu'il est de plus en plus rare d'avoir à fabriquer un seul modèle d'un produit qui reste figé pendant plusieurs années.

Enfin, le souci de **réduire les frais financiers liés aux stocks**, et l'introduction dans les entreprises de systèmes de gestion de production pour tendre notamment vers une production « **juste à temps** » ont pour conséquence de conduire à fractionner celle-ci, par lancement de **petits lots** répétitifs, en fonction des besoins.

Pour toutes ces raisons, les moyens de production doivent être plus flexibles, c'est-à-dire susceptibles d'être facilement réadaptés et réaffectés à des fabrications variant dans le temps, à l'échelle de la journée de travail dans certains cas, à court terme (le mois) ou à moyen terme (jusqu'à l'année) le plus souvent.

Dans l'optique de l'automatisation des techniques de fabrication, cette contrainte de flexibilité condamne *a priori* les solutions du type machine spéciale ou machine automatique à cycle modifiable par des réglages mécaniques généralement longs à réaliser, mais favorise au contraire des **solutions programmables** s'appuyant sur l'**informatique industrielle** et la **commande numérique des machines**.

En résumé, tout l'art de l'automatisation flexible consiste à réaliser le meilleur compromis possible entre la productivité de l'automatisation classique (mais rigide) et la souplesse d'adaptation des tâches manuelles (figure 1).

1.2.2 Les différents aspects de la flexibilité

La notion de flexibilité est loin d'être monolithique. En particulier, il faut distinguer deux grandes approches qui peuvent d'ailleurs coexister au sein d'une même installation :

- la flexibilité capacitaire (« **flexibilité-volume** »), qui consiste à pouvoir absorber des variations de volume de production sans pénaliser les délais ; elle est essentiellement obtenue par des équipements en surnombre, mais aussi par la banalisation (« **standardisation** ») des équipements ;
- la flexibilité de diversification (« **flexibilité-variété** »), qui consiste à pouvoir s'adapter à des variantes des produits réalisés ; dans ce cas, on peut encore distinguer de nombreuses facettes, selon l'horizon auquel on se réfère :

— **immédiat** :

- insensibilité aux pannes (redondance, interchangeabilité des matériels) ;

— **court terme** :

- pièces différentes réalisées en petits lots,
- imbrication des gammes (réduction des délais de production, meilleur engagement des machines),
- variantes de pièces exécutées « ensemble » (notion de collection, diminution des stocks) ;

— **moyen terme** :

- modification dans le temps du (des) produit(s) ;

— **long terme** :

- intégration d'un produit nouveau,
- réemploi du matériel (autre site, autre production).

Il est à noter que la plupart de ces aspects de la flexibilité sont indissociables des notions d'engagement machine, délai de fabrication, en-cours, mais les liens qui les unissent sont loin d'être simples, et peuvent aboutir dans certains cas à des conclusions contradictoires : par exemple, la flexibilité capacitaire implique un sous-engagement des machines, alors qu'au contraire la flexibilité de diversification à court terme cherche à maximiser cet engagement.

De plus, les différents types d'installations modernes de production possèdent une aptitude différenciée à répondre aux impératifs de productions variées, aptitude qui dépend non seulement de leur technologie, mais aussi de leur complexité, et donc de leur coût.

Dans la pratique, plusieurs des aspects de la flexibilité évoqués précédemment peuvent être nécessaires et recherchés lors de l'établissement du cahier des charges d'un système automatisé de production.

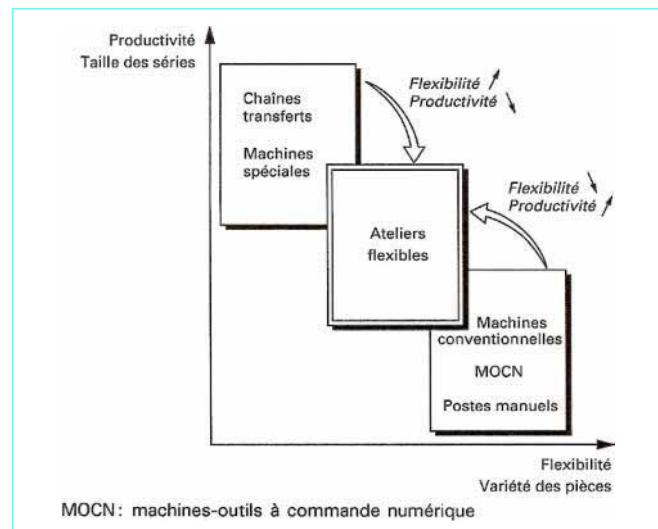


Figure 1 – L'atelier flexible, compromis entre flexibilité et productivité

1.3 L'usinage, domaine de prédilection des ateliers flexibles

Parmi l'ensemble des procédés de fabrication, notamment ceux utilisés pour le travail et la mise en forme des métaux dans les industries mécaniques, c'est certainement **l'usinage** qui a donné et continue à donner lieu au plus grand nombre et à la plus grande variété d'applications industrielles du concept d'automatisation flexible.

Cela tient à diverses caractéristiques de ce procédé, qui sont particulièrement favorables comme le montrent les descriptions ci-dessous :

— l'usinage procède par génération de la forme à réaliser obtenue par le mouvement relatif d'un outil coupant par rapport à la pièce à usiner ; la commande numérique des machines-outils permet de réaliser automatiquement ces mouvements et de programmer les trajectoires et cycles correspondants des outils et des machines ; de ce fait, le nombre de pièces différentes réalisées par simple changement de programme sur une MOCN est très élevé ;

— les procédés d'usinage utilisent généralement des outils standards dédiés à tel ou tel type d'opération (dressage, chariotage, rainurage, etc.), qu'il est relativement facile de stocker et de changer automatiquement sur les machines-outils au moyen de magasins et changeurs d'outils pilotés par la commande numérique ou par un automate programmable qui lui est associé ;

— les commandes numériques modernes de machines-outils permettent de stocker en mémoire plusieurs programmes-pièces et les liaisons informatiques [téléchargement, liaisons DNC (*)] permettent de modifier le contenu mémoire facilement ; de la même manière, les magasins d'outils des machines actuelles ont une capacité telle (typiquement 12 à 24 outils pour un tour, plusieurs dizaines à 100 outils sur les centres d'usinage (CU)) qu'il est possible de préparer et de stocker les outils nécessaires à la fabrication de plusieurs types de pièces ; les conditions requises pour l'usinage automatique de pièces différentes par petits lots sont ainsi réunies ;

(*DNC : *direct numerical control* : commande numérique directe.

— enfin, les techniques modernes de manutention et de stockage de pièces, comme la robotique, les carrousels de palettes programmables, les chariots autoguidés, rendent possible l'automatisation programmable des fonctions connexes, en particulier le chargement/déchargement des machines-outils.

■ Au contraire, la plupart des **autres procédés de fabrication** présentent des caractéristiques bien moins favorables que celles de l'usinage dans l'optique de l'automatisation flexible. C'est le cas notamment de techniques de forage ou de moulage, comme le découpage/emboutissage, la forge et l'estampage, la fonderie, l'injection des matières plastiques. En effet, si les cycles des machines et presses correspondantes sont généralement simples et faciles à automatiser, il en va tout autrement du problème du **changement des outillages**.

Ces procédés nécessitent des outillages complexes (moules, matrices, poinçons, etc.) qui sont des outillages de forme spécifiques des pièces à réaliser. Leur étude et leur réalisation demandent des délais importants ; en cas de nouvelles fabrications à lancer, ils ne sont pas disponibles immédiatement, comme peuvent l'être les outils de coupe standards utilisés en usinage. Par ailleurs, ces outillages étant généralement volumineux et lourds, l'automatisation de leur stockage et de leur changement sur les machines est très difficile, voire peu réaliste à envisager. Pour ces raisons, l'automatisation flexible n'a pu se développer comme en usinage, et les efforts portent surtout sur les techniques de conception des outillages pour faciliter leur changement et leur réglage manuels (méthode SMED ou *Single Minute Exchange Die* : changement d'outillages (matrices) en une minute).

1.4 Classification des systèmes flexibles

L'automatisation flexible de l'usinage peut prendre différentes formes dans la pratique : toutes ont en commun de faire appel à la machine-outil à commande numérique, mais elles se distinguent les unes des autres, en fonction :

- ① du nombre de machines associées,
- ② des caractéristiques des productions auxquelles les systèmes ainsi réalisés sont destinés,
- ③ du mode d'organisation et de pilotage des machines,
- ④ des équipements de stockage-manutention qui les environnent.

1.4.1 Le compromis productivité/flexibilité

On peut distinguer plusieurs types de systèmes flexibles d'usinage, qui représentent chacun une forme de compromis entre deux qualités qu'il est impossible de concilier totalement : d'une part, le degré d'automatisation qui traduit leur **productivité** et, d'autre part, la **flexibilité** qui rend compte de leur aptitude à répondre aux impératifs de productions variées.

De cette manière, chacun d'eux peut être représenté sur un graphique productivité/flexibilité (figure 2) par rapport à deux références extrêmes que sont :

— les machines spéciales et plus particulièrement les machines-transferts à haut niveau d'automatisation et à forte productivité mais à flexibilité quasi nulle ;

— les machines-outils conventionnelles non automatisées et par conséquent peu productives mais, par contre, aisément adaptables à des fabrications différentes, moyennant intervention humaine, dans la limite de leurs capacités (dimensions, puissance, etc.).

Ce cas extrême souligne bien que le maximum de flexibilité est obtenu avec des moyens non automatisés, conduits par des opérateurs qui peuvent effectuer toutes les opérations nécessaires liées aux changements de fabrication. Cependant, quand on évoque les systèmes flexibles, il s'agit implicitement des systèmes automatisés flexibles.

Par ailleurs, la machine à commande numérique constitue un premier niveau d'automatisation programmable du procédé, tout en étant aussi flexible qu'une machine conventionnelle.

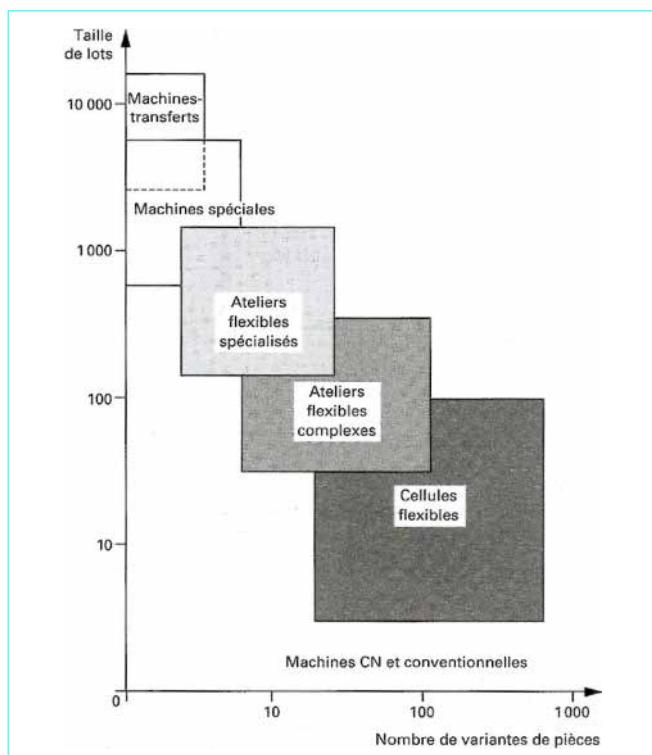


Figure 2 – Classification des systèmes flexibles

1.4.2 Proposition d'une classification

En se déplaçant sur le graphique productivité / flexibilité (figure 2) des systèmes les plus productifs vers ceux qui sont les plus flexibles, on peut identifier trois grandes catégories de systèmes : les ateliers flexibles spécialisés, les ateliers flexibles complexes, les cellules ou îlots flexibles. La plupart des réalisations industrielles entrent dans l'une ou l'autre de ces catégories.

1.4.2.1 Les ateliers flexibles spécialisés ou lignes-transferts flexibles

Ces ateliers sont conçus pour la production de variantes dimensionnelles de pièces d'une même famille sur le plan fonctionnel et morphologique. Ces pièces constituent ce que l'on appelle **une famille de pièces « fermée »** (figure 3) ; à cette famille correspond une gamme unique, c'est-à-dire une succession d'opérations bien déterminée. De ce fait, les pièces passent successivement sur les différentes machines de l'atelier disposées en ligne dans l'ordre où elles interviennent.

Les machines peuvent être banalisées ou spéciales, mais programmables. Le pilotage de l'atelier est facilité puisque sa structure, calquée sur le flux des produits, est **linéaire** et son organisation est de type **séquentiel** pour l'acheminement des pièces, sans possibilité de conflits de priorité. Le nombre de machines dépend de la famille de pièces fabriquée, mais il est généralement compris entre quatre et dix unités.

1.4.2.2 Les ateliers flexibles complexes

Regroupant plusieurs (cinq à vingt) machines à commande numérique spéciales ou standards associées à des systèmes de transfert de pièces et de chargement/déchargement totalement ou partiellement automatisés selon les cas, ces **ateliers** sont destinés à la production de pièces variées du point de vue des formes et des dimensions, constituant ce que l'on appelle **une famille de pièces « ouverte »** (figure 4).

Aux divers types de pièces de la famille correspondent des **gammes** différentes. Ces gammes ont cependant certaines opérations en commun, de telle façon qu'une machine donnée du système puisse intervenir dans la fabrication de plusieurs pièces de la famille. Cette diversité des pièces et des gammes, ainsi que les possibilités de combinaisons qui en résultent pour l'affectation des pièces aux machines de l'atelier, sont mises à profit pour optimiser l'engagement des machines. Cela suppose un **pilotage en temps réel de l'atelier** : dès qu'une machine se déclare disponible, le calculateur recherche une pièce, parmi celles qui sont en attente, qui doit passer sur cette machine. En cas de panne d'une machine, un mode de production dégradé est généralement possible avec les machines restantes.

La progression des pièces dans un atelier flexible de ce type n'est pas pré-déterminée. Le logiciel de commande doit assurer une véritable **gestion en temps réel** en fonction de règles (régissant notamment les priorités) préalablement établies par les concepteurs ; il ne s'agit donc pas seulement d'assurer une commande séquentielle des cycles automatisés des machines et équipements de l'atelier.



Figure 3 – Famille de pièces « fermée »

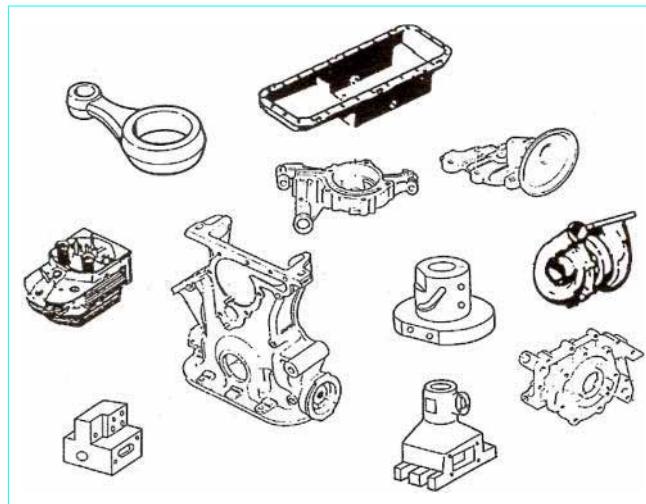


Figure 4 – Famille de pièces « ouverte »

1.4.2.3 Les cellules ou îlots flexibles d'usinage

Par rapport aux ateliers flexibles, les **cellules** sont des systèmes moins complexes, regroupant un plus petit nombre (deux ou trois) de machines à commande numérique, qui sont presque toujours des machines standards issues des catalogues des fournisseurs. À ces machines sont associés, comme pour les ateliers, divers équipements assurant de manière automatique les fonctions de stockage, transfert, chargement/déchargement des pièces brutes et finies, contrôle.

Les machines constituant les cellules flexibles sont associées les unes aux autres en fonction d'un **ensemble d'opérations à réaliser** indépendamment de l'appartenance des pièces usinées à une famille de pièces bien déterminée. Au contraire, pour les ateliers flexibles, cette association est liée à la notion d'opérations spécifiques d'une famille de pièces, qu'il s'agisse de familles ouvertes ou fermées.

Ainsi, une **cellule flexible est caractérisée par la nature des opérations qu'elle permet de réaliser, alors qu'un atelier flexible est dédié à une famille de pièces.**

La classification précédente a seulement pour objectif de situer les divers niveaux d'automatisation flexible, d'une part les uns par rapport aux autres, d'autre part par rapport aux machines à commande numérique et aux machines-transferts. La cellule flexible représente l'un de ces niveaux. Toutefois, dans la réalité, la situation peut s'avérer un peu plus complexe ; certains systèmes flexibles, exploités dans l'industrie, ont en effet des caractéristiques qui les apparentent à la fois aux cellules et à certaines formes d'ateliers flexibles.

1.5 Avantages et inconvénients des ateliers flexibles

Du fait de leur situation de compromis, les ateliers flexibles présentent toute une palette d'avantages et d'inconvénients ; de plus, en fonction d'une situation particulière d'entreprise et des objectifs poursuivis, certains avantages peuvent basculer du côté des inconvénients et vice versa.

Un des exemples les plus frappants est le niveau même de flexibilité d'une installation donnée qui est en fait relatif à la situation antérieure de l'entreprise ; venant d'un mode de production du type transfert, on trouvera plus de flexibilité – et sans doute moins de productivité – dans le système flexible. À l'inverse, venant d'un mode de production fortement manuel, on trouvera **moins de flexibilité** – mais certainement plus de productivité – dans le même système flexible.

Quoiqu'il en soit, on peut dresser une liste d'éléments qu'il convient de bien examiner avant de se lancer dans une étude (encadré 1).

Il importe donc de bien identifier tous les éléments intervenant lors de la conception d'un atelier flexible afin d'en dresser un bilan objectif avant de prendre la décision de passer à l'acte.

Une enquête statistique pratiquée par Ingersoll Engineers en 1981 (*) portant sur une trentaine de réalisations a donné globalement les résultats suivants :

- engagement des machines : + 30 % ;
- réduction des délais : - 40 % ;
- diminution des prix de revient : - 12 % ;
- réduction de main-d'œuvre directe : - 30 %.

(*) À notre connaissance, il n'y a pas d'enquête plus récente ; ces chiffres sont toujours d'actualité.

Encadré 1 – Les ateliers flexibles : avantages et inconvénients

■ Au plan des **avantages**, citons :

- adaptation rapide aux variations du marché, aussi bien en quantité qu'en nature ;
- meilleure qualité, et constance de la qualité, dues à l'automatisation ;
- satisfaction du client, grâce à la livraison au bon moment du produit voulu ;
- meilleurs liens entre la fabrication et la suite du process, en particulier l'assemblage/montage ; possibilité de travailler en flux tendu ;
- réduction des stocks et des en-cours ;
- meilleur contrôle de la production : mise à disposition d'informations en temps réel ;
- meilleur engagement des équipements ;
- réduction des outillages (en partie grâce à l'emploi de MOCN) ;
- réduction de la main-d'œuvre directe (apport de l'automatisation) ;
- possibilités de liaisons informatiques avec des systèmes de conception et gestion de production assistées par ordinateur (CAO, GPAO)... ;
- augmentation du potentiel de production ;
- réduction des frais généraux (moins d'attentes, de pertes, ...).

■ Au chapitre des **inconvénients**, on citera :

- coût élevé de réalisation (et donc importance du risque financier) ;
- complexité, sophistication ;
- incidence lourde des aléas dans certains cas (regroupement d'opérations sur un même moyen) ;
- évolution limitée dans le temps, due à une vue insuffisante du futur au moment de la conception ;
- nécessité de personnel qualifié.

- planning - début des études : janvier 85
- première pièce : décembre 87
- cadence nominale : 2^e semestre 89.

Situé au cœur de l'usine, l'atelier flexible est un ensemble de machines conventionnelles entièrement automatisé, piloté par un système informatique élaboré (figure 5 et 6). Il est composé de 12 tours verticaux à CN, 4 fraiseuses-pointeuses à CN. Les machines, magasins, postes de palettisation, sont desservis par quatre chariots filoguidés. Les machines sont alimentées en outils (130 types différents) par un système automatisé spécifique (figure 7).

Sur chacune des machines, des opérations différentes, portant sur des pièces différentes, peuvent être enchaînées sans ordre préétabli. Chacune de ces machines est pilotée automatiquement par un système informatique, qui gère notamment les déplacements des pièces par chariots filoguidés, les changements d'outils, ainsi que les contrôles dimensionnels automatiques.

Ce système apporte une grande souplesse dans l'utilisation, assure un gain de délai important, en même temps que la disponibilité optimale des pièces à produire en fonction des besoins.

Un effort très important de formation a été fait (en moyenne 450 h par personne) et a contribué à la réussite du projet.

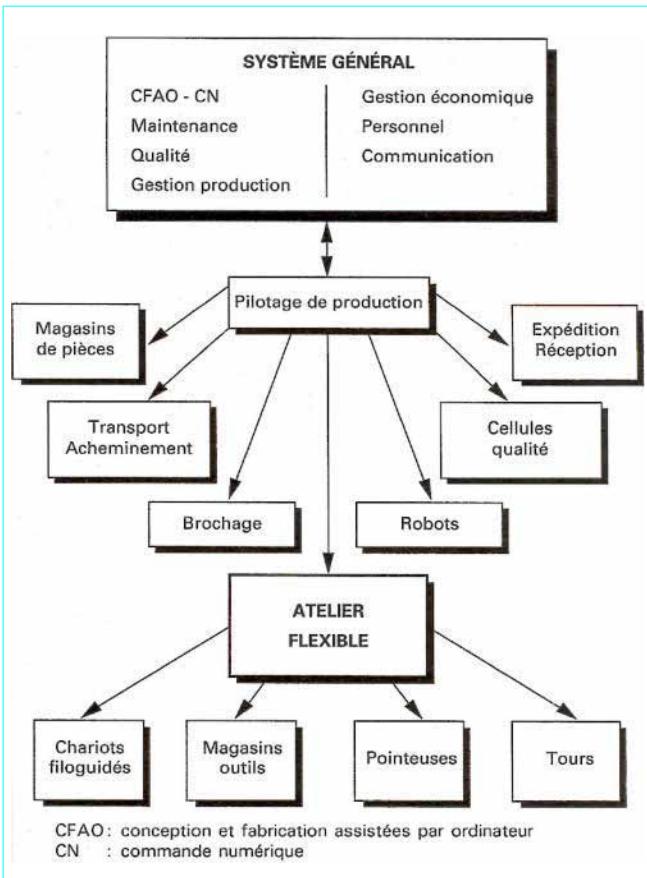


Figure 5 – Structure de l'établissement SNECMA du Creusot
(source : SNECMA)

2. Exemples

2.1 Exemple 1 : Atelier flexible de la SNECMA au Creusot (Saône-et-Loire)

■ Les produits

- disques de turbine équipant des turboréacteurs civils ou militaires ;
- pièces majeures du moteur : contraintes élevées (température > 600 °C, vitesse de rotation de 10 000 à 20 000 tr/min, effort généré par chaque aube > 1 000 daN) ;
- matière : superalliages difficiles à usiner ;
- 18 types de pièces réparties en trois familles ;
- gammes de fabrication complexes, avec 22 opérations réparties sur 10 procédés différents ;
- cadence : 180 pièces/mois.

■ Les objectifs

- ramener le cycle de fabrication de six mois (moyens conventionnels) à un mois ;
- réduire le coût de production de 20 % ;
- contribuer à l'image de marque de la SNECMA.

■ La réalisation

C'est d'abord une usine nouvelle et intégrée, étudiée avec une approche globale :

- budget total : 400 MF ;

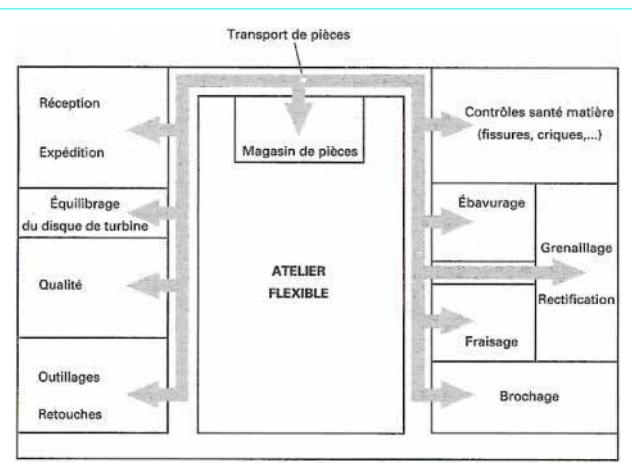


Figure 6 – Intégration de l'atelier flexible au site (source : SNECMA)

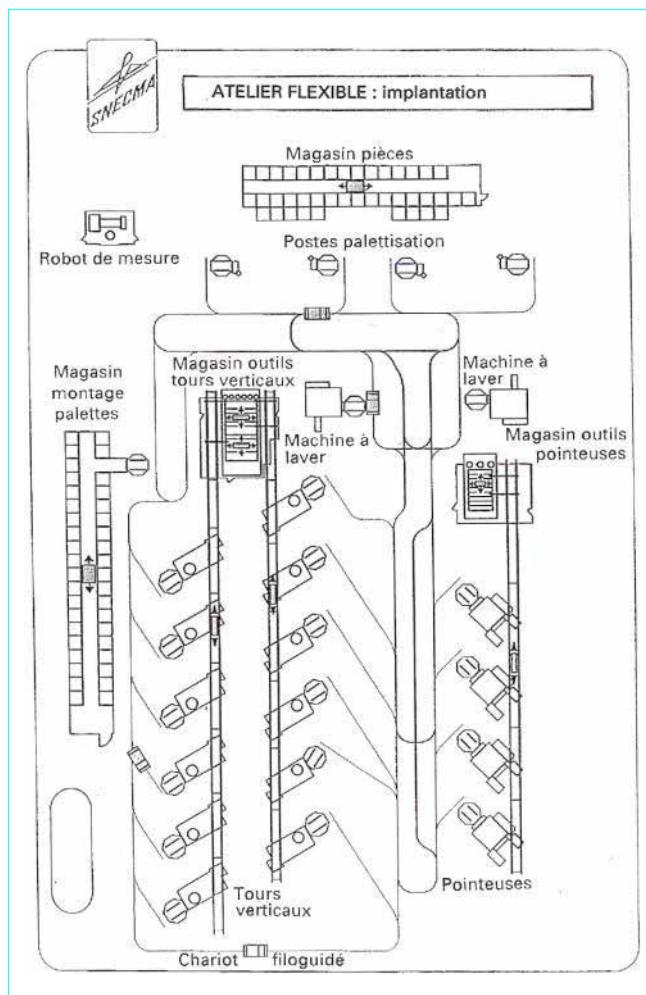


Figure 7 – Implantation de l'atelier flexible de la SNECMA
(source : SNECMA)

2.2 Exemple 2 : la cellule flexible de travail du tube de Poirier SA

La société Poirier SA (à Luynes, Indre-et-Loire) fabrique et commercialise différents types de matériaux médico-chirurgicaux, et en particulier une gamme complète de fauteuils roulants pour handicapés physiques. Cette gamme comprend des matériaux classiques pouvant être livrés sous différentes versions et équipés de nombreuses options, mais également des modèles spécifiques destinés à la pratique de sports (basket, tennis, ...) ou des modèles à propulsion électrique.

Les fauteuils médicaux sont constitués en grande partie de tubes assemblés par soudage, puis chromés (figure 8). Ces tubes subissent plusieurs usinages différents, parmi lesquels un tronçonnage-ébavurage pour mise à longueur, un emboutissage ou un grugeage des extrémités (pour le raccordement sur un autre tube), un cintrage (1 ou 2 coude), le perçage de plusieurs trous pour la fixation des accessoires (accoudoir par exemple). Le diamètre de ces tubes varie entre 15 et 25 mm, alors que la longueur est toujours inférieure à 1 m.

La gamme de chaque pièce peut comporter entre une et quatre opérations parmi celles citées ci-dessus.

Les pièces les plus simples (absence de cintrage) et produites en grandes séries sont usinées par une ligne-transfert entièrement automatisée. Les autres sont fabriquées manuellement, opération par opération, avec stockage intermédiaire. La charge totale pour cette dernière fabrication représente l'équivalent de 4 opérateurs.

En vue d'augmenter la productivité de l'atelier, la société Poirier a envisagé d'implanter un îlot flexible pour la fabrication de ces pièces. Elle a fait appel au CETIM pour qu'il l'assiste dans la conception de cette cellule, fournit un bilan technico-économique détaillé ainsi qu'un cahier des charges précis pour la consultation des fournisseurs.

■ Analyse du problème et solutions d'automatisations envisageables

L'étude s'est déroulée en suivant la démarche décrite dans le paragraphe 3.

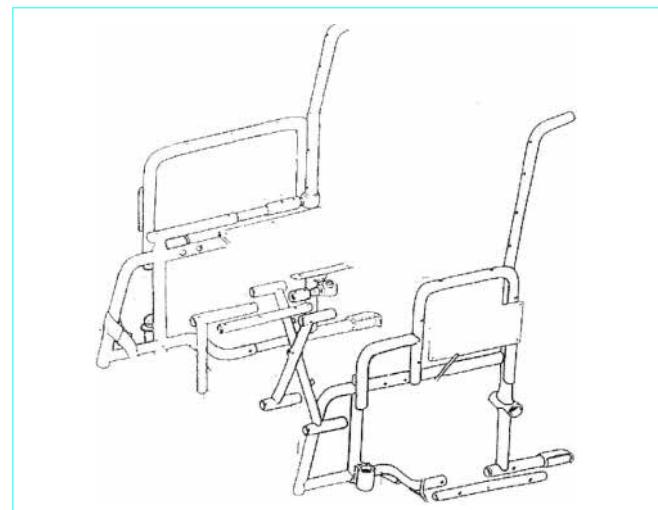


Figure 8 – Un exemple des différentes pièces à produire
(source : Poirier SA)

L'analyse des données de production est une phase essentielle dans la conception de l'îlot flexible. Les différentes pièces à produire sont examinées : caractéristiques morphodimensionnelles, gamme, taille et fréquence des lots. Les objectifs de l'entreprise en matière de gestion de production sont également pris en compte.

Après une fine analyse de toutes ces caractéristiques, les pièces ont été regroupées en **sept familles** définies principalement à partir de critères liés à la gamme de fabrication (tableau 1). Certaines pièces ont été éliminées, en raison de quantités trop faibles, ou leur gamme a été modifiée. Un calcul de charge a été effectué pour chacune des familles retenues en vue du dimensionnement de l'îlot.

Tableau 1 – Les familles de pièces retenues et leurs gammes de fabrication

Familles	Cintrage	Grugeage	Perçage	Emboutissage	(%)
F1	x	x	x		2
F2	x		x		15
F3	x	x			18
F4		x	x		2
F5		x			17
F6	x				20
F7				x	26

L'analyse des différents postes (type de trajet de pièces, amplitude, complexité) impose le choix d'un robot programmable. L'implantation de la cellule est alors étudiée en détail sur un système de simulation 3D, et l'on vérifie que les objectifs demandés soient atteints : accessibilité aux machines, espace occupé au sol, temps de cycle maximal (figure 9).

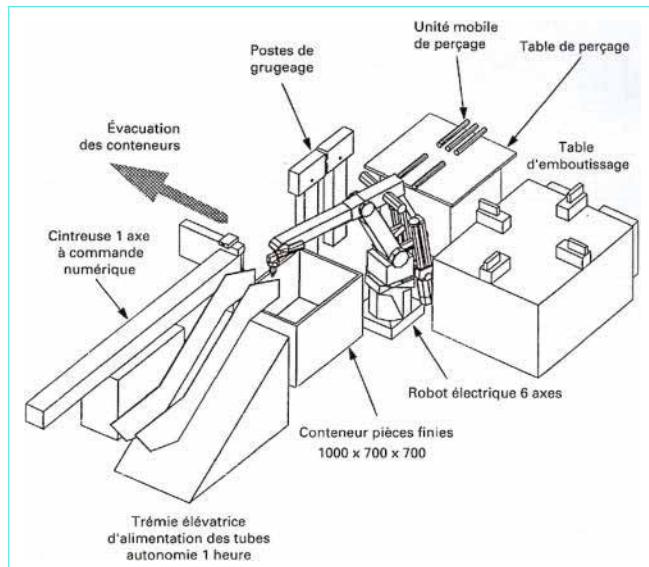


Figure 9 – Étude en simulation 3D du projet de cellule flexible

■ L'installation réalisée par la société Poirier SA

Le choix des responsables de la société Poirier s'est porté sur un robot polyarticulé AFMA R3 à 6 axes électriques, équipé d'un préhenseur simple, avec deux mors à déplacement parallèle. L'alimentation est assurée par une goulotte gravitaire réalisée en interne, d'une autonomie de deux heures. Les tubes finis sont déposés par le robot, dans un panier métallique. Les modifications des machines ont été réalisées également en interne. La presse mécanique de grugeage a été remplacée par deux potences hydrauliques.

Le budget total de l'installation a été de 1 MF, comprenant les frais d'étude, la fourniture de l'ensemble de manipulation et son intégration, la formation du personnel, la fourniture d'une machine de grugeage, la modification des machines et la fabrication des outillages spécifiques.

Le fonctionnement en deux équipes de l'îlot permet de produire la totalité des pièces retenues. Le délai de retour d'investissement (cf. § 3.2.4) se situe entre 2,5 et 3 ans.

Il est à noter que la motivation des responsables de la société Poirier, aidés par la collaboration du CETIM au projet, a permis de réduire considérablement le délai de mise en œuvre. Sept mois seulement se sont déroulés entre le début de l'étude et la mise en service de l'ensemble automatisé.

3. Conception des systèmes flexibles

3.1 Nécessité d'une démarche méthodique

Un atelier flexible est un véritable système de production ; il ne peut s'agir en conséquence d'un produit proposé sur catalogue par des fournisseurs, comme le sont par exemple des machines.

En revanche, c'est un ensemble spécifique à concevoir en fonction d'un besoin de production donné et à réaliser au moyen d'équipements et de sous-ensembles divers en provenance de fournisseurs différents. Ces sous-ensembles sont à choisir les uns par rapport aux autres en fonction de l'objectif visé. Il s'agit par conséquent d'un travail d'intégrateur ou d'architecte en systèmes de production. Or, cela est fait la plupart du temps par les constructeurs de machines qui, de plus en plus, afin de répondre aux demandes de leurs clients, deviennent des fournisseurs de systèmes de production.

Diverses sociétés d'ingénierie sont, elles aussi, susceptibles d'étudier et de réaliser des systèmes flexibles, en choisissant sur le marché les machines et les divers matériels nécessaires.

Mais tout commence par l'analyse du besoin à satisfaire dans l'entreprise utilisatrice. Le nombre et la nature des machines à associer, le choix des techniques de magasinage et de chargement des machines, dépendent étroitement des pièces qu'il est prévu de fabriquer : formes, dimensions, opérations de base de la gamme, quantités annuelles et temps d'opération prévisionnels par type, taille des lots, etc.

Or, en général, l'exploitation d'un système flexible dans une entreprise a pour objectif de n'assurer qu'une partie de la production de celle-ci, des moyens plus classiques continuant à être exploités parallèlement. Tout le problème est, par conséquent, de déterminer judicieusement, parmi les pièces fabriquées dans l'entreprise, celles qui pourraient justifier la mise en place d'une installation flexible et de tirer le meilleur parti possible des avantages d'un tel système.

Cela suppose donc une véritable analyse de la production, de manière à identifier les pièces les mieux adaptées à la future installation. Cette analyse doit comporter nécessairement les phases suivantes :

■ une **phase qualitative**, au cours de laquelle on essaie de constituer des regroupements de pièces en fonction des analogies qu'elles peuvent présenter sur le plan des formes, des dimensions et des opérations qu'elles doivent subir. À l'issue de cette phase, il est possible de définir qualitativement des **structures types de cellules**, c'est-à-dire les types de machines à associer ;

■ une **phase quantitative** qui permet de s'assurer :

— que les pièces précédemment sélectionnées constituent une **charge annuelle acceptable** pour les différents types de machines prédefinies ;

— que la ou les solutions définies sont **acceptables** sur les plans technique et économique.

La démarche, portant sur l'analyse de production et allant jusqu'à l'établissement du cahier des charges de l'installation flexible, est primordiale pour l'entreprise puisqu'elle conditionne la définition technique de l'investissement à réaliser en adéquation avec les besoins. Il est nécessaire, pour la mener à bien, de s'appuyer sur une démarche structurée.

3.2 La démarche de conception des cellules flexibles d'usinage proposée par le CETIM

Le CETIM a développé une démarche pour concevoir les cellules flexibles d'usinage, laquelle peut être assimilée à un canevas dont le rôle est de guider le concepteur dans sa progression et de l'assister dans ses choix, en vue d'aboutir à la solution.

Ce canevas est décomposable grossièrement en quatre paliers (figure 10), correspondant à une phase d'analyse – démarche qualitative, suivie d'une phase d'évaluation – démarche quantitative.

■ La **phase d'analyse** consiste à regrouper les pièces à fabriquer en familles homogènes d'après un ensemble de critères propres à la production flexible.

■ La **phase d'évaluation** a ceci de particulier qu'elle s'adresse à un ensemble de cellules « candidates », au départ assez floues et dont la définition s'améliore au fur et à mesure du franchissement autorisé des paliers, pour arriver à la solution retenue. On passe ainsi progressivement de la notion de structure de cellule, définie uniquement par des types de machines (par exemple : tour, rectifieuse), à la description détaillée de solutions faisant apparaître des quantités, modèles et capacités de machines bien déterminés.

Les paliers sont constitués d'étapes successives, dont certaines peuvent remettre en cause les choix faits au cours de l'étape précédente. Les paragraphes suivants détaillent ces différents paliers.

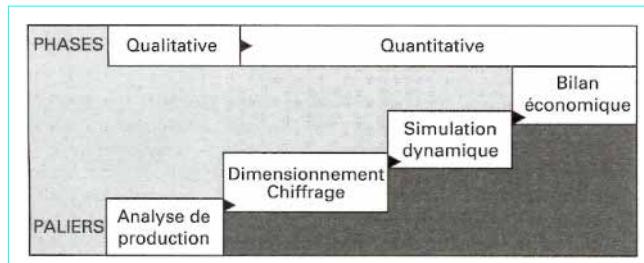


Figure 10 – Paliers de la démarche de conception d'un système flexible

3.2.1 Premier palier de la démarche ou phase qualitative : l'analyse globale de la production, son rôle dans la définition des structures types de cellules

Une structure type de cellule est définie par des **types de machines**, sans préjuger ni du modèle ni du nombre.

Pour la définir, il faut procéder, dans un premier temps, à une analyse globale de la production concernée, de façon à classer les pièces en familles usinables sur un même ensemble de production automatisé. Pour cela, il faut dresser une liste exhaustive des critères intervenant dans la fabrication, puis examiner les regroupements possibles de pièces à partir de la sélection de telle ou telle combinaison de critères.

3.2.1.1 Critères et méthodes de classement des pièces

Lorsque les familles de pièces ne sont pas évidentes, il faut généralement, pour définir des familles usinables sur un même système de production, procéder à un **classement morphodimensionnel des pièces** par codification puis par tri. Les codes utilisés, par exemple CETIM-PMG, doivent être conçus pour classer les pièces en fonction d'**analogies** qu'elles peuvent présenter entre elles **sur le plan morphodimensionnel**. En effet, des pièces présentant ces analogies-là ont très souvent le même type de gamme d'usinage dans un processus de fabrication donné.

Ainsi, le code doit faire apparaître la forme générale des pièces (de révolution, prismatiques), la morphologie extérieure (présence ou non d'étagelements, de filetages,...), la morphologie intérieure (pièces creuses), les dimensions, la présence ou non d'éléments de forme additionnels (rainures, gorges), mais aussi les quantités annuelles à produire, les tailles de lots de lancement, le matériau constitutif, le poids, etc.

3.2.1.2 Outils informatiques utilisés pour le tri des pièces

Les pièces étant codées, il faut réaliser une succession de tris multicritères pour faire apparaître des groupements de pièces présentant des analogies entre elles, par exemple même forme extérieure, mêmes classes de dimensions, mêmes éléments de forme additionnels.

On est ainsi amené à gérer un fichier de pièces comportant de nombreuses données. Des logiciels du type gestionnaire de bases de données relationnelles, avec possibilité d'effectuer des opérations arithmétiques sur des données numériques, répondent bien à ce type d'application (dBase IV, 4^e Dimension, Oracle). Il faut généralement effectuer plusieurs tris successifs en fonction de diverses hypothèses de regroupement des pièces en familles.

À l'issue de cette première phase de la démarche, les pièces sont **classées en familles** présentant des gammes d'usinage simplifiées analogues, donc nécessitant les mêmes types de moyens de production.

3.2.2 2^e palier de la démarche ou phase quantitative statique : choix des matériels, dimensionnement, chiffrage

3.2.2.1 Première estimation du potentiel d'heures de production nécessaires par type d'opération

La première phase de la démarche a permis de faire apparaître des familles de pièces auxquelles correspondent des gammes d'usinage simplifiées sous la forme d'enchaînements d'opérations de base (par exemple, tournage + perçage + fraisage). Sans connaître

encore les machines qui seront utilisées, on peut cependant, au moyen de logiciels de chiffrage rapide de temps de fabrication (exemple : CETIM-Temps 3), situer la charge correspondant aux structures types de cellules définies.

3.2.2.2 Définition des matériaux

À partir des structures types, il convient de **définir**, avec davantage de précision, les **matériaux correspondant à ces structures**, c'est-à-dire d'opter pour telle ou telle machine, tel ou tel robot ou convoyeur, en fonction de ce qui est disponible sur le marché. Ainsi, si une structure type correspond à une gamme simplifiée comprenant des opérations de tournage, de perçage et de fraisage, il convient à ce stade, ayant par ailleurs fait une évaluation de la charge annuelle par opération, de comparer une structure de cellule basée sur l'utilisation d'un tour et d'un centre d'usinage, à une structure dans laquelle on associe un tour, une perceuse et une fraiseuse ou encore à la solution centre de tournage.

3.2.2.3 Élaboration des gammes d'usinage définitives et calcul des charges précis

Les matériaux, notamment les machines de la cellule, étant définis, il faut élaborer les **gammes d'usinage définitives** correspondant à ces machines ; celles-ci seront beaucoup plus précises et détaillées que les gammes simplifiées utilisées jusque-là.

On peut alors procéder à un **chiffrage précis des charges par machine** et, de ce fait, dimensionner les cellules en fixant le nombre de machines de chaque type en fonction des charges, pour des objectifs annuels de production donnés.

3.2.3 3^e palier de la démarche ou phase quantitative dynamique : simulation de fonctionnement, vérification des objectifs

Les cellules candidates précédemment définies permettent d'assurer la production prévue sur le double plan qualitatif et quantitatif. Toutefois, le dimensionnement des cellules fait au cours de la troisième phase de la démarche est purement statique puisqu'il s'appuie sur le calcul de charge globale annuelle par machine.

Or, en exploitation diverses **perturbations** peuvent survenir et mettre en défaut les prévisions faites sur la seule base d'estimations globales moyennes de la charge à assurer.

Il peut s'agir, par exemple, de conditions particulières de lancement de la production prévue ; au lieu d'être régulièrement répartie tout au long de l'année, cette dernière peut être caractérisée par des pointes à certaines périodes ; ces pointes peuvent nécessiter un surdimensionnement de la cellule par rapport au dimensionnement fait à partir de la charge moyenne.

De la même manière, il faut s'assurer que le système de transfert des pièces (robot, navette) commun à plusieurs machines de la cellule, ainsi que les dispositifs de stockage près des machines, qui, les uns et les autres, ont été dimensionnés en fonction de la charge moyenne à assurer, sont suffisants dans des conditions particulières de lancement des différents types de pièces en fabrication et des impératifs de délais qui s'y rattachent.

Enfin, il est souvent utile de prévoir les conséquences que peut avoir la panne momentanée d'un équipement, par exemple, sur l'exploitation de la cellule.

La prise en compte de toutes ces conditions particulières d'exploitation peut amener à modifier le dimensionnement de la cellule fait de manière statique au cours de la deuxième étape.

Pour ce faire, il est nécessaire de recourir à des techniques de **simulation dynamique**. Il existe sur le marché divers logiciels de simulation de flux qui sont bien adaptés au problème de la simulation d'ateliers et de cellules flexibles. C'est le cas par exemple d'AUTOMOD II, CADENCE, SIMAN/CINEMA, WITNESS.

À l'issue de la simulation, les cellules candidates sont dimensionnées avec précision.

3.2.4 4^e palier de la démarche ou évaluation économique

Cette phase a pour objectif de chiffrer les coûts des équipements des cellules candidates restant en présence et qui ont été parfaitement définies et dimensionnées.

La connaissance des coûts d'une part, des conditions possibles d'exploitation d'autre part (nombre d'opérateurs nécessaires, nombre d'heures productives par jour,...), permet d'effectuer des calculs économiques de rentabilité et de comparer les diverses solutions en présence.

Les méthodes généralement employées, comme le calcul du **pay-back** (délai de récupération de l'investissement), ou la détermination de la **valeur actuelle nette**, comparent le coût de l'investissement projeté aux gains d'exploitation dégagés par rapport aux moyens conventionnels non automatisés, moyens utilisés jusque-là dans l'entreprise.

Compte tenu de la complexité, et donc du coût, de la plupart des systèmes de fabrication flexible, ainsi que de leur durée de vie prévisible, la meilleure formulation à employer est sans conteste la **valeur actuelle nette**, ou son dérivé le **taux interne de rentabilité** (encadré 2).

4. Conclusion

Il n'existe pas une technique flexible, mais plutôt le constat d'un besoin qui nécessite une analyse globale des problèmes de fabrication. C'est en ce sens que l'on parle plus volontiers aujourd'hui d'**intégration**, sachant que l'entreprise en totalité doit être considérée comme une zone de recherche de productivité. Au-delà des problèmes matériels de l'atelier, c'est tout le système d'information – qui gouverne les flux physiques – qui doit être analysé et rationalisé.

Les ateliers flexibles sont constitués d'un patchwork de diverses techniques qui sont apparues il y a relativement peu de temps, et que souvent les entreprises, en particulier les petites, découvrent à l'occasion d'un investissement lourd. Leur mise en œuvre s'accompagne donc d'une mise à niveau technologique et nécessite un important effort de **formation et d'information**.

Enfin, les ateliers flexibles représentent la **nouvelle génération** des moyens de production. Il n'est plus raisonnable actuellement de concevoir un atelier sans analyser les solutions flexibles.

Encadré 2 – Calcul de la valeur actuelle nette

■ Principe de calcul de formule de type valeur actuelle nette (VAN)

L'exploitation des moyens de fabrication faisant l'objet de l'investissement génère de manière discontinue, mais tout au long de leur durée de vie, des flux de trésorerie, positifs ou négatifs. Ces flux doivent être identifiés en nature (= signe), valeur (= montant) et temps (= date d'échéance) (figure 11). Ils sont ensuite regroupés par année comptable, diminués du montant des impôts y afférents (on parle alors de flux nets ou *cash-flow*) (figure 12) et enfin comparés au montant de l'investissement initial.

■ Valeur actuelle nette (VAN)

La valeur actuelle nette d'un investissement est la **somme** des flux nets actualisés de trésorerie pris en compte sur une période égale à la durée de vie estimée de moyens de fabrication faisant l'objet de l'investissement, **diminuée** du montant de l'investissement I (figure 13).

Le principe d'actualisation a pour objet de rendre homogènes les sommes déboursées ou perçues à des époques différentes.

Les flux nets annuels de trésorerie (FNT) sont actualisés en tenant compte d'un taux i de rémunération des capitaux :

$$\text{FNT actualisé} = \frac{\text{FNT de l'année } n}{(1+i)^n}$$

$$\text{VAN} = \left(\sum_{n=1}^T \text{FNT} \right) - I$$

Une condition nécessaire de **rentabilité** d'un projet est que la VAN soit positive.

■ Taux de rentabilité interne

Par nature, la VAN décroît, toutes conditions égales par ailleurs, quand le taux d'actualisation i croît (figure 14).

On peut chercher, par le calcul, quelle est la valeur du taux d'actualisation qui annule la VAN :

Le taux de rentabilité interne (ou TRI) d'un projet d'investissement est égal au taux d'actualisation pour lequel la VAN est nulle.

Un projet sera jugé acceptable si son TRI est supérieur ou égal à une limite basse fixée par les décideurs de l'entreprise ; une bonne référence est le coût du capital de l'entreprise.

■ Aides logicielles

Il existe sur le marché quelques produits de faible coût (environ 5 000 F) tournant sur PC ou Macintosh, permettant de saisir facilement les différentes rubriques intervenant dans les calculs de rentabilité et d'exprimer les résultats du calcul sous différentes formes (VIGIE, COPILOTE).

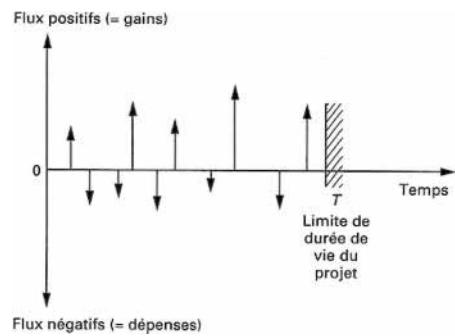


Figure 11 – Échéancier des flux de trésorerie

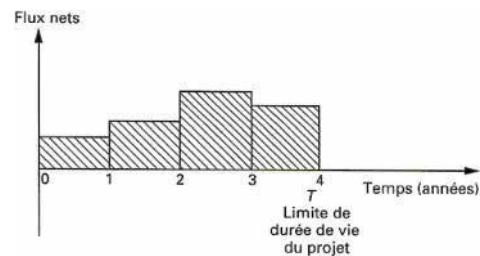


Figure 12 – Flux annuels de trésorerie

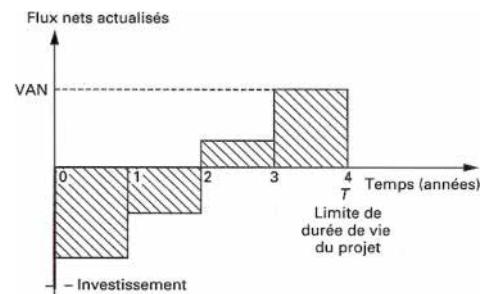


Figure 13 – Flux nets de trésorerie cumulés et VAN

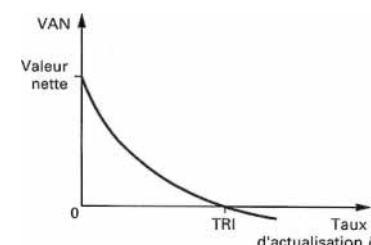


Figure 14 – Variation de la VAN en fonction du taux d'actualisation i

Références bibliographiques

- [1] Ingersoll Engineers France. – *Les ateliers flexibles*. Usine Nouvelle, 238 p., 31 exemples, 138 réf. (1981).
- [2] BONETTO (R.). – *Les ateliers flexibles de production*. Hermès, 271 p., 36 réf. (1987).
- [3] GROOVER (M.P.). – *Automation et systèmes de production*. Hermès, 267 p., 21 réf. (1981).
- [4] WARNECKE (H.J.) et STEINHILPER (R.). – *Flexible Manufacturing Systems*. IFS (anglais), 319 p. (1985).
- [5] PROTH (J.M.) et QUENTIN DE GROMARD (H.). – *Systèmes flexibles de production*. Masson, 278 p., 4 réf. (1986).
- [6] ROCHE (A.) et JUBIN (M.). – *Les cellules et les îlots flexibles d'usinage*. Hermès, 57 p., 8 réf. (1989).