



HAL
open science

Nouvelle approche dans l'analyse pour la conception des systèmes de production appliquée aux microcomposants.

Dominique Gendreau, Yassine Haddab, Philippe Lutz, Christophe Perrard

► To cite this version:

Dominique Gendreau, Yassine Haddab, Philippe Lutz, Christophe Perrard. Nouvelle approche dans l'analyse pour la conception des systèmes de production appliquée aux microcomposants.. Cinquième Congrès International de Génie Industriel, GI'03., Oct 2003, Québec, Canada. 10 p. hal-00259062

HAL Id: hal-00259062

<https://hal.science/hal-00259062>

Submitted on 26 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Nouvelle approche dans l'analyse pour la conception des systèmes de production appliquée aux microcomposants

Dominique GENDREAU¹, Yassine HADDAB¹, Philippe LUTZ¹, Christophe PERRARD¹.

¹ Laboratoire d'Automatique de Besançon – 25, rue Alain SAVARY - 25 000 Besançon – France

Email : dominique.gendreau@univ-fcomte.fr, yassine.haddab@ens2m.fr,

philippe.lutz@ens2m.fr, christophe.perrard@ens2m.fr

Résumé. Aujourd'hui, on trouve des microproduits dans de nombreux domaines : médical, son, image, constituants de l'automobile, électroménager. De nouveaux appareils de production adaptés doivent être développés pour répondre à une fabrication bien particulière et une demande en forte croissance.

Dans le souci d'intégrer à la fois des contraintes fonctionnelles et technologiques dans une approche modulaire, les travaux développés au Laboratoire d'Automatique de Besançon ont pour but de mettre sur pied une démarche originale pour obtenir, à moindre effort et à moindre coût un système de production adapté aux microproduits qui soit à la fois productif, efficient et adaptatif.

Mots clés : conception des systèmes de production, micro-usine, microproduits, assemblage.

1. Approches existantes dans le macromonde

Logique d'industrialisation

Le cahier des charges d'un produit est dicté par les besoins exprimés par le client. La phase de conception du produit intègre toutes les techniques de fabrication réalistes selon la série de pièces à produire. Si l'entreprise possède elle-même des moyens de fabrication, elle peut soit orienter ses choix en se limitant au potentiel de ses ateliers de fabrication, soit envisager une sous-traitance si elle se justifie économiquement. Au stade de la fabrication, il sera pris en compte la disponibilité des moyens pour exécuter la production des pièces (Groupe GAMA, 1990) ; une organisation de la production peut être mise en place pour optimiser le fonctionnement du système (Lesage, 1989).

Contexte de la production par lots

Cette approche s'intègre bien au contexte de la production de pièces par lots, en petite et moyenne série. L'approche est linéaire dans l'industrialisation des produits : à chaque étape, de la conception à la réalisation, seront pris en compte les techniques réalisables et les moyens disponibles. Tout système de production dit « universel » pourra être utilisé s'il répond à des critères de flexibilité et disponibilité suffisants. L'organisation va privilégier le respect de la contrainte de délais, assurant un niveau de qualité suffisant en rapport avec un coût acceptable pour le client et garantissant une marge bénéficiaire pour l'entreprise.

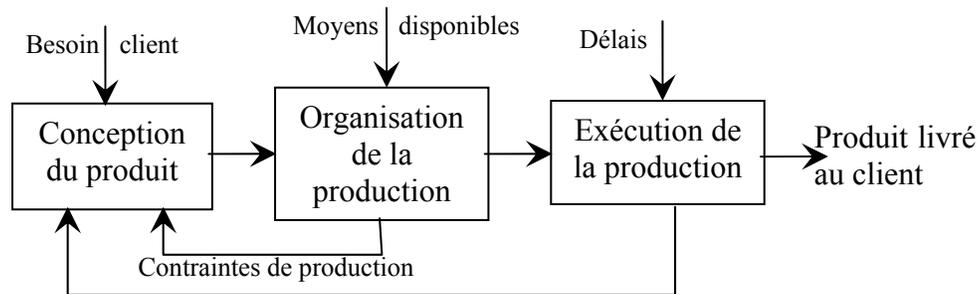


Figure 1 : démarche d'industrialisation appliquée à la production par lots

Cas de la grande série

L'objectif premier est la réduction des coûts. Cela va permettre d'engager des investissements lourds, rentabilisables sur le nombre important des produits à fabriquer.

L'automatisation de ces systèmes de production va être suffisamment avancée pour permettre une réduction significative des délais. Une seconde perdue pour l'exécution d'une opération peut engendrer un retard de plusieurs semaines à la livraison.

Pour permettre une bonne adéquation entre le produit et le système de production, ces derniers sont conçus spécifiquement pour le produit, ce qui en fait des systèmes dédiés. Les cas d'application sont nombreux dans les industries automobiles, informatiques ou en électroménager où l'amortissement des moyens spécifiques est assuré par le volume de production.

Les démarches d'ingénierie simultanée, qui consistent à concevoir en parallèle le produit et le système qui permettra de le fabriquer, sont encore plus performantes dans la mesure où elles permettent d'optimiser à la fois le produit et le système de production (Petitdemange, 1990).

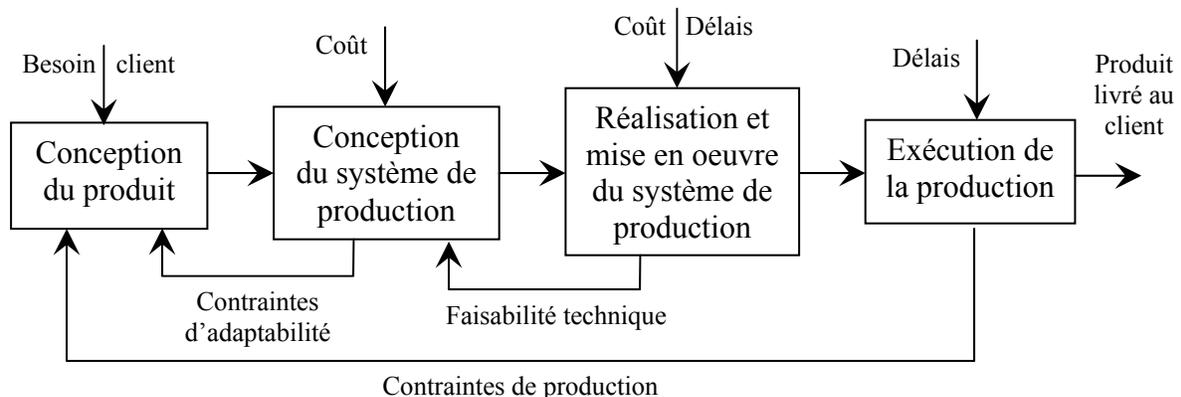


Figure 2 : démarche d'industrialisation appliquée à la grande série

2. Contraintes et limites liées à la fabrication et la manipulation des microproduits

Nous nous intéressons aux produits micromécatroniques, lesquels sont constitués de pièces assemblées entre elles, chacune de dimensions millimétriques et réalisant différents types de liaisons. L'échelle de grandeur s'étend de quelques microns au niveau des formes géométriques des éléments (alésage, rainure, épaulement, ...) à 2 ou 3 millimètres pour les encombrements maxima des produits obtenus après assemblage. Les pièces constitutives des microproduits sont majoritairement solidaires les unes aux autres (Koelmeijer Chollet, 2000). Dans un certain nombre de cas, il existe cependant des mobilités, par exemple obtenues par une liaison pivot ou une liaison glissière dans des applications telles que des paliers ou des micromoteurs.

Les forces mises en jeu

Tous les éléments sont sensibles aux mêmes lois de la physique, cependant, certaines lois sont plus influentes sur les microproduits. C'est le cas des forces dans l'exemple suivant qui est extrait de (Haddab, 2000). Tout objet subit la loi de la gravité qui s'exprime ainsi pour une sphère de rayon « r » et de masse volumique ρ :

$$F = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

Si l'ordre de grandeur du rayon est de quelques micromètres, cette force est excessivement faible. Lorsque cette sphère conductrice est en contact avec un plan situé au-dessus, des forces de contact ou de proximité s'exercent entre les deux éléments. Ces forces, qui habituellement sont négligeables, vont prendre des valeurs importantes. Tel est le cas des forces électrostatiques :

$$F = \pi \cdot \sigma^2 \cdot r^2 / \epsilon \quad (2)$$

où σ est la densité surfacique de charges et ϵ la permittivité électrique de l'air, milieu dans lequel se trouvent les éléments. Au niveau moléculaire, il s'exerce des forces appelées forces de Van Der Waals :

$$F = H \cdot r / 8 \cdot \pi \cdot z^2 \quad (3)$$

dans lequel H est la constante de Lifshitz-Van der Waals fonction des matériaux et z la distance nanométrique entre les molécules des deux éléments. Enfin, on peut noter des tensions de surfaces qui peuvent être très importantes selon le taux d'humidité de l'environnement du contact. Un ménisque d'eau, dont la tension de surface est exprimée par χ , se crée entre les surfaces des éléments et produit une attraction forte entre ces éléments :

$$F = 4 \cdot \pi \cdot \chi \cdot r \quad (4)$$

L'influence de chacune des forces apparaît au niveau de l'exposant de « r ». L'allure des courbes tracées sur le graphique de la figure 3 montre l'importance des forces de surface dans les dimensions micrométriques.

Ainsi, les forces de contact sur les microproduits sont prépondérantes par rapport à la force de gravité, ce qui engendre par exemple des difficultés pour un lâcher de pièce lors d'une manipulation. Plusieurs solutions sont alors envisageables.

Il est tout d'abord possible de réduire l'effet de ces forces en agissant sur différents paramètres. Un déchargement électrostatique des pièces ou le choix d'un matériau permet de limiter les forces électrostatiques. La modification des états de surface du préhenseur permet la réduction des forces de Van Der Waals. L'utilisation de matériaux hydrophobes au niveau du préhenseur ou encore le contrôle de l'atmosphère par réduction du taux d'humidité agit favorablement sur les tensions de surface.

Un lâcher de pièce peut également être accompagné d'un effet mécanique, tel qu'une accélération ou encore des vibrations. On peut également adjoindre un élément supplémentaire chargé de « décoller » la pièce du préhenseur, ou l'effet d'un faisceau laser sur la pièce.

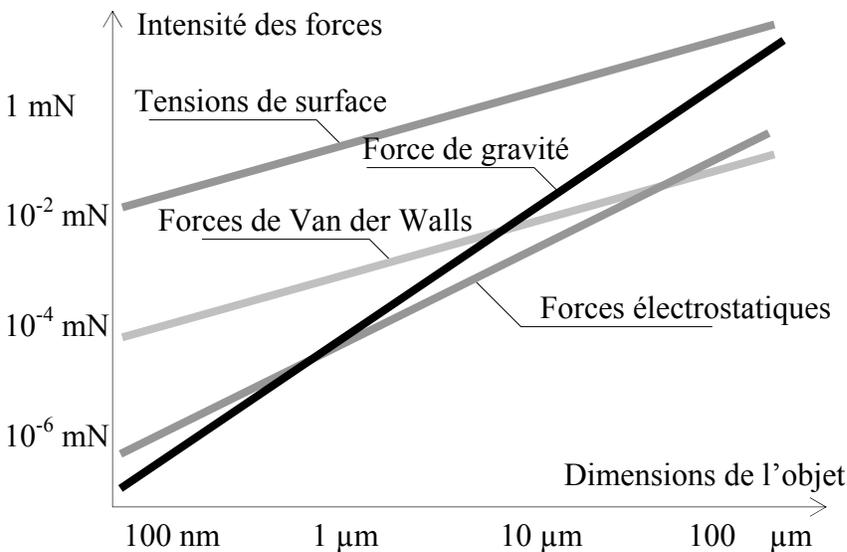


Figure 3 : forces influentes dans le micromonde

En conséquence, sur le plan technique, l'insertion verticale d'un composant est une règle souvent utilisée en assemblage. Dans l'univers microscopique, cette approche doit être repensée pour prendre en compte ces phénomènes.

La fragilité des microproduits

Il est intéressant de remarquer que, toutes proportions conservées, la rigidité est meilleure pour les pièces microscopiques. Elles sont plus robustes contre les chutes ou les chocs. En revanche, ces pièces demeurent très fragiles lorsqu'elles sont manipulées par des préhenseurs de grandes dimensions qui sont capables de délivrer des efforts gigantesques au regard de la résistance mécanique admissible par ces microproduits.

Une approche différente concernant les technologies de préhenseur est donc rendue nécessaire. De nombreux travaux en microrobotique sont menés en ce sens.

Le non recyclage des microproduits

L'évolution des produits et des systèmes de production est orientée par des contraintes environnementales de plus en plus fortes (Afnor, 1996) dans le monde qui nous entoure. En particulier, pour bon nombre de produits, la démontabilité pour le recyclage des matériaux fait partie intégrante du cahier des charges du produit ; l'industrie automobile est en particulier très sensible à ces considérations.

Les microcomposants ne sont pas concernés par ces contraintes. Tout d'abord, ils ne sont pas démontables pour la plupart ; par ailleurs, le volume de déchets qu'ils sont susceptibles de produire est très faible dans notre environnement. Ainsi, les radiations ou effets toxiques qu'ils pourraient produire sont assez facilement maîtrisables par un confinement peu volumineux.

L'aspect qualité

Le rapport qualité/coût du produit dans le macromonde est tel que l'entreprise va se doter de méthodes et d'équipement de fabrication spécifiques lui garantissant un niveau de qualité reconnu (Afnor, 2000). Une maîtrise parfaite des outils et des techniques (Brissard et Polizzi, 1990 ; Pillet, 2001) est nécessaire pour conserver, à un niveau de qualité satisfaisant, un coût moindre. En revanche, un niveau de qualité élevé sur un produit micromécanique de grande diffusion est difficilement atteignable. On va donc autoriser un taux de rebut élevé pour garantir une certaine rentabilité économique. De plus, la haute technicité du produit, qui le rend difficilement maintenable, lui confère un caractère jetable, pour l'utilisateur comme pour le fabricant. Ces deux aspects vont introduire des contraintes fortes de réduction des coûts.

3. Le concept de micro-usine

Une micro-usine pour quoi faire ?

Il existe deux objectifs différents pour la conception d'une micro-usine. Le premier est la réalisation de microsystèmes impossibles à obtenir par un moyen traditionnel. Cette orientation est dictée par une contrainte de « faisabilité » dont le coût n'est pas l'argument majeur.

Le second est la réalisation de microsystèmes à un coût moindre qu'avec les procédés actuels. Cela peut constituer une forte motivation pour les industriels, désireux de s'engager vers de nouveaux modes de fabrication.

Il faut envisager de réaliser un système de production adapté aux microproduits, c'est-à-dire ayant des dimensions en rapport avec le produit (actuellement les systèmes de fabrication sont souvent d'une dimension gigantesque par rapport à la taille des microproduits) et utilisant des technologies adaptées au micromonde. On peut ainsi espérer des coûts de réalisation des systèmes de production en rapport avec l'échelle de dimension. Les micro-actionneurs utilisés ont une consommation énergétique faible, ce qui va également dans le sens d'une économie. Les usinages sont obtenus avec des technologies de pointe qui garantissent rapidité et précision.

Par exemple, saisir un objet se fait communément avec une pièce à deux ou plusieurs doigts, alors qu'une micropièce peut très bien être saisie par un seul doigt, exploitant ainsi les forces surfaciques vues précédemment.

L'usinage d'un alésage ou d'une rainure naturellement opéré par ablation de matière avec un outil coupant ou avec une électrode peut plus facilement être réalisé par un laser adapté, dont la

précision peut être grande, malgré un débit d'usinage faible mais toutefois suffisant par rapport au volume atomique à extraire de la micropièce.

Enfin, une micro-usine de petite dimension que l'on peut envisager de poser sur une table, offre la possibilité d'adapter facilement un environnement contrôlé (mini salle blanche) et la faculté d'être facilement portable.

Les réalisations existantes

Le concept de « micro-usine » a été introduit en 1990 par les chercheurs japonais du Mechanical Engineering Laboratory (MEL). Le ministère de l'industrie et du commerce extérieur du Japon (MITI) a lancé un programme de recherche national « Micromachine » qui a conduit à des prototypes de microfactory au MEL en 1999 et en 2000 (Ashida, 2000 ; Tanaka, 2001), à un système d'assemblage pour des produits micro-optiques et à un système de téléopération des micro-pièces chez Olympus Optical (Ataka, 1999), et à une microfactory utilisant l'usinage électrochimique.

Aux Etats-Unis, c'est à l'Université de Carnegie Mellon que l'on trouve des réalisations de type « Agile Assembly Architecture ».

En Allemagne, des travaux ont été réalisés au Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation à Stuttgart, sur le concept de micro systèmes de production modulaires (Gaugel, 2001). D'autres travaux sont menés à « Institute for Process Control and robotics », de l'Université de Karlsruhe sur le développement de stations flexibles de micro-assemblage basées sur des micro-robots intelligents (Fatikow, 2000). En Finlande, le projet « Towards Mini and Micro Assembly Factories (TOMI) » est un projet de recherche de trois ans. En Suisse, la réalisation d'une station de micro-assemblage a été faite à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), d'autres travaux de recherche sont menés à l'institut de systèmes robotiques de l'EPFL sur les concepts de micro et nanofactory (Clavel, 2000).

Les perspectives d'évolution

On peut remarquer que, dans toutes les applications existantes, il n'y a pas de nouveauté dans la constitution de ces systèmes. Les principes expérimentés dans le macromonde y sont appliqués avec un facteur d'échelle différent. L'alternative consiste à élaborer de nouveaux concepts qui prennent en compte toute la dimension du micromonde.

La microfactory du MEL a été longtemps la référence dans le domaine ; il s'agit d'un « bijou technologique » dans lequel les concepts de commande ont été peu abordés. Un axe de développement qui nous semble important est l'aspect structuration et commande des systèmes.

Enfin, la plupart des systèmes utilisés en production répondent à des besoins industriels pour un besoin particulier. L'aspect modulaire n'a pas été considéré et c'est un axe essentiel pour l'avenir de tels systèmes de production.

4. Détermination des caractéristiques de la micro-usine

Dans les objectifs précédemment décrits, si l'on veut viser un niveau de productivité satisfaisant avec un coût raisonnable, il est nécessaire de maîtriser un certain nombre de paramètres. En termes de productivité, la vitesse des manipulateurs ou des convoyeurs à l'intérieur du poste ainsi que la cadence de production (volume de produits sortants du poste) sont des indicateurs forts.

Pour ce qui est de la flexibilité, l'attention sera portée sur l'adaptabilité (capacité du poste à accepter les changements de composants sans rupture de flux) et la reconfigurabilité (capacité du poste à être reconfiguré pour traiter une nouvelle production). D'autres éléments peuvent être également considérés tels que l'encombrement du système qui peut pénaliser l'aspect portable de la micro-usine.

Afin de mieux intégrer toutes les contraintes, nous menons des recherches au LAB qui sont orientés suivant deux points de vue.

Les deux points de vue complémentaires du concepteur

L'appréhension de micro-systèmes de production peut être vue selon deux aspects. Le premier est d'ordre fonctionnel, de type « top-down » : l'analyse des besoins va conduire à définir des architectures fonctionnelles, organiques et opérationnelles. Le second est d'ordre technologique, de type « bottom-up » : les contraintes inhérentes aux micro-produits vont induire des choix en termes de fabrication et assemblage.

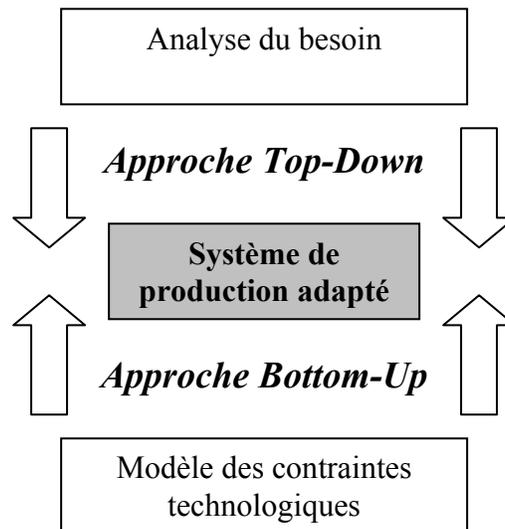


Figure 4 : approches dans la conception d'un micro-système de production

Approches « top-down »

La description fonctionnelle des micro-usines est une première étape à la conception de tels systèmes. L'approche consiste à revisiter un certain nombre de fonctions propres aux systèmes de production et d'analyser leur adéquation avec le micromonde. Ce travail devra se baser sur un état de l'art des approches fonctionnelles des systèmes de production dans le macromonde. A partir de cette analyse, il peut être mis en évidence une première catégorie de fonction qui sont directement transposables. En revanche, certaines fonctions n'ont plus de sens dans le micromonde et inversement, il est nécessaire de créer de nouvelles fonctions qui proviennent de la spécificité de ce nouveau milieu.

Une autre étude consiste à identifier et analyser, qualitativement et quantitativement, les paramètres d'assemblage et de fabrication qui influent sur la conception des micros produits. Les résultats permettront de contribuer à l'élaboration d'une nouvelle méthode de conception adaptée

aux microproduits. Les résultats auront également une forte influence sur la conception des systèmes de production, ainsi que sur les méthodes et techniques de production. Par exemple, pour réaliser le perçage d'un trou cylindrique de révolution, plusieurs techniques sont envisageables ; la technique la plus économique utilise un foret dont le diamètre minimum est de 0,12 mm. En dessous, l'électroérosion à fil peut opérer jusqu'à un diamètre minimum de 0,05 mm. Dans une échelle plus petite, des techniques à base de laser sont mieux appropriées. Le choix d'une technique ou d'une autre aura des conséquences complètement différentes sur l'ordre des opérations et les posages (gamme de fabrication), le choix du matériau, ...

Approches « bottom-up »

Une étude des architectures physiques et des systèmes d'alimentation envisageables dans le cadre d'une micro-usine d'assemblage procède selon une démarche ascendante. Les particularités physiques du micromonde, telles que nous les avons précédemment évoquées, ont un impact direct en termes de solutions technologiques d'alimentation (existantes ou imaginables) ou encore de méthode de conception de ces alimentations.

Dans la majorité des solutions de micro-usines, la vision semble incontournable soit comme moyen de perception participant directement à la réalisation de la tâche (asservissement visuel d'un robot) soit comme moyen de contrôle de la tâche ; il apparaît également pour remplir les deux tâches. Quels avantages, quels inconvénients et quelles limites sont relatives à l'utilisation de la vision dans le contexte de micromonde ?

Notre approche de la modularité

Réaliser une micro-usine pour un produit particulier est intéressant, surtout dans le cadre d'une production de grande série de micro-produits. Cette approche s'avère réductrice, car elle peut engendrer des choix uniquement dictés par l'aspect technologie. Il nous semble intéressant d'orienter nos recherches vers une approche modulaire qui permettrait ainsi une adaptation de l'outil de production à la spécificité du micro-produit à réaliser. L'approche modulaire peut être poussée plus loin à l'intérieur du système de production et de son organisation. Elle peut être traitée à la fois au niveau physique, telle que le représente la figure 5, et au niveau commande, offrant ainsi une démarche simultanée de conception liant la partie commande et la partie opérative.

Un poste est composé de plusieurs « parties ». Une partie « Connexion » qui permet de le fixer sur une plateforme UMB (Universal Microfactory Bus) et d'assurer les flux d'informations et d'approvisionner en énergies (électrique, pneumatique, ...). La partie « Exécution » concentre toute la partie opérante sur le produit, que ce soit de la manipulation, de l'assemblage ou de la fabrication. L'« Alimentation » permet l'approvisionnement du poste en composants ou en sous-ensembles (composants assemblés), en assurant une fonction de stockage amont et aval au poste. Enfin, toute cette organisation est gérée par une intelligence locale qui apparaît dans la partie « Pilotage ».

Chaque poste est très spécifique au niveau partie opérante, mais son organisation est très standard, ce qui permet de le disposer à n'importe quel endroit (dicté par des contraintes de flux de produits), de faciliter son remplacement en cas de panne.

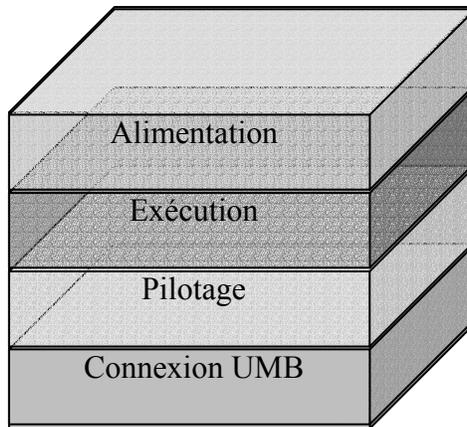


Figure 5 : structure d'un poste

La modularité ainsi décrite dans le cadre de la micro-usine permet une grande adaptabilité de celle-ci à la fabrication de différents produits et peut ainsi autoriser une flexibilité plus grande, économiquement nécessaire dans une production par lots de pièces. Cet aspect permet de concilier dans le micromonde les concepts de productivité et flexibilité qui sont décrits comme antagonistes dans les systèmes de production macroscopiques (Froment, 1989).

Considération des modes de production

L'identification des modes de production a conduit à caractériser trois particularités au niveau d'un poste d'opération :

- L'architecture du poste : flexible/rigide. Celle-ci peut être considérée comme rigide lorsque le poste est très spécifique à un type d'opération ; cela peut correspondre à un besoin particulier. Une configuration matérielle et/ou logicielle s'avère nécessaire lorsque l'architecture est flexible, c'est-à-dire que l'on va pouvoir traiter une famille de produits avec les mêmes postes en modifiant certains paramètres.
- L'organisation : individuelle/collective. L'assemblage peut être réalisé en individuel, c'est-à-dire produit par produit ; c'est le type d'assemblage le plus traditionnel. Dans une organisation collective, plusieurs produits peuvent être assemblés ou traités en parallèle, avec un même cycle de mouvement ; on a tous l'image d'une unité d'analyse de laboratoire qui dose un produit avec « n » pipettes dans « n » éprouvettes à la fois.
- Le mode d'alimentation : au poste/en kit. Un élément peut être acheminé de manière individuelle au poste pour être assemblé à un autre élément ou à un sous-ensemble ; l'approvisionnement peut être assuré par une rampe, un tapis d'amenage, un bol vibrant ou tout autre dispositif susceptible de véhiculer un seul type de constituant. Dans une configuration « en kit », la totalité des éléments constituant un sous-ensemble arrive sur une palette individuelle ; il n'y a donc qu'un seul flux qui concentre tous les éléments ; une difficulté subsiste : c'est celle de préparer la palette avec tous les constituants.

Au travers de ces trois particularités, il existe donc 8 configurations possibles, données par la combinatoire des possibilités. Il apparaît clairement que certains modes de production sont plus représentatifs des différents systèmes existants. L'étude de chaque mode permet donc d'élaborer des organisations et des stratégies de commande adaptées.

5. Conclusion

L'étude des différents systèmes de production existants ont permis de définir un cahier des charges de ce que doit être une micro-usine. Il nous a paru essentiel de nous focaliser tout d'abord sur l'aspect flexibilité pour satisfaire le contexte de traitement de produits en petites séries. Ensuite, la modularité apporte une dimension particulièrement intéressante sur les aspects organisation, gestion des flux, et maintenance. Le tout peut ensuite être intégré de manière plus facile en apportant une structuration adaptée de la commande. La technologie très spécifique du monde microscopique est largement prise en compte au travers des études menées sur les systèmes d'alimentation et de vision.

A l'aboutissement de la phase de spécification et de développement des concepts, le résultat se traduira par l'élaboration d'une maquette expérimentale qui permettra de valider différentes architectures physiques et différentes structures de commande.

Références

- Afnor (1996). NF EN ISO 14001 Systèmes de management environnemental - Spécifications et lignes directrices pour son utilisation, *Norme homologuée*, X30-200.
- Afnor (2000). NF EN ISO 9001 Version Française - Systèmes de management de la qualité – Exigence, *Norme homologuée*, X50-131.
- Ashida, K., N. Mishima et al. (2000). Development of desktop machining microfactory, *Japan-USA Flexible Automation Conference*, July 23-26, 2000, Ann Arbor, Michigan.
- Ataka T. (1999) The experimental Microfactory System in Japanese National R&D project, *R&D Department, Scientific Instruments Division, Seiko Instruments Inc.* 36-1, Takenoshita, Oyama-cho, Sunto-gun, Shizuoka 410-1319, Japan.
- Brissard, J.-L. et M. Polizzi (1990). Des outils pour la gestion de production industrielle, *Ouvrage AFNOR Gestion*, ISBN 2-12-467711-X.
- Clavel, R., P. Helmer et al (2000). Contribution aux concepts de « micro et nanofactory », *Nano et Micro technologies* 1- n°3-4/2000-2001 pp. 457-495.
- Fatikow, S., J. Seyfreid et al. (2000). Flexible Microrobots for a Microfactory, *International Workshop on Microfactories*, 2000.
- Froment B. et J.-J. Lesage (1989) Productique : les techniques de l'usinage flexible. *Ouvrage DUNOD Collection Génie Mécanique*, 2, ISBN: 2-04-018792-8, pp. 117-118.
- Gaugel T. et H. Dobler (2001) Advanced Modular Micro-production System (AMMS)", *Microrobotics and Microassembly III*, Bradley J. Nelson, Jean Marc Breguet, Editors, *Proceeding of SPIE* Vol. 4568, 2001.
- Groupe GAMA (1990). La gamme automatique en usinage. *Ouvrage HERMES*, ISBN 2-86601-255-0, pp. 127-142.
- Haddab Y. (2000). Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique. *Thèse de Doctorat*, Université de Franche-Comté, pp. 9-23.
- Koelmeijer Chollet S. (2000). Méthodologie pour la conception de microsystèmes et de leur équipement d'assemblage. *Thèse de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 239 p.
- Lesage, J.-J. (1989). Conception de la commande des systèmes de production : contribution à la structuration, application à la conception de la commande d'un atelier flexible. *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Paris, pp. 50-58.
- Petitdemange, C. (1990). La maîtrise de la valeur, la gestion de projet et l'ingénierie simultanée, *AFNOR Gestion*, ISBN 2-12-475021-6, 260 p.
- Pillet M. (2001) Appliquer la maîtrise statistique des procédés MSP/SPC. *Ouvrage des Editions d'Organisation*, ISBN: 2-7081-2672-5.
- Tanaka, M. (2001). Development of desktop machining microfactory. *Rinkel Review*, 34, MEL, AIST, Ministry of Trade and Industry.