

*Facultés de Technologies Industrielles (TIN),  
et Formation En Emploi (FEE)*

*Filières microtechniques et électronique et automatisation industrielle (MI et EAI)*

*LaRA - Laboratoire de Robotique et Automatisation*

# **AUTOMATISATION D'UNE OPERATION GENERALE DE PRODUCTION ET CAS PARTICULIER DE L'ASSEMBLAGE**

(Partie 4.1 du cours "Robotique et Automatisation")

Jean-Daniel Dessimoz

## **Etapes pour l'automatisation d'un poste de travail**

Description de l'application dans son état  
actuel, solutions existantes, et cahier des  
charges

Etude de faisabilité de l'application  
automatisée (« crayon et papier »)

Analyse financière grossière (à 30 % près)

Etude prototype (essais en laboratoire,  
feedback de l'utilisateur)

Analyse financière formelle (à 10 % près)

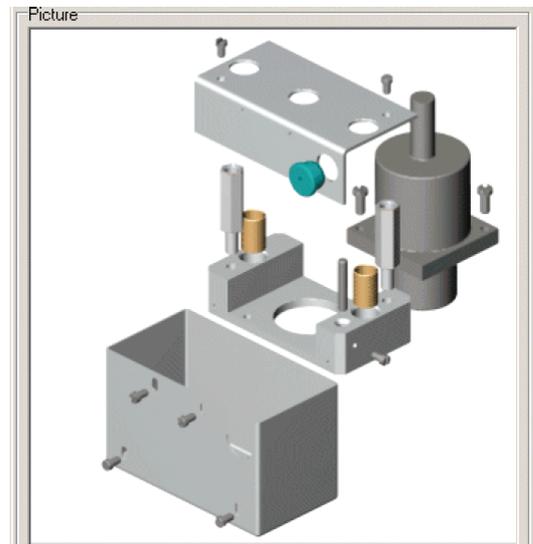
Développement de l'application pour la  
production

Tests et mise au point

Installation finale

Service de l'application en production

Gestion de fin de vie et recyclage au sens  
du développement durable



[dfma]

Yverdon-les-Bains, November 26, 2015

## 4.1 AUTOMATISATION D'UNE OPERATION GENERALE DE PRODUCTION ET CAS PARTICULIER DE L'ASSEMBLAGE

### TABLE DES MATIERES

1. Introduction .....	4
2. Marche à suivre pour automatiser une application – « LaRA-IBM Plus » .....	4
2.1 Vue d'ensemble .....	5
2.2 Description de l'application dans son état actuel et cahier des charges .....	5
2.3 Etude de faisabilité de l'application (crayon et papier) .....	7
2.4 Analyse financière grossière (à 30 % près) .....	9
2.5 Etude prototype (essais en laboratoire et feedback de l'utilisateur) .....	9
3. Problématique de l'assemblage .....	10
3.1 Introduction .....	10
3.2 Difficultés particulières de l'assemblage .....	11
3.3 Eléments de solution adaptés à l'assemblage .....	14
3.4 Conclusion .....	18
4. Conception en vue d'assemblage automatisé .....	19
4.1 Nécessité de l'assemblage .....	20
4.2 Conception des pièces .....	21
4.3 Récapitulation .....	28
4.4 Exemple de conception en vue de l'assemblage automatisé: la technique CMS .....	29
5. Particularités de la robotique pour l'assemblage .....	32
5.1 Impact de la robotique sur l'assemblage .....	32
5.2 Impact de l'assemblage sur la robotique .....	33
5.3 Exemples de classes d'application .....	35
6. Méthodes d'analyse en assemblage .....	36
6.1 Bases théoriques de l'assemblage .....	36
6.2 Génération automatique des gammes d'assemblage .....	41
7. Conclusion .....	44
Références .....	47
Autres sources bibliographiques et liens web .....	48

## **4.1 AUTOMATISATION D'UNE OPERATION GENERALE DE PRODUCTION ET CAS PARTICULIER DE L'ASSEMBLAGE**

### **1. INTRODUCTION**

Le cours a surtout traité, jusqu'ici, d'aspects techniques. Mais lorsque l'on procède à l'automatisation d'une place de travail, d'autres facettes apparaissent, telles les rapports humains ou les implications économiques. Ces éléments trouvent naturellement leur place au début de ce chapitre, dans une méthode proposée pour automatiser un poste de production. Alors que cette méthode est applicable de façon très large, le reste du chapitre se concentre sur un type particulier d'opération de production: l'assemblage.

L'assemblage mérite une attention spéciale, à cause de son impact économique énorme. On en survolera d'abord la problématique dans son ensemble, puis on discutera plusieurs de ses éléments: conception en vue de l'assemblage automatisé, impacts mutuels de l'assemblage et de la robotique, et enfin, quelques méthodes formelles d'analyse.

Enfin, les références de fin de chapitre permettent de compléter le texte, notamment en pointant sur des publications de type « Journal » où de nouveaux développements ne cessent de se communiquer.

### **2. MARCHE A SUIVRE POUR AUTOMATISER UNE APPLICATION – « LARA-IBM PLUS »**

L'automatisation d'une application requiert une démarche créative, de conception. A ce titre, elle est difficile à formaliser. Divers auteurs ont néanmoins proposés leur méthode, résultant généralement de longues années d'expérience (par ex. [HES, KOR]). La plus appropriée ici provient originellement d'IBM et se présente, un peu modifiée, ci-dessous (voir aussi, de façon plus générale, [DES]).

La méthode originale date du début des années 80. Depuis, des améliorations sont apparues et ont été intégrées, notamment en ce qui concerne la prise en compte améliorée et dynamique des besoins de l'utilisateur, la synergie avec les connaissances-métiers, la gestion du projet pour la vie entière du produit, y compris sa fin, et même au-delà, en termes de développement durable. La méthode actuelle, LaRA-IBM-Plus peut se résumer en une dizaine d'étapes.

Après avoir donné un aperçu de la démarche dans son ensemble, on se concentre sur les quatre premières étapes, qui sont déterminantes.

## 2.1 VUE D'ENSEMBLE

Le tableau 4.1 présente les étapes successives de développement d'une application automatisée. Cette démarche est de portée tout à fait générale. Ce n'est que dans le détail des étapes successives que les spécificités d'une application donnée commencent à se révéler.

<b>Etapes pour l'automatisation d'un poste de travail</b>	
1	Description de l'application dans son état actuel, solutions existantes, et cahier des charges
2	Etude de faisabilité de l'application automatisée (crayon et papier)
3	Analyse financière grossière (à 30 % près)
4	Etude prototype (essais en laboratoire et feedback de l'utilisateur)
5	Analyse financière formelle (à 10 % près)
6	Développement de l'application pour la production
7	Tests et mise au point
8	Installation finale
9	Service de l'application en production
10	Gestion de fin de vie et recyclage au sens du développement durable

Tableau 4.1.1 Etapes principales de la méthode IBM pour automatiser un poste de travail, y compris adaptations HEIG-VD (iAi.LaRA)

## 2.2 DESCRIPTION DE L'APPLICATION DANS SON ETAT ACTUEL ET CAHIER DES CHARGES

Il arrive souvent que l'application à automatiser soit déjà en production depuis un certain temps, mais dans un état qui n'est plus adéquat (solution manuelle, équipement obsolète, contraintes de qualité non respectées, etc.). Il faut alors, comme préalable à tout travail de conception, bien se documenter sur son mode de fonctionnement. Cette étape est beaucoup plus difficile à franchir qu'il n'y paraît, car beaucoup d'éléments sont généralement peu apparents car implicites ou occasionnels.

Si le produit dont il faut automatiser la production n'existe pas encore, il semble qu'il faille commencer directement par l'élaboration du cahier des charges. Mais en fait, il existe presque toujours en production des situations analogues à celle planifiée. Dès lors, pour l'essentiel, la même démarche préalable est applicable.

Le tableau 4.1.2 présente les actions à entreprendre, et les données à rassembler pour décrire une opération de production.

- Visiter le poste actuel de production. Si possible, prendre des photos et des enregistrements vidéo.
- Examiner les plans de production, les statistiques de rebuts, les commandes de fournitures
- Parler avec les opérateurs, les chefs d'atelier, le constructeur et le spécialiste du bureau des méthodes qui a réalisé le poste.
- Rassembler les informations suivantes:
  - Description du procédé actuel
  - Opérations amont et aval
  - Description des composants (masse, matériau, dimensions...)
  - Nombre d'opérations
  - Flux de pièces
  - Volumes de production (par heure, par jour, et pour l'ensemble du programme)
  - Origine des pièces, et mode de livraison
  - Temps de cycle par opération
  - Temps de lancement ou de changement de lot
  - Courbe d'apprentissage du personnel
  - Quantité de main d'oeuvre par poste
  - Nombre de postes similaires
  - Caractéristiques d'ambiance (environnement dangereux ou inconfortable pour l'opérateur)
  - Pollutions éventuelles (bruit, fumées, corrosion, humidité, poussières, liquides, copeaux...)
  - Finitions
  - Opérations de contrôle de qualité
  - Tests réalisés
  - Historique des problèmes rencontrés

Tableau 4.1.2 Description de l'état actuel d'un poste de production, d'après [IBM] et [KOR].

Cette première étape de la méthode est très délicate à franchir de façon satisfaisante car il requiert de l'ingénieur des facultés extraordinaires de communication. La plupart des partenaires fonctionnent sans expliciter ce qu'ils font. Le concepteur de pièces n'explique quasiment pas les raisons de ses choix, l'opérateur sur la ligne de production acquiert un savoir-faire qui n'est décrit nulle part, etc.

Durant cette étape, une première version du cahier des charges est à négocier avec les partenaires. Typiquement on s'attend à ce que le cahier des charges soit affiné pour 50% par le mandant, et pour 50% par le mandataire.

### 2.3 ETUDE DE FAISABILITE DE L'APPLICATION (CRAYON ET PAPIER)

Le cahier des charges étant établi, il s'agit de proposer une solution technique appropriée. En général, la solution passe par l'utilisation de systèmes standards pour l'automatisation, tels les automates programmables, les ordinateurs industriels ou les robots. Mais souvent, cela implique d'innover.

En première étape, on adopte un système existant, et on essaie de faire migrer certaines opérations entre postes amont et aval. Il faut alors évaluer ce que le système peut faire, ainsi que les besoins additionnels en outillage.

Il s'agit ici de prendre en compte les caractéristiques ambiantes, les tolérances sur les composants, les posages et amenées de pièces, ainsi que d'éventuels outils et préhenseurs.

- Degrés de liberté
- Architecture (configuration des divers ddl)
- Volumes de travail (occupé, utile)
- Vitesse
- Accélération
- Précision
- Fidélité
- Mode de programmation
- Types de trajectoires (axes coordonnés, traj. continue, etc.)
- Mode de calibration
- Types d'actionneurs
- Types de capteurs
- Données accessoires (dispositifs de sécurité, entretien, MTBF, SAV, prix, ...)

Tableau. 4.1.3 Survol des caractéristiques d'un robot

Il reste presque toujours l'un ou l'autre point non résolu par les moyens habituels, où la créativité du concepteur peut s'exprimer. Les procédés créatifs sont mal connus, et semblent essentiellement basés sur l'intuition. Néanmoins différentes techniques existent pour stimuler de nouvelles idées. Fondamentalement, ce que l'on essaie de faire, c'est de considérer un nombre maximal d'alternatives.

Celles-ci résultent de listes de solutions élémentaires (catalogue des possibilités de liaisons, catalogues des modes d'amenées de pièces etc.) et de tables systématiques où leurs combinaisons apparaissent.

Le concepteur aura donc avantage à considérer de façon systématique les éléments du cours, dont en particulier les caractéristiques essentielles d'un système robotisé, les fonctions possibles d'un préhenseur, ou encore les modes de commandes et les chapitres consacrés aux capteurs...

Si l'opération à automatiser relève de l'assemblage, il trouvera d'autres indications utiles dans la suite de ce chapitre.

- Stabilité de la prise
- Contraintes maximales admissibles sur l'objet
- Complexité de la commande
- Contraintes mécaniques pour réduire les incertitudes de position et d'orientation
- Capacité d'absorption des chocs et des surcharges
- Capteurs incorporés:
  - Détection de proximité ou de présence des objets
  - Position d'éléments internes (par ex. ouverture d'une pince)
  - Forces et moments
  - Peau artificielle
- Multiplicité de la prise (réduction des mouvements et du temps de cycle)
- Poids et dimensions
- Possibilité de réorientation de l'objet manipulé

Tableau 4.1.4. Survol des caractéristiques d'un préhenseur

L'étude de faisabilité est fascinante par l'aspect créatif qu'elle présente. A ce propos, deux remarques peuvent encore s'avérer utiles.

Schématiquement, l'étude prototype se trouve à la conjonction de deux domaines. L'un c'est évidemment celui de l'automatisation industrielle (y compris la robotique...). L'autre, c'est le domaine beaucoup plus général de la gestion de projet. Ce dernier domaine est totalement étranger au présent cours, mais le lecteur intéressé trouvera des indications utiles à ce sujet dans un autre document [DES].

La dernière remarque voudrait attirer l'attention du lecteur sur la nécessité de rester très critique par rapport au cahier des charges. Il est rare que l'ingénieur reçoive, en sens unique, un cahier des

charges détaillé. La plupart du temps, on lui transmet un cahier des charges lacunaire et imprécis, qu'il convient de contribuer à mettre au net. Parfois même, il ne reçoit rien du tout. Dans ce contexte, l'objectif lui aussi doit être remis en question. En particulier, il ne faut pas automatiser de vieux problèmes: il n'est pas rare que l'approche traditionnelle doive être fondamentalement modifiée dans son principe, et ceci en préalable à toute mesure d'automatisation...

Durant l'étude de faisabilité, il est utile d'examiner à plusieurs reprises les éléments du tableau ci-dessous. Le lecteur intéressé trouvera la plupart des points détaillés dans d'autres parties du cours (en particulier ci-après: §(4.1)3.3). De plus, ils sont tous discutés dans une publication faite en anglais [DES2].

- Remettre en cause la conception des éléments
- Acheter les solutions standard
- S'accommoder des incertitudes de positionnement
- Choisir la technologie suivant la complexité de la tâche
- Tirer le maximum des ressources engagées
- Soigner la flexibilité
- Définir les positions de façon simple et naturelle
- Optimiser le critère crucial
- Analyser l'effet des changements d'échelle
- Préférer les procédés "parallèles" de fabrication

Tableau 4.1.5. Quelques éléments de solution en automatisation

Pour le cas de l'assemblage, cette deuxième étape peut gagner à intégrer les éléments B à F de la méthode IMT présentée en Section 6.

#### **2.4 ANALYSE FINANCIERE GROSSIERE (A 30 % PRES)**

Pour réaliser l'analyse grossière de la solution proposée, l'ingénieur devra recourir au moins brièvement aux partenaires économiques: offre (au moins informelle) des fournisseurs, indications générales du département financier de l'entreprise.

La partie 1 du cours, "Concepts généraux", contient également un paragraphe traitant des aspects économiques qui peuvent ici s'avérer utiles.

#### **2.5 ETUDE PROTOTYPE (ESSAIS EN LABORATOIRE ET FEEDBACK DE L'UTILISATEUR)**

Avant de pouvoir affiner l'estimation du coût de la solution projetée, il faut s'assurer de sa viabilité technique. L'étude prototype a donc surtout pour but de valider les concepts avancés.

L'étude prototype doit déboucher sur la description du procédé en termes de séquences d'opérations et de schémas d'implantation. De plus, certains éléments doivent en général être réalisés.

L'étude prototype ne doit pas déboucher sur la solution finale. Elle doit au contraire se limiter au strict minimum, c'est-à-dire à la mise en oeuvre des éléments critiques de la solution. Les éléments déjà bien rôdés n'ont pas à être repris ici. Ils pourront s'intégrer sans surprise dans le système effectif de production.

Il est très utile à ce stade de fixer sur magnétoscope la solution proposée, intégrant des éléments réalisés et des compléments éventuels simulés (par ex. maquettes, posages simplifiés, ou infographie). Sur cette base, l'utilisateur visé peut donner son avis, et les décideurs peuvent se prononcer sur la réalisation définitive de façon plus fondée.

### **3. PROBLEMATIQUE DE L'ASSEMBLAGE**

Jusqu'ici, le chapitre a traité d'une opération générale de production.

Ce paragraphe aborde le sujet plus singulier de l'assemblage. On traite ici de la problématique globale, laissant pour les trois chapitres suivants la discussion détaillée des méthodes de conception de pièces, de l'interaction avec la robotique, et des méthodes d'analyse de tâches d'assemblage.

#### **3.1 INTRODUCTION**

Derrière la volonté d'automatiser les tâches d'assemblage, se cache une motivation puissante: dans les pays industrialisés les opérations d'assemblage représentent en valeur près du quart du produit national brut. Ne gagner que quelques pour mille dans ce contexte se traduit déjà par des sommes énormes en termes absolus.

Le chiffre avancé peut paraître excessif, mais il faut bien voir que les limites de l'assemblage sont parfois difficiles à appréhender sur deux fronts: déplacements des pièces et procédés spécifiques d'attachement. Dans le premier cas, la tâche d'assemblage peut inclure certains aspects de transport ou de manutention. Dans le deuxième cas, c'est le procédé d'attachement qui peut passer au premier plan: coller et riveter relèvent clairement de l'assemblage, alors pour la soudure à l'arc par exemple, cela est moins évident.

L'assemblage se distingue des autres opérations de production par des difficultés et des solutions spécifiques que nous examinons tour à tour ci-dessous.

### 3.2 DIFFICULTES PARTICULIERES DE L'ASSEMBLAGE

L'automatisation de l'assemblage rencontre des difficultés sérieuses tant sur les plans techniques qu'économiques. Ceci est vrai dans le contexte actuel, mais diverses tendances indiquent que dans le futur, la situation devrait s'améliorer.

#### 3.2.1. DEFIS TECHNIQUES

Les difficultés techniques de l'assemblage proviennent de plusieurs types de facteurs, certains relevant directement du nombre d'éléments mis en jeu, et d'autres liés à la complexité inhérente de la tâche. L'assemblage pose également des contraintes sévères en termes de précision de positionnement et de rapidité.

##### *Difficultés liées à la quantité d'éléments*

L'assemblage se distingue des nombreux autres procédés de fabrication industriels par un nombre généralement élevé d'éléments mis en jeu. Presque chaque composant exige son équipement propre de transport et de manutention, aussi la caractéristique de multiplicité des composants se répercute-t-elle à plusieurs niveaux. Il en résulte en particulier un problème de synchronisation des flux de pièces, et la nécessité de prendre en compte les questions de transports. A ces difficultés s'ajoute le fait que les ressources engagées sont rarement homogènes.

Une des conséquences les plus gênantes résultant de la multiplicité des éléments c'est la dégradation de la fiabilité. En première approximation, lorsque plusieurs procédés sont interdépendants, leurs probabilités individuelles d'échec s'additionnent pour donner la probabilité d'échec de l'ensemble. Ainsi par exemple si une opération d'assemblage se déroule en dix étapes imbriquées, chacune fiable à 99%, la fiabilité de l'ensemble tombe à 90% environ!

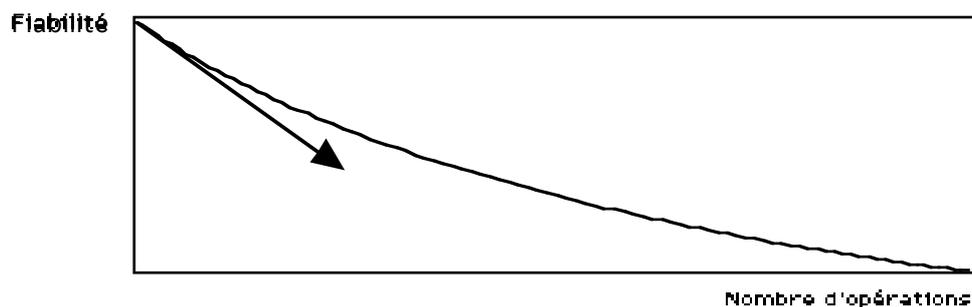


Fig.4.1.1 La fiabilité d'un système se dégrade rapidement en fonction du nombre de ses composants.

La séquence d'opérations élémentaires conduisant à l'assemblage d'un produit s'appelle la "gamme d'assemblage". Plus il y a d'éléments, et plus il y a de gammes d'assemblages possibles. Ceci en soi

ne surprend pas, mais ce qui est gênant, c'est que cette croissance est plus qu'exponentielle (loi combinatoire)! En conséquence il devient difficile de trouver une bonne solution en pratique.

#### *Exigences de précision et de rapidité*

En assemblage, les contraintes de positionnement sont assez serrées, ce qui se complique par le fait déjà mentionné que le positionnement doit s'entendre de façon relative, c'est-à-dire liant mutuellement certains éléments par rapport à d'autres.

Il n'est pas rare par exemple qu'un assemblage se fasse avec des tolérances de l'ordre du centième de millimètre. Faute d'une précision suffisante, coincements, blocages et ruptures peuvent apparaître, en plus d'éventuels échecs sur le plan fonctionnel.

Les exigences de précision sont d'autant plus difficiles à respecter que les procédés d'assemblage requièrent généralement des cadences de travail élevées: De nombreux composants convergent dans cette opération, et doivent être individuellement traités.

#### *Autres facteurs de complexité*

Les tâches d'assemblage sont souvent complexes. En partie, cela résulte comme évoqué du nombre élevé de composants traités. Mais il y a d'autres facteurs, tels la nécessité d'assurer des positionnements relatifs, certaines fonctions accessoires, ou encore la difficulté d'intégration verticale (CIM).

Dans certaines opérations de production telles l'usinage, le positionnement se définit en termes absolus. Dans l'assemblage par contre c'est le positionnement relatif entre récepteurs et composants amenés qui est critique.

Dans la plupart des applications actuelles où des personnes sont engagées, la tâche d'assemblage s'accompagne de fonctions annexes dont la complexité du point de vue technique est généralement sous-estimée. Il en va ainsi du contrôle de qualité, des possibilités de communication ou du suivi de fabrication. Au moment d'automatiser, c'est l'ensemble du travail qui doit être pris en compte.

Enfin, dans le contexte d'une production intégrée, l'assemblage présente le handicap de dépendre de nombreux partenaires amonts.

### **3.2.2. DEFI ECONOMIQUE**

Les difficultés techniques en assemblage sont nombreuses, nous l'avons vu. En plus certains facteurs économiques rendent souvent problématique la viabilité économique des solutions automatisées. Nous en retiendrons deux ici.

D'une part, la main d'oeuvre active en assemblage est, sauf exceptions, professionnellement peu spécialisée. Au contraire d'autres opérations de fabrication, telles la soudure à l'arc, le déplacement de personnes permet des économies relativement faibles.

D'autre part, la valeur des pièces assemblées est souvent très faible. Cela est particulièrement le cas en microtechnique. En conséquence, les investissements que l'automatisation exige paraissent très grands, et il est même, parfois, difficile de les amortir.

### **3.2.3. TENDANCES**

Les paragraphes précédents ont décrit la situation actuelle. Il est intéressant de considérer comment cette situation va évoluer. La pression vers plus d'automatisation devrait s'accroître selon tous les indices considérés: qualité, flexibilité, taille des lots, coûts informatiques, coûts manuels, pression concurrentielle.

Il est indéniable que les exigences de qualité vont croissantes. Non seulement certains visent désormais le zéro défaut, mais de plus on tend à se rapprocher des limites physiques (ex. : miniaturisation), limant ainsi sur les marges de tolérance.

Une autre tendance actuelle dans le contexte de la production est celle d'une flexibilité croissante. Ainsi par exemple les temps de lancement devraient décroître.

L'utilisateur recherche aujourd'hui des produits adaptés ses besoins, personnalisés, ce qui provoque, semble-t-il, une diminution de la taille moyenne des lots.

L'automatisation s'appuie sur l'usage généralisé de ressources informatiques (matériel et logiciel). Or celles-ci voient leurs possibilités croître alors que leur coût tend à diminuer.

Au contraire des coûts informatiques, les coûts en personnel, qui se répercutent de façon directe dans les solutions manuelles, ne font qu'augmenter.

Chaque jour de façon plus marquée, la pression concurrentielle s'accroît à cause de la mondialisation progressive des marchés. Ceci force toutes les entreprises (et en particulier les nôtres) à comprimer leurs coûts de production au minimum possible.

Même s'il est souvent économiquement plus avantageux de produire de façon moins automatisée à l'étranger, d'autres considérations font qu'on cherche à maintenir des capacités de production dans les pays à main d'oeuvre chère.

### **3.3 ELEMENTS DE SOLUTION ADAPTES A L'ASSEMBLAGE**

L'assemblage, on l'a vu, pose de nombreux défis spécifiques. Heureusement, des antidotes existent, dont l'effet est tout au moins partiel. On en passe ici quelques uns en revue. Un tableau résumant les solutions évoquées sera présenté au prochain paragraphe (§4.1/3.4).

#### **3.3.1. ADAPTER LA COMPLEXITE DE L'OUTIL A CELLE DE LA TACHE**

En assemblage, la diversité des tâches est considérable. Il s'agit en priorité, pour chaque cas, d'en évaluer la complexité, et d'y apporter des solutions dont le degré de sophistication est adapté.

L'échec menace lorsqu'une solution complexe (et donc coûteuse...) est retenue pour une application intrinsèquement simple. La situation inverse est tout aussi dangereuse: il est illusoire d'espérer résoudre par un moyen simple une tâche où de nombreux paramètres variables interviennent.

De façon imagée, considérons le déplacement d'une personne entre un point A et un point B. Le choix est limité à deux solutions possibles: utiliser ses pieds, ou prendre l'avion. Il est évident que la première solution est imbattable si A est la cuisine, et B le salon. Alors que si A, c'est Genève, et B, Tokyo, la seconde solution s'impose. Imaginons les conséquences si les deux solutions sont inversées!

Bien qu'il ne s'agisse, dans cet exemple, que d'une analogie, les conclusions qu'on peut en tirer sont largement applicables en assemblage également:

- une erreur de choix peut être catastrophique, aussi bien si la solution retenue est trop simple que si elle est trop sophistiquée.
- les tâches intrinsèquement simples sont beaucoup plus courantes que les complexes.

Voici en assemblage quelques exemples concrets où des alternatives similaires surgissent:

- montage manuel ou ligne de production clef-en-main?
- commande par API ou par ordinateur?
- tournevis ou visseuse électrique?
- alimentation par magasins, bols vibreurs, ou robots dotés de vision?
- robot d'assemblage ou machine spécialisée pour CMS

#### **3.3.2. COMPENSER PAR ACCOMMODATION PASSIVE**

Toute opération d'assemblage implique des déplacements de composants, et des positionnements relatifs entre eux. Or les incertitudes sur la position et l'orientation des éléments (composants eux-mêmes, mais aussi nombreux accessoires, tels que posage, systèmes d'amenée, préhenseurs, etc.) sont très nombreuses.

Alors que le débutant pense devoir mesurer ces incertitudes pour pouvoir les corriger, l'expérience montre que dans la vaste majorité des cas, elles peuvent être éliminées "à l'aveugle", grâce à des mécanismes ou à des mouvements à compliance sélective.

Ces solutions passives varient fortement en complexité et peuvent aller d'un simple appui contre butée, jusqu'au mécanismes autocentreurs (en particulier RCC, [WHI]), et à l'architecture de type SCARA pour les robots ([MAK]).

L'accommodation passive est discutée de façon détaillée au §4.3 *Accommodation et capteurs d'efforts*.

### **3.3.3. COMPENSER ACTIVEMENT**

Bien que l'accommodation passive soit très souvent possible, et qu'elle apporte alors la meilleure solution, il arrive parfois qu'elle ne soit pas applicable; on doit alors recourir à l'utilisation de capteurs, et, de façon conjointe, à des actionneurs.

La gamme des capteurs est grande, allant des plus simples, capable d'acquérir un seul bit par mesure (microrupteur, capteurs de proximité inductifs ou optoélectroniques, etc.), jusqu'au capteurs à haut débit d'information, tels certains capteurs d'efforts et de distances, ou les capteurs d'images.

Entre deux, délivrant de l'ordre d'une dizaine de bit par seconde, on utilise souvent en accommodation active des capteurs de distances à ultra-sons, des capteurs inductifs (déplacement d'un noyau dans des bobines, ou proximité d'un métal), ou encore des barrettes de diodes (mode direct ou triangulation).

Pour agir, on dispose également d'une palette de ressources. Les plus simples se commandent à 1 bit: électrovannes commutant des dépressions ou des jets d'air, vérins tout-ou-rien, relais, ou encore électro-aimants. A l'autre extrême, on trouve des actionneurs asservis, tels par exemple les moteurs synchrones auto-pilotés.

Les capteurs sont discutés dans d'autres parties du cours (§1.3, 4.3, 4.4). Il en va de même pour les actionneurs (§1.4).

Pour les robots, on a vu dans la partie §3.4 *Coordination* que les meilleurs contrôleurs étaient capables de modifier les trajectoires programmées sur la base de données provenant des capteurs, et ceci au rythme d'environ 40 mesures par seconde. Une telle technique est particulièrement appropriée pour l'accommodation active en cours de production (par ex. dépôt de colles...) ou pour la phase terminale des mouvements (par ex. accostage et insertion, en assemblage).

### **3.3.4. CONCEVOIR POUR L'ASSEMBLAGE**

Concevoir les produits en tenant compte de leur facilité d'assemblage; et concevoir conjointement les produits nouveaux et leurs moyens de production; bien que ces idées ne soient pas nouvelles, ce n'est que depuis une dizaine d'années qu'elles ont pris un grand relief.

Les principes qui en découlent sont maintenant largement répertoriés, et certains ingénieurs tentent actuellement de les intégrer aux logiciels de modélisation géométrique, pour faire de ceux-ci de véritables outils d'aide à la conception.

La démarche est extrêmement importante, car l'expérience montre qu'il est beaucoup plus simple de corriger un problème à sa source, plutôt qu'au niveau de ses lointaines répercussions (opération de production, test final, service après-vente...). On lui consacre donc un chapitre séparé ci-dessous (§(4.1.)4. *Conception en vue d'assemblage automatisé*).

### **3.3.5. STOCKS TAMPONS**

Pour limiter la dégradation de la fiabilité, une solution traditionnelle passe par l'établissement de stocks tampons. Ceux-ci permettent de découpler un procédé complexe en sous-procédés indépendants, ce qui, selon la loi mentionnée dans ce chapitre en §(4.1)2.1, a un impact direct sur la fiabilité de l'ensemble.

Il arrive aussi que certaines opérations de production, ou que certaines livraisons ne puisse de faire qu'à un rythme très inégal. Il est là aussi nécessaire de prévoir du stock pour régulariser le flux aval (par ex. production saisonnière de raquettes de tennis, ou livraisons de mémoires à semi-conducteurs).

Pour les raisons évoquées ci-dessus, les stocks s'avèrent difficilement évitables. Il faut prendre garde cependant à en limiter le nombre et la taille aux plus petites valeurs possibles. Pour cela, il faut s'efforcer d'augmenter la qualité (fiabilité accrue de chaque opération), et diminuer les temps de lancement (production à la demande).

### **3.3.6. ADOPTER DES SOLUTIONS FLEXIBLES**

Le catalogue de solutions pour l'automatisation comprend divers systèmes se caractérisant par leur apport en flexibilité. La flexibilité dénote au premier chef la possibilité de lancer rapidement la production d'un nouveau type de pièces, ou d'alterner facilement différents genres de lots.

La flexibilité de l'outil de production apporte plusieurs avantages. D'une part elle permet d'amortir les mêmes investissements sur plusieurs modèles et donc sur plus de produits que les machines rigides traditionnelles. D'autre part, elle permet également de limiter les stocks, en synchronisant sur la

demande la fabrication de petits lots additionnels (en particulier, lancement de type "kanban"). Enfin, la mise en production de nouveaux types de produits peut se faire rapidement.

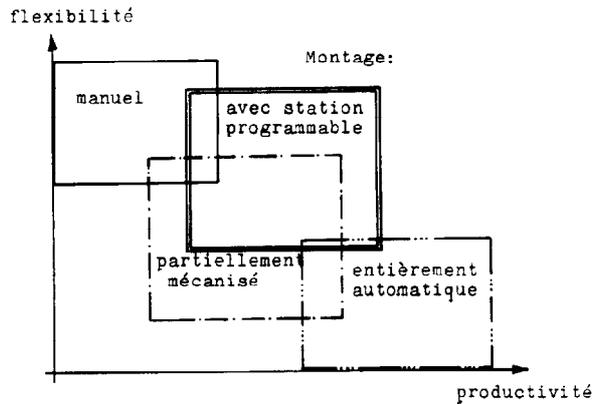


Fig.4.1.2 Différentes techniques de montage évaluées selon leur productivité et leur flexibilité [SOL]

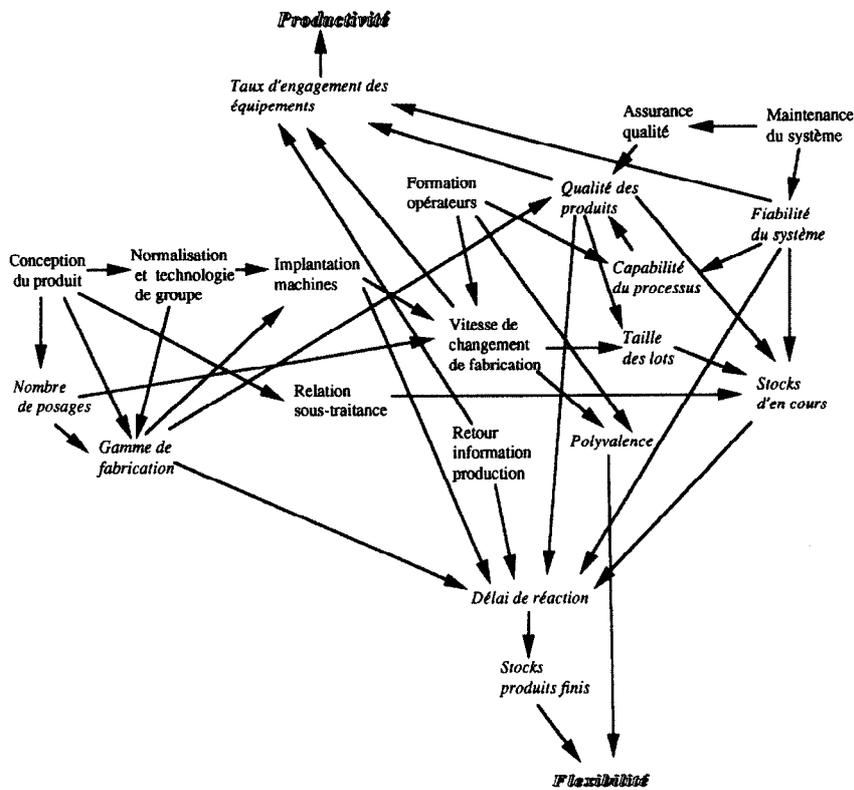


Fig.4.1.3 Représentation schématique des facteurs affectant productivité et flexibilité [MUL]

Actuellement, la flexibilité se rencontre relativement facilement au niveau de l'informatique ou des bras manipulateurs. Mais des problèmes sérieux subsistent en ce qui concerne les amenées de pièces (par ex. un bol vibreur traditionnel réclame souvent une semaine de travail pour s'adapter à une nouvelle pièce!), les posages et les préhenseurs. De même, les communications sont rendues difficiles par l'absence de conventions uniformes.

### **3.3.7. UTILISER DES COMMANDES PUISSANTES**

Les tâches d'assemblage sont parfois difficiles à automatiser. Même si manuellement certaines opérations se réalisent sans difficulté à la main, le débutant est souvent surpris du défi technique que cela représente. Pour ces cas rebelles aux solutions simples, des ressources plus sophistiquées doivent être mises à contribution. On parlera ici des commandes multi-tâches, et des langages de programmation facilitant l'utilisation de repères cartésiens.

Actuellement, on attend des meilleures commandes qu'elles gèrent simultanément plusieurs tâches indépendantes ou partiellement synchronisées ("multi-tâches"). L'idée est ici que l'utilisateur gagne à subdiviser son problème d'automatisation en sous-tâches partielles, définies et gérées individuellement.

Comme nous l'avons vu au §3.2, des langages de programmation existent, qui permettent à l'utilisateur de définir les positions nécessaires à l'aide de translation et de rotation de systèmes d'axes orthogonaux. Ce principe est extrêmement puissant, et ne peut s'ignorer pour tous les cas où des trajectoires sont nombreuses. On peut ainsi, en particulier, cascader les positionnements relatifs, ce qui permet une description méthodique, très logique, de la plupart des mouvements. Il faut malheureusement que l'utilisateur de tels systèmes reçoive une certaine formation, et ceci est encore bien trop peu répandu en Suisse. Alors qu'en informatique les besoins extraordinaires de formation ont été assez bien perçus et que des moyens adéquats y ont été dédiés, en ce qui concerne la gestion de positions et de trajectoires dans l'espace (6ddl), la situation est encore insatisfaisante.

Diverses tentatives ont été faites pour aller plus loin encore dans l'aide à la définition de tâches en assemblage, tels certains langages proposés par IBM (Autopass), ou l'Université d'Edimbourg (Rapt, [POP]), ou encore certains travaux de recherches européens (p. ex. [BER]). Aucun produit disponible commercialement n'en est encore ressorti.

### **3.4 CONCLUSION**

En conclusion de ce chapitre consacré à la problématique de l'assemblage, le tableau 4.1.6 présente les éléments de solutions habituellement bien adaptés à diverses particularités d'une application.

PARTICULARITES DE L'APPLICATION	SOLUTIONS PROBABLES
Capteurs ou actionneurs simples, tout-ou-rien (1 bit)	Automates Programmables Industriels (API)
Contenu informationnel plus riche, capteurs ou actionneurs travaillant par nombres (n bit)	Microcontrôleurs
Applications complexes, avec un degré de communication homme-machine significatif	Ordinateurs industriels (OI)
Un ou plusieurs axes de mouvement; peu de positions requises le long des axes	Eléments tout-ou-rien (actionneurs linéaires ou rotatifs, généralement pneumatiques), avec API
Un ou plusieurs axes de mouvement; nombreuses positions requises, programmables, le long des axes	Moteurs pas-à-pas ou asservis, avec micro-contrôleurs ou OI, suivant la complexité.
Mouvements multiples, avec changements de production fréquents	Robots industriels (RI)
Trajectoires complexes dans l'espace	RI, typiquement avec 3 à 6 degrés de liberté (ddl).
Incertitudes de positionnement ou d'orientation des pièces, de l'outil ou des équipements périphériques	Contraintes mécaniques passives (par ex. supports ou préhenseurs auto-centrants, éléments RCC, architecture à compliance sélective). Voir aussi le point suivant.
Elimination des incertitudes de positionnement impossible par moyens passifs	capteurs et actionneurs programmables
Variations complexes de l'environnement	Equipement de perception spécialisé (vision, capteurs de forces et de moments, capteurs "tridimensionnels", etc.)
La conception des composants peut être remise en question	Exiger des alternatives fonctionnelles qui facilitent l'automatisation de la production
Une parmi toute une classe d'applications	Solution standard du marché (par ex. machine-outil, robot de mesure, chariots filoguidés, transporteurs de palettes, etc.)
Tâche fondamentalement complexe (beaucoup de paramètres du procédé, incertitudes de position multidimensionnelles, etc.)	Des solutions sophistiquées sont inévitables (par ex. environnement de programmation puissant, interface homme-machine graphique, mouvements robotisés, etc.)
Exigences de flexibilité	Systèmes de productions paramétrés, et intégration de la production par ordinateur
Des éléments d'automatisation simples et plus complexes sont prévus simultanément	Tenter de faire migrer les solutions plus simples sur l'équipement plus puissant. Parmi les avantages attendus, on trouvera une baisse de l'investissement et des coûts de gestion de composants. Par contre, une solution modulaire et distribuée est parfois préférable, et le temps de cycle risque de se dégrader.
On recherche un certain degré d'optimalité	Est-ce bien nécessaire? ... il est possible techniquement d'optimiser virtuellement n'importe quel critère. Mais ceci n'est utile que si le critère retenu a un impact sur la production.

Tableau 4.1.6 Eléments de solution standard pour divers aspects d'une application

#### 4. CONCEPTION EN VUE D'ASSEMBLAGE AUTOMATISE

Dans les domaines de l'ingénieur, les meilleures techniques se sont développées sur des bases scientifiques. Même si l'analogie au monde naturel a parfois stimulé l'imagination, il s'est généralement avéré préférable d'adopter la démarche analytique, fondée sur l'observation de principes physiques fondamentaux pour aboutir à des solutions viables.

Dans le cas de l'assemblage, l'approche analogique consiste par exemple à développer des robots destinés à mimiquer l'homme en grand détail: deux yeux, dix doigts... Cette approche est évidemment vouée à l'échec. On voit par contre certains robots, tels les SCARA, où la démarche analytique

aboutit à des solutions très performantes. Dans ce dernier exemple, les caractéristiques de compliance sélective n'ont pas d'équivalent pour le bras humain, et cependant les performances du robot en assemblage industriel typique sont bien supérieures.

Traditionnellement, les pièces étaient conçues pour un assemblage manuel. Mais la situation change, et il y a beaucoup à gagner si la conception se fait en vue de l'assemblage automatisé. Le concepteur dispose en général d'une très grande liberté à ce stade de la fabrication. La fig. ci-dessous montre un exemple où les mêmes contraintes fonctionnelles donnent lieu à six variantes! Il s'agit de retenir celle qui entraînera l'opération d'assemblage la plus aisée.

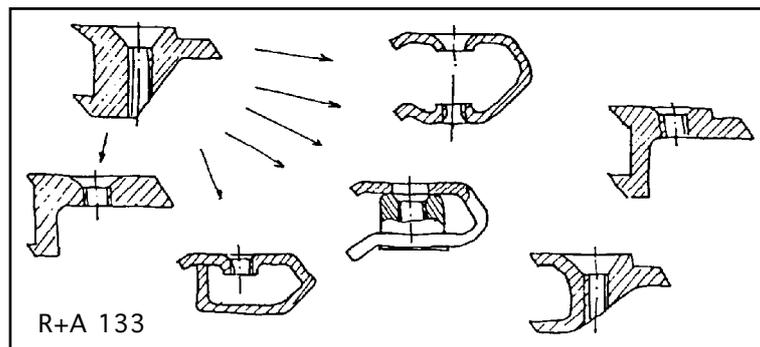


Fig. 4.1.4 Lors de la conception, de nombreuses variantes sont possibles pour satisfaire les contraintes fonctionnelles d'une pièce. Il s'agit de choisir les plus favorables en vue d'assemblage.

#### 4.1 NECESSITE DE L'ASSEMBLAGE

Une première approche pour simplifier l'assemblage consiste à limiter au minimum le nombre de pièces à assembler. A la limite, il s'agirait en fait de le supprimer. Naturellement, ceci n'est en général pas possible pour des raisons fondamentales.

Pour déterminer le nombre minimal de parties dans un assemblage donné, quatre critères ont été définis. Si un ou plusieurs d'entre eux sont remplis, alors l'élément doit être une pièce séparée, imposant par là même une opération ultérieure d'assemblage. Les critères sont les suivants:

- l'élément bouge dans un assemblage pendant le fonctionnement normal du produit (même là: n'est-il pas possible de permettre le mouvement par déformation élastique?).
- l'élément est fait d'un matériau différent des parties assemblées avec lui (isolation, vibrations, etc.).
- l'élément doit être désassemblé pour les services (entretien).
- l'élément accouplé avec les autres parties doit prévoir l'assemblage d'autres éléments répondant aux trois premiers critères.

## 4.2 CONCEPTION DES PIÈCES

Lorsqu'il s'agit d'automatiser l'assemblage, la simplification du procédé de manufacture et la construction modulaire sont des éléments déterminants.

Mais il est aussi très utile de prendre en compte les possibilités d'assemblage lors de la conception de chaque composant individuel. Pour cela, un certain nombre de critères existent. Voici certains de ces critères illustrés par des exemples (d'après [BOR],[AND], [BAI] et [OWE]).

Lorsque la conception du produit et la conception des procédés de fabrication sont intégrées, on parle alors d'ingénierie simultanée, ou de développement parallèle. Cette pratique est souvent recommandée aujourd'hui, mais n'est pas foncièrement nouvelle.

### COINCEMENTS

L'usinage des pièces doit permettre d'éviter les coincements lors des assemblages. Pour cela, il faut :

- chanfreiner les faces assemblées
- éviter les introductions simultanées
- éviter les glissements de longues portées.

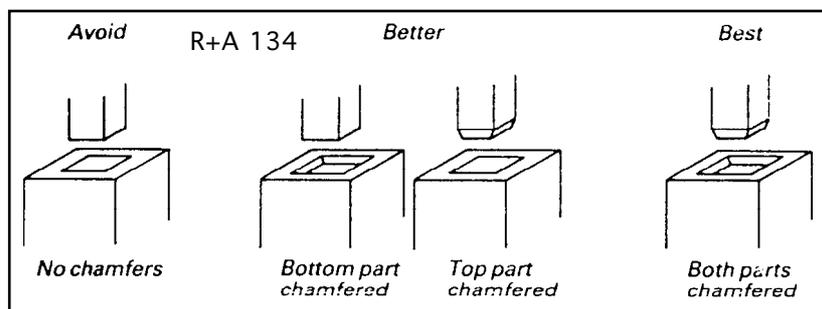


Fig. 4.1.5 Les chanfreins contribuent à réduire les exigences de précision, et ainsi évitent bien des coincements.

### FORMES D'AIDE

Les pièces ne doivent pas requérir une action supplémentaire pour être alignées lors de l'assemblage. Avec l'aide de guides, on peut créer des pièces ne pouvant s'assembler que d'une seule façon.

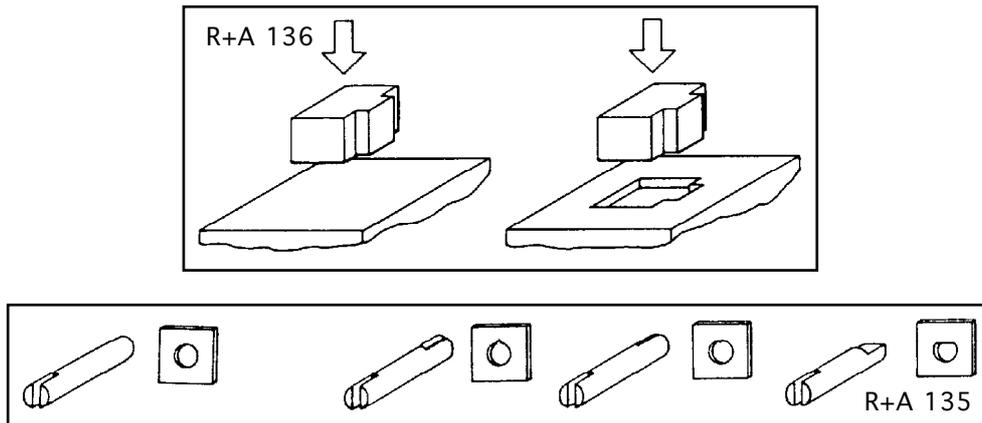


Fig. 4.1.6 Exemples de formes imposant une orientation bien définie

**ORIENTATION**

Les parties composées de traits caractéristiques tels que trous, entailles ou pointes et dont l'orientation doit respecter ces caractéristiques imposent de trouver une forme correspondante pour faciliter leur orientation. La forme percée de la figure ci-dessous n'a pas d'autre but.

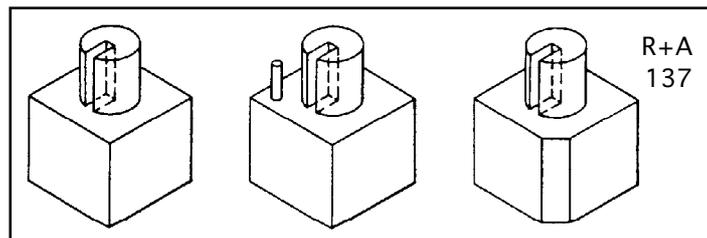


Fig. 4.1.7 Le téton ou le coin coupé facilitent l'estimation d'orientation et la réorientation éventuelle du composant.

**SYMETRIES**

Dans la mesure du possible, les pièces doivent être symétriques. Plus un élément comporte de symétries, plus il peut être assemblé de différentes manières. Si néanmoins une pièce doit rester asymétrique, il faut qu'elle le soit clairement.

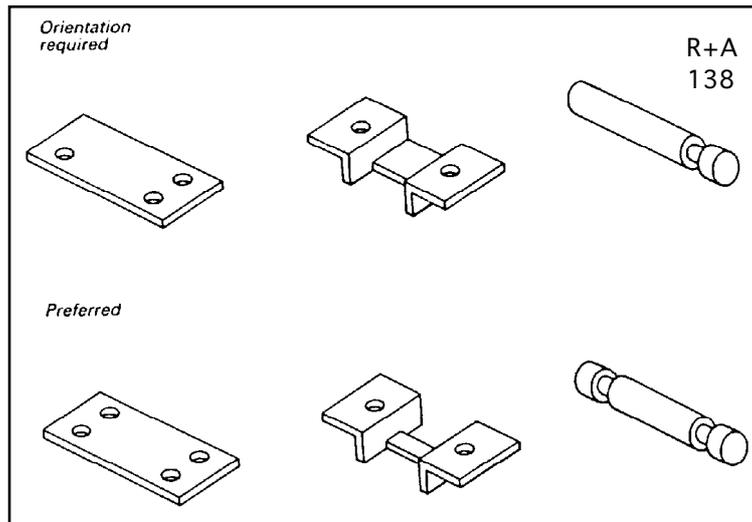


Fig. 4.1.8 Equivalents fonctionnels limitant les exigences de réorientation.

**PREHENSION**

Les dimensions, l'état de surface et la forme des pièces doivent faciliter leur préhension par des organes de type ventouse ou électromagnétique. Si tel n'est pas le cas, des préhenseurs mécaniques doivent être utilisables. A cet effet, les pièces doivent comporter des éléments (trous, encoches, etc...) pour faciliter la préhension et éviter qu'elles ne s'emmêlent.

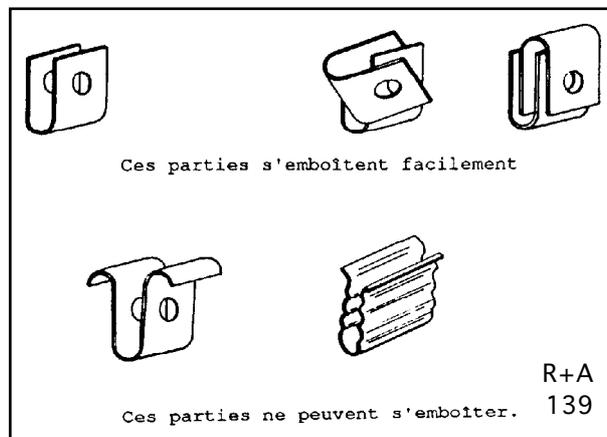


Fig. 4.1.9 Exemples d'équivalents fonctionnels à risques limités d'emmêlement.

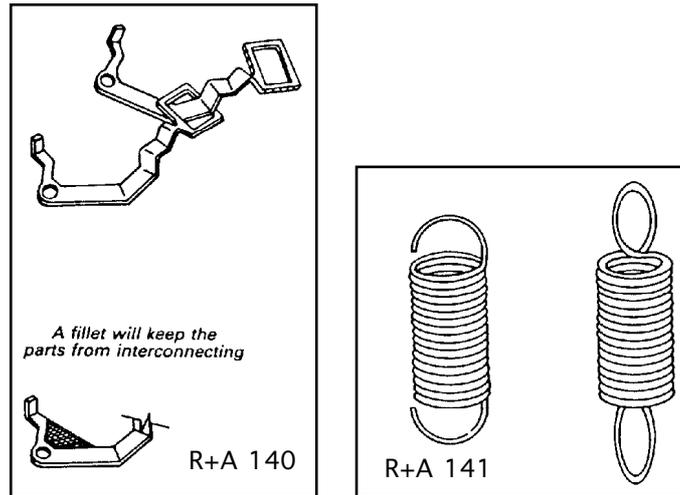


Fig. 4.1.10 Autres exemples d'équivalents fonctionnels à risques limités d'emmêlement.

### **AMENEES DE PIECES**

De nombreuses petites pièces peuvent être traitées à l'aide de bols vibreurs. Il est important que ces pièces ne coincent pas ni ne s'emmêlent dans le bol ou dans les rails de guidage. Pour éviter ce problème, il faut respecter l'un ou plusieurs des principes suivants:

- éviter les arêtes tranchantes,
- disposer les surfaces accouplées perpendiculairement à la direction de déplacement dans le rail,
- prévoir la base des pièces plane,
- placer le centre de gravité aussi bas que possible,
- créer des rainures de guidage (pour rail et pièces).

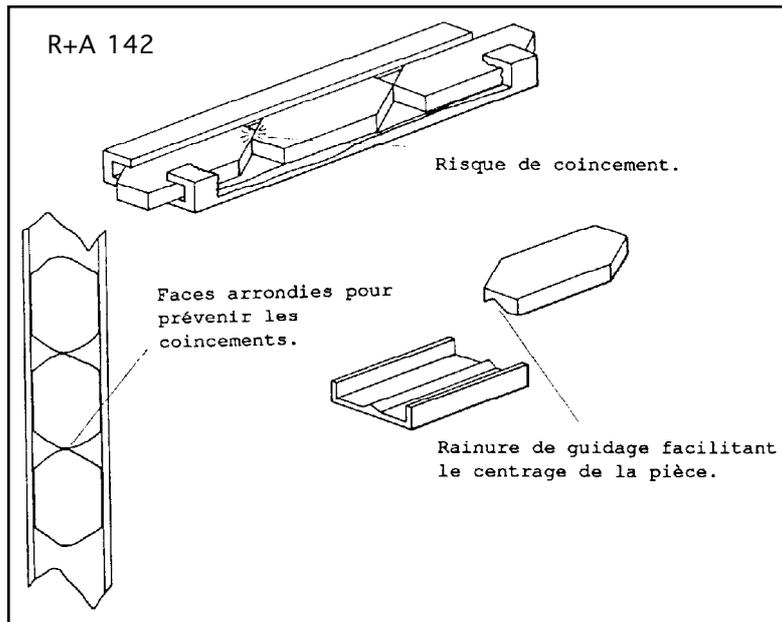


Fig. 4.1.11 Equivalents fonctionnels limitant les risques de coincement durant l'amenée de pièces.

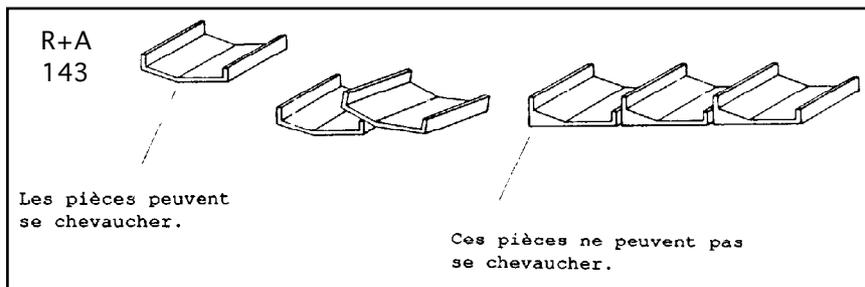


Fig. 4.1.12 Autres équivalents fonctionnels limitant les risques de coincement durant l'amenée de pièces.

**LIAISONS**

La méthode de fixation des pièces doit être la plus simple possible. Des clips remplacent avantageusement les vis et les écrous. De plus, on gagne à les agencer de façon à ce que l'assemblage s'effectue par un mouvement vertical.

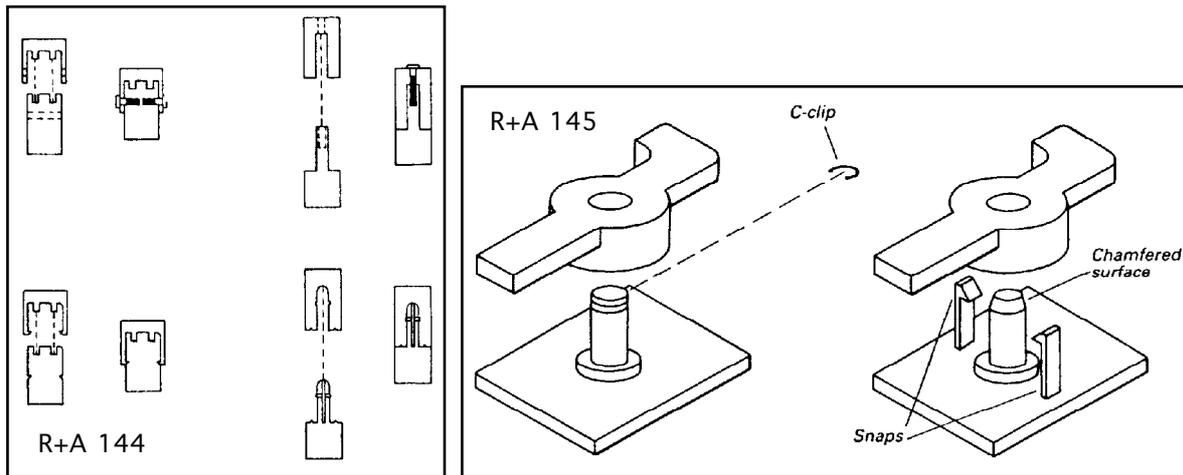


Fig. 4.1.13 Liaisons faciles à réaliser

**SURFACES DE CONTACT**

Lorsque plusieurs surfaces peuvent entrer en contact, il faut prendre garde à procéder par étapes, de façon à éviter que les contacts soient simultanés. Dans ce dernier cas, les blocages sont beaucoup plus probables, car la probabilité de succès de plusieurs opérations simultanées est le produit des probabilités de succès indépendantes de chacune d'entre elles. Il y a donc forcément dégradation des performances, car ces probabilités sont forcément inférieures à 1.

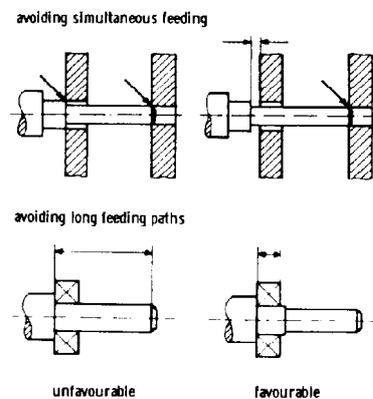


Fig. 4.1.14 Eviter les accostages simultanés

**DIRECTION D'ASSEMBLAGE**

Il est préférable de choisir des mouvements d'assemblage simples. Dans la mesure du possible, on prévoira des mouvements linéaires verticaux. De même, il faut au maximum éviter les réorientations/retournements des récepteurs.

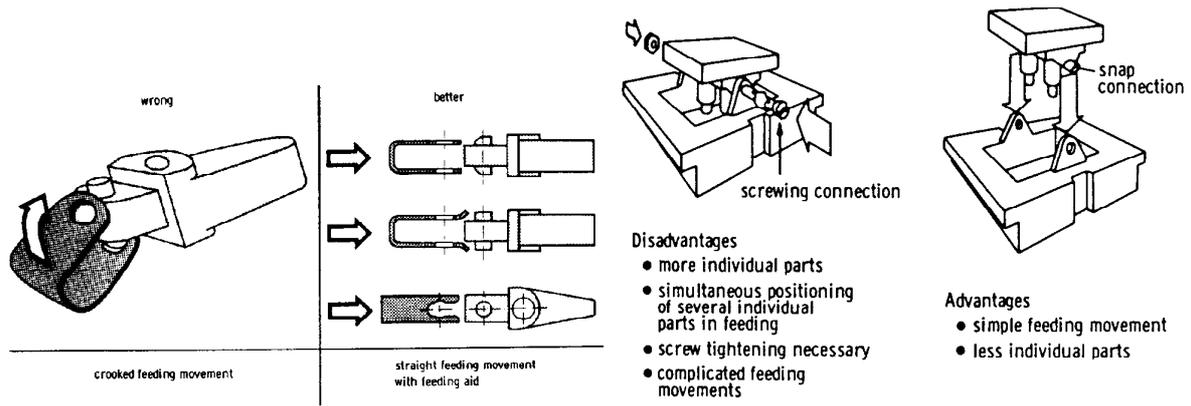


Fig. 4.1.15 Préférer les mouvements linéaires verticaux d'assemblage

**FORME DES TETES DE VIS**

Si des vis sont nécessaires (blocage précis, nécessité de démontage ultérieur, etc.), la forme des écrous et des têtes doivent faciliter leur réorientation et leur prise.

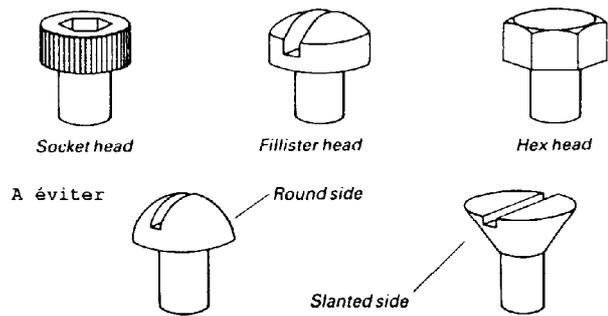


Fig. 4.1.16 Exemples de variantes possibles pour une tête de vis.

**CABLES**

Il convient d'éviter de connecter des parties en utilisant des câbles. En électronique par exemple, on tentera de fixer les composants sur un circuit imprimé. Le circuit sera rigidement enfoncé dans la partie correspondante.

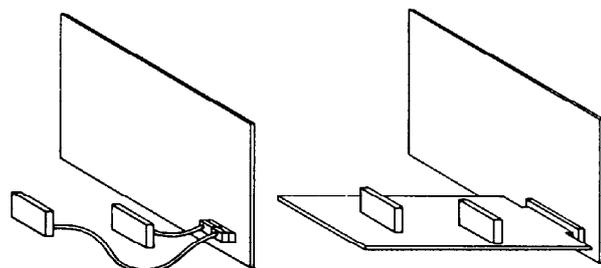


Fig. 4.1.17 Préférer la variante rigide.

### COMPOSANTS ATTACHES

Il est parfois intéressant de conserver aussi longtemps que possible les composants attachés en continu. Leur manutention est grandement facilitée. Ceci est par exemple toujours fait en technique CMS.

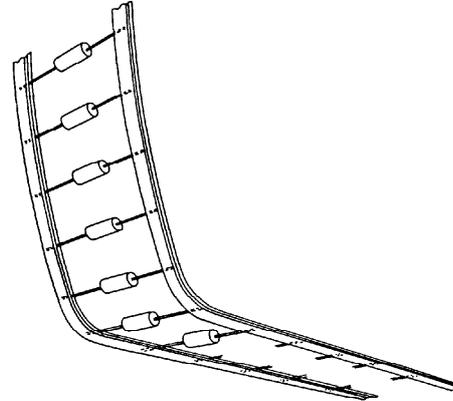
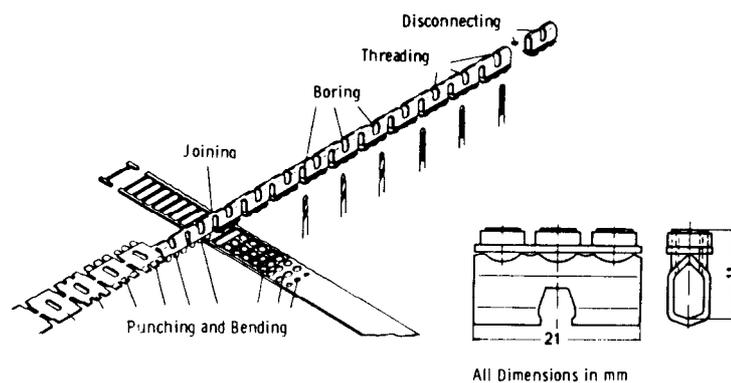


Fig. 4.1.18 Alimentation de composants en bande.

Fig. 4.1.19 Fabrication de composants en bande.



### REMARQUE GENERALE

Les critères sus-mentionnés ne sont pas toujours applicables, et cette liste n'est pas exhaustive. Le but de l'application de tels critères est d'obtenir le meilleur rendement des installations. Il est important de ne pas perdre de vue que le coût occasionné par la conception améliorée des pièces ne doit jamais dépasser le bénéfice ainsi obtenu à l'assemblage.

### 4.3 RECAPITULATION

Les opérations de base de l'assemblage, et dont il faut tenir compte lors de la conception de nouvelles pièces, sont les suivantes: orientation, transport, mise en place et liaison proprement dite.

Le tableau 2.3.1 donne un aperçu des principes de base permettant de concevoir de bons composants (d'après [AND]).

<p style="text-align: center;"><b>Conception de composants facilitant l'assemblage</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Principes:</b></p> <p>Eviter les opérations d'assemblage:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- intégrer un composant dans un autre</li><li>- utiliser des méthodes de production facilitant l'intégration.</li></ul> <p>Eviter les réorientations:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- utiliser des magasins</li><li>- utiliser des composants liés en bandes</li><li>- produire les composants en cours d'assemblage.</li></ul> <p>Faciliter les opérations de réorientation:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- éviter les brides et les crochets</li><li>- ajouter des facettes spéciales sur le composant pour faciliter l'orientation</li><li>- éviter les composants de qualité médiocre</li><li>- rendre les composants symétriques...</li><li>- ... ou les rendre clairement asymétriques</li></ul> <p>Faciliter le transport:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- concevoir le composant de façon à ce qu'il soit simple à transporter</li><li>- concevoir un élément récepteur</li></ul> <p>Simplifier les mouvements</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- assemblage selon un ddl, de préférence linéaire</li><li>- prévoir des éléments de guidage sur le composant (rainures, faces planes, etc.)</li></ul> <p>Choisir la bonne méthode pour réaliser les liaisons:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- éviter les assemblages</li><li>- éviter les éléments de liaison séparés</li><li>- utiliser des méthodes de production favorisant l'intégration</li></ul>
---

Tableau 4.1.6 Aperçu des principes de base permettant de concevoir de bons composants pour un produit assemblé.

#### 4.4 EXEMPLE DE CONCEPTION EN VUE DE L'ASSEMBLAGE AUTOMATISE: LA TECHNIQUE CMS

Ces dernières années, la fabrication de circuits électroniques a subi deux révolutions. D'une part, on intègre désormais un maximum de fonctions sur une seule puce. Mais en plus, on réexamine le mode d'assemblage traditionnel des circuits imprimés, ce qui conduit à la technique CMS (Composants Montés en Surface), aussi appelée SMT ou SMD en anglais. Le texte qui suit est pour l'essentiel tiré de [DIS].

Le développement et la fabrication d'appareils électroniques visent à réaliser, dans la plupart des cas, les conditions suivantes: miniaturisation, réduction des frais par fonction et amélioration de la qualité.

La technique CMS se caractérise par le fait qu'elle apporte une contribution décisive à la réalisation de ces trois buts:

### **MINIATURISATION**

Les CMS sont beaucoup plus petits que les composants classiques correspondants. De plus, il est possible d'équiper les deux côtés des circuits imprimés. Si l'utilisation est optimale la surface, la place et le poids des circuits électroniques peuvent être réduits de moitié ou même plus.

### **REDUCTION DES FRAIS**

Plusieurs facteurs jouent ici un rôle:

- *Circuit imprimé plus petit.* Etant donné que la technique CMS n'est généralement pas plus exigeante quant au matériau du print, l'économie réalisable correspond à la réduction de la surface mentionnée plus haut. Même si l'on prend un matériau plus cher, les coûts supplémentaires seront plus que compensés par l'économie de surface.

- *Trous moins nombreux.* Les frais de perçage des prints sont complètement ou partiellement éliminés (pas d'enfichage de composants à fils).

- *Montage plus efficace.* Les automates de montage CMS se distinguent par leur fiabilité à traiter pratiquement toutes les formes de composants CMS. Un circuit imprimé peut ainsi être complètement équipé par un seul automate. Par contre, avec les composants classiques, on a besoin d'un automate pour les éléments radiaux et d'un autre pour les éléments axiaux. De plus, on dispose aujourd'hui d'automates CMS de différentes capacités de placement (petite, moyenne, grande). Ainsi, un utilisateur peut adapter sa capacité de production à ses besoins et passer du placement manuel au placement automatique, si nécessaire, et ainsi maintenir ses frais sous contrôle. Pour les gros utilisateurs, la technique CMS est particulièrement intéressante car il existe sur le marché des automates qui ont des cadences de placement de 30'000 à 360'000 CMS/h.

La technologie CMS englobe trois domaines principaux qui, par une multiplicité de paramètres, s'influencent simultanément: les composants montés en surface, l'infrastructure de fabrication et les procédés de fabrication de composants.

De tels systèmes permettent d'abaisser les frais de montage moyens par composants jusqu'à la moitié, voire un cinquième de ceux d'automates pour composants à fils.

- *Economies secondaires*. Celles-ci résultent de la diminution du nombre des tiroirs (19"), des appareils plus petits (boîtiers), des poids transportés plus faibles, des volumes de CMS stockés plus petits, et de la réduction des surfaces de fabrication grâce à la compacité des automates de placement CMS. En outre, le fait que certains automates CMS se distinguent par une sécurité de montage extrêmement élevée a pour conséquence d'abaisser encore les frais pour contrôle de qualité et pour réparation.

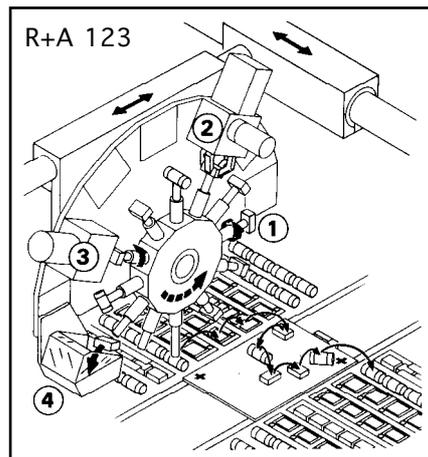


Fig. 4.1.20 Machine rapide pour assemblage CMS (Siemens)

### **QUALITE**

A part le fait que le taux d'erreurs de placement est sensiblement plus faible en CMS qu'en composants classiques (moins de 40 pièces par million) ayant pour résultat un plus haut niveau de qualité des appareils livrés, il faut également préciser que les composants eux-mêmes sont, dans la plupart des cas, de meilleure qualité que leurs homologues à fils. Ceci concerne autant la qualité de la livraison (conformité) que la fiabilité. Ce fait a pour origine différentes causes: pour une part, il s'agit de composants ayant été développés pour des applications hautement professionnelles et devant, pendant des années satisfaire à des exigences exceptionnellement élevées (exemples: condensateurs céramiques, chips et transistors en boîtier SOT-23 pour la technique hybride). Dans d'autres cas, il s'agit de composants de la nouvelle génération bénéficiant des procédés et techniques des plus modernes, etc.

En raison de leurs faibles dimensions et de l'absence ou de la faible longueur de leurs connexions, les CMS présentent de meilleures propriétés hautes fréquences (HF) et des temps de propagation plus courts.

En résumé, l'introduction de la technique CMS constitue pour l'électronique un progrès décisif par rapport au chemin parcouru jusqu'ici. Dans cette optique, tous les composants destinés à la technique CMS sont soumis à des contrôles de fabrication et de qualité extrêmement rigoureux.

## **5. PARTICULARITES DE LA ROBOTIQUE POUR L'ASSEMBLAGE**

Dans l'ensemble, robotique et assemblage sont des domaines très différents. Mais il est également vrai que ces domaines se recoupent dans de nombreuses applications. Dans ce chapitre, on s'intéresse précisément à ces situations où robotique et assemblage se rejoignent.

Dans un premier temps, on discute ce que la robotique apporte à l'assemblage, et ensuite on examine l'effet réciproque des particularités des tâches d'assemblage sur les techniques de la robotique.

### **5.1 IMPACT DE LA ROBOTIQUE SUR L'ASSEMBLAGE**

Traditionnellement, le spécialiste de l'assemblage devait choisir entre deux solutions très différentes: soit la tâche à automatiser était suffisamment simple pour se laisser automatiser par des techniques simples: mouvements en boucle ouverte, capteurs tout-ou-rien, ou actionneurs travaillant contre butées. Ou alors elle était plus complexe et il était nécessaire de recourir à de la main d'oeuvre.

La robotique apporte une solution intermédiaire en termes de productivité et de flexibilité. Il existe une frange de plus en plus grande d'applications où la robotique apporte la solution optimale du point de vue économique. Ce sont des applications où les méthodes simples échouent, et où la complexité n'est pas suffisante pour justifier le coût du travail humain au niveau direct de l'opération d'assemblage.

Les informaticiens "purs et durs" jugent possible de repousser les limites des systèmes automatisés en recourant aux OI non spécialisés, et aux axes asservis. Mais en pratique, dès que des trajectoires multidimensionnelles sont requises, des développements importants sont nécessaires en termes de coordination d'axes et de langages de programmation. Ces développements sont bien plus significatifs qu'il n'y paraît, car on est trompé par la grande habileté naturelle de l'homme à se mouvoir dans l'espace. Pour une grande part, ces développements technologiques, ainsi que les bases théoriques associées ont déjà été faits en robotique, et il serait vain de consacrer des ressources à les réinventer.

La robotique a également une tradition en perception, c'est-à-dire dans l'analyse de données provenant de capteurs. Ceci s'avère précieux pour bien des tâches en assemblage.

Vu l'aspect programmable des déplacements robotisés, ainsi que la fonction de communication dont tout contrôleur de robot est capable, la robotique apporte énormément en flexibilité et en possibilité d'intégration.

## **5.2 IMPACT DE L'ASSEMBLAGE SUR LA ROBOTIQUE**

La robotique a essentiellement pour mission de déplacer des objets le long de trajectoires multidimensionnelles. Lorsqu'elle s'implique dans l'assemblage, elle rencontre d'une part des facteurs simplificateurs mais aussi des défis spécifiques.

### ***FACTEURS SIMPLIFICATEURS***

La problématique de la robotique se simplifie singulièrement lorsque le champ d'application se restreint à l'assemblage industriel. Parmi les facteurs principaux, on note ainsi la légèreté des pièces, la structure de l'environnement, la stabilité, les semi-liaisons, les possibilités d'accommodation passive, ainsi que la possibilité d'intervenir sur la conception des produits à manipuler.

Une étude déjà ancienne, chez General Motors, avait fait apparaître un résultat surprenant, compte tenu de la tradition de gigantisme et de lourdeur des automobiles américaines: Dans de tels produits, plus de 95% des composants à assembler pèsent moins de 5 livres (2.5 kg)!

Le milieu industriel est fortement structuré: les droites, les parallèles et les perpendiculaires abondent. Les surfaces sont planes. Les objets, bien connus. En général l'environnement est maîtrisé: même si des jets de liquides ou des projections de copeaux par exemple sont inévitables, leur rayon d'action est clairement délimités, et il est possible de s'en protéger...

Il y a encore quelques années, les plus grandes conférences internationales sur les robots industriels n'admettaient pas les contributions concernant les robots mobiles. Ceux-ci, bien qu'utiles pour certaines applications de laboratoire ou d'exploration, n'offraient pas d'intérêt pratique en milieu industriel. Dans ce dernier contexte, il suffit presque toujours que le robot ait sa base rigidement fixée au sol. Il y a là un facteur de simplification important.

En assemblage, l'application laisse souvent des degrés de liberté aux composants assemblés. Par exemple, l'insertion d'un cylindre dans un alésage peut s'exécuter avec une valeur libre de la rotation du cylindre autour de son axe de symétrie.

Les stations d'assemblage comportent généralement de nombreuses butées et des guidages multiples, ce qui permet aux robots, par simple accommodation passive de réduire ou même d'éliminer de nombreuses erreurs de positionnement.

Des études systématiques concernant les tâches courantes en assemblage font ressortir que plus de 95% des applications peuvent se faire à l'aide de mouvements à 4 ddl: déplacements verticaux d'approche, et positions librement définies dans le plan horizontal.

Le dernier facteur de simplification, dans le cas de l'assemblage, provient du fait que les produits peuvent être conçus de façon à simplifier le travail des robots.

### **SOURCES DE COMPLICATION**

Sous certains aspects, l'assemblage rend la tâche des robots relativement simples, nous l'avons vu. Mais sous un autre angle, on constate que ce type d'application amène aussi son lot de difficultés propres. En particulier, on peut citer la difficulté de description des trajectoires, la grande précision souvent requise et les risques de coincements associés, les risques de collision, les ddl parfois non définis ainsi que la nécessité, parfois, de réorienter les objets saisis, ce qui peut conduire à devoir coordonner des bras multiples.

Traditionnellement, les spécifications d'assemblage sont essentiellement données sous forme de séquence d'états (cf. les gammes d'assemblages). Mais il s'agit pour un robot d'en tirer les trajectoires correspondantes. Il est quasiment impossible aujourd'hui d'extraire ces informations implicites sans aide humaine. Et même dans ce cas, on se heurte très souvent au manque de formation adéquate du personnel.

L'assemblage pose souvent des exigences très grandes en termes de précision. Celles-ci sont très souvent de l'ordre du centième de millimètre, et peuvent même occasionnellement passer sous la barre du micron. De plus, si la précision de positionnement requise n'est pas atteinte, il en résulte non seulement une baisse de qualité de la production, mais des coincements et des blocages ne sont pas exclus.

L'assemblage implique obligatoirement la proximité d'objets divers. Dans ce contexte, les collisions menacent. Dans une certaine mesure, l'utilisateur peut programmer la tâche de façon à éviter des collisions en cours de travail. Mais il est très difficile de tout prévoir et l'analyse automatique en temps réel est encore pratiquement impossible.

Les ddl libres, tel la rotation d'un roulement à bille sur son axe de symétrie, pourraient être un avantage comme indiqué plus haut. Mais curieusement, actuellement cela présente plutôt une difficulté au niveau de la représentation car les matrices habituellement utilisées exigent des valeurs numériques uniques.

Comme l'exemple humain l'indique, il faut bien constater que la prise d'un objet ne permet pas toujours son amenée directe au point de dépose. Souvent, une réorientation est nécessaire, ce qui

implique, pour limiter le temps de cycle, des ddl additionnels dans le préhenseur, ou même la coordination avec un autre bras.

### **5.3 EXEMPLES DE CLASSES D'APPLICATION**

La robotique est utile dans de nombreux contextes (par ex. peinture, polissage, ébavurage, découpe laser...). Mais on désire ici se limiter aux applications tombant dans le domaine commun tout à la fois à la robotique et à l'assemblage.

Qu'il s'agisse de déplacements point-à-point ou de trajectoires continues, la complexité des applications varient dans une très large mesure. En général cependant, c'est dans le second cas que les défis les plus grands se rencontrent.

#### ***DEPLACEMENT POINT A POINT***

Dans la majorité des cas, les trajectoires n'ont vraiment d'importance que par leurs extrémités: il suffit alors de savoir d'où l'on part et où l'on doit arriver, le chemin intermédiaire ne posant pas de contraintes serrées.

Les applications sont très nombreuses en alimentation de pièces, en assemblage au sens étroit, c'est-à-dire pour le positionnement de composants en situation de pré-attachement, ainsi que pour la dépose des encours et des produits.

Un autre exemple courant d'application où des mouvements point-à-point se révèlent précieux, c'est l'amenée de pièces où leur dépose sur des palettes. Pour cette application, il est fastidieux de programmer par guidage, individuellement, chacune des positions. Cependant les palettes comportent généralement des régularités (lignes, colonnes, ...) dont on peut tirer parti par calcul.

Pour l'amenée de pièces, on prévoit très souvent des bols vibreurs. Mais leur adaptation lors de changement de types de pièces est très long. Une alternative encore peu répandue mais prometteuse est celle de la prise de pièces directement à partir du vrac, avec un robot guidé par des capteurs appropriés.

#### ***TRAJECTOIRES CONTINUES***

Certaines classes d'applications exigent des trajectoires non seulement adaptatives sous l'aspect de leur extrémité, mais encore définies de façon précise tout au long de leur parcours.

Comme exemples de ces classes d'applications exigeantes où les robots sont les seuls systèmes automatiques susceptibles de remplacer l'homme, on peut citer en particulier la soudure à l'arc, la dépose de fils ou de rubans, ou encore la distribution de cordons de pâtes (colles).

## 6. METHODES D'ANALYSE EN ASSEMBLAGE

Traditionnellement, les bases analytiques pour formaliser les opérations d'assemblage ont été plutôt ténues. C'est l'expérience et le savoir-faire qui conduisaient aux meilleurs résultats. La situation évolue vers une formalisation plus grande des procédés d'assemblage, en partie sous la pression des outils informatiques à créer. Mais le rythme est très lent.

Nous avons vu plus haut, au §(4.1.)2, une marche à suivre pour automatiser un poste de production. Dans une large mesure, elle est aussi applicable à l'assemblage. Ici, comme première étape dans la direction d'une description plus formelle des opérations, une technique du Prof. Figour est résumée. Ensuite, cette partie du cours se termine par un bref aperçu des méthodes nouvelles pour générer de façon automatique de bonnes gammes d'assemblage.

### 6.1 BASES THEORIQUES DE L'ASSEMBLAGE

Les bases théoriques, en assemblage, sont assez peu nombreuses. Il existe des approches théoriques pour certains éléments "accessoires" (comportement des bols vibreurs, études de trafic et de flux, soudure à ultra-sons) mais pour l'essentiel des opérations d'assemblage, on ne dispose guère que de savoir-faire non-formalisé. Dans le but d'améliorer cet état de fait, on a proposé, dès la fin des années 80 à l'EPFL, une méthode visant à formaliser la description des procédés d'assemblage [FIG]. Nous tentons ici d'en donner l'essentiel. Pour illustrer cette section, on considérera l'assemblage d'une prise électrique pour électrovannes [PET].

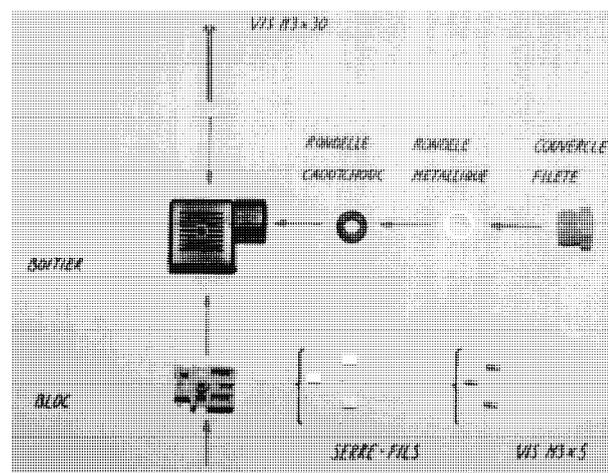


Fig. 4.1.21 Exemple de produit qu'il faut assembler

### EFFICACITE

Un système d'assemblage peut se caractériser par son efficacité. Celle-ci est définie comme étant le rapport entre le nombre moyen de pièces effectivement produites par unité de temps, et le nombre de pièces que pourrait délivrer le système s'il n'y avait jamais ni panne, ni enrayage.

L'efficacité d'un système dépend naturellement de son taux de pannes et des temps de dépannage. Mais il apparaît aussi que l'efficacité dépend en particulier de la taille des stocks tampons, capables de découpler à l'intérieur du système divers postes en série. Sans stock, toute panne se répercute sur l'ensemble du système, et résulte rapidement en perte d'efficacité, alors qu'au contraire avec certains stocks, on peut circonscrire l'effet des pannes, et tendre globalement vers une efficacité bien meilleure.

**LIAISONS MECANQUES ET LIAISONS FONCTIONNELLES**

L'opération d'assemblage a essentiellement pour but d'assurer au produit un certain nombre de liaisons fonctionnelles. Elle peut se décomposer en deux parties bien différentes: le positionnement et l'attachement.

Dans une première étape, l'assemblage implique le positionnement, c'est-à-dire requiert l'établissement de liaisons mécaniques. A cela doit s'ajouter un procédé d'attachement, qui peut de cas en cas prendre des formes diverses: collage, soudure, rivetage, etc.

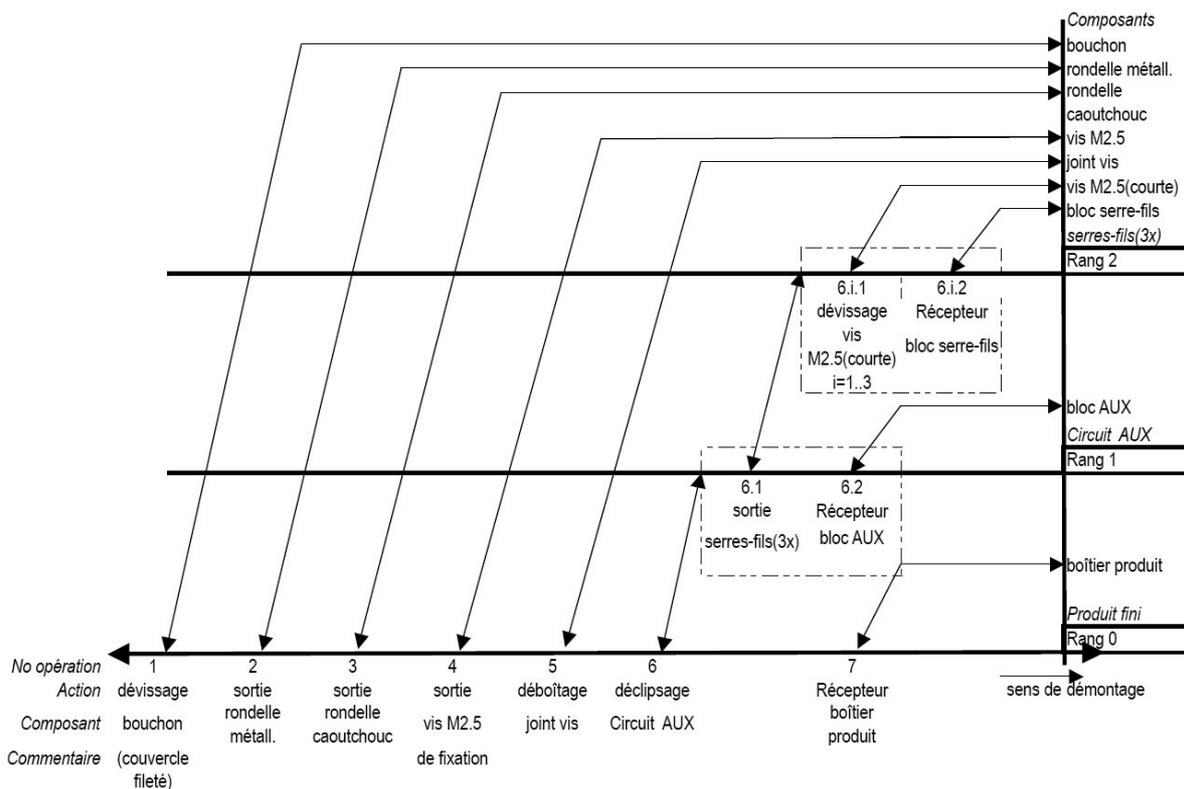


Fig. 4.1.22 Diagramme représentant la gamme d'assemblage du produit représenté sur la figure précédente (trav. de dipl. iAi.LaRA).

**DIAGRAMME D'ASSEMBLAGE**

La succession d'opérations permettant un assemblage complet se décrit dans un diagramme à multi-niveaux, pouvant en général être interprété dans deux directions: de gauche à droite, le diagramme

synthétise le procédé de *démontage*, alors que dans la direction inverse, c'est le procédé de *montage* qui apparaît. Ceci décrit en somme la gamme d'assemblage.

La méthode distingue, dans un produit assemblé, un type particulier de composants: les récepteurs. Seuls ces derniers ont besoin de posage spécifique, mais pas les autres composants, car ceux-ci se montent directement à l'intérieur des récepteurs.

#### **ANALYSE ELEMENTAIRE D'UN POSTE**

La méthode décompose l'opération d'assemblage en plusieurs sous-opérations comprenant successivement le prélèvement des composants d'un stock, leur stockage temporaire (tampon), leur transport au point d'attachement, avec réorientation éventuelle, et finalement l'opération d'attachement elle-même, éventuellement accompagnée de procédés accessoires de production (par exemple marquage). Ces étapes sont indiquées sur le poste schématique représenté ci-dessous.

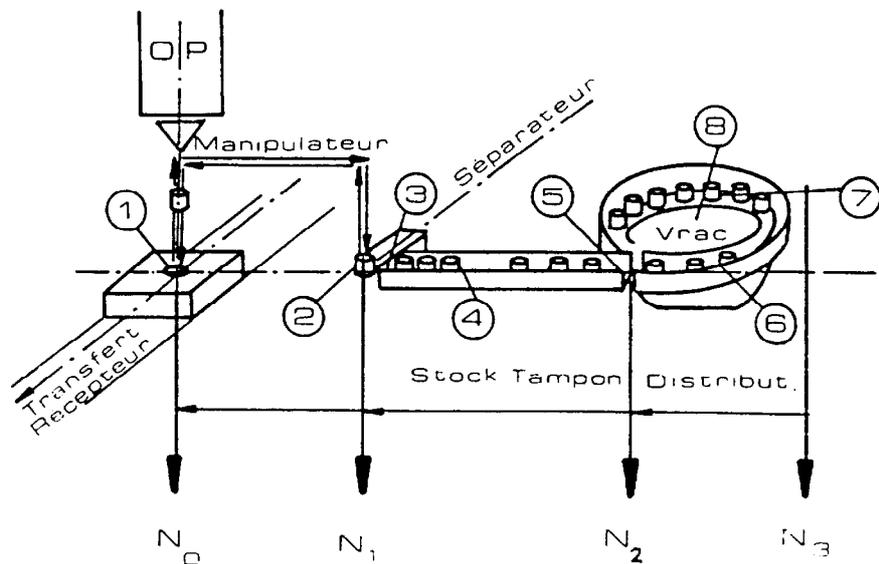


Fig. 4.1.23 Un poste d'assemblage voit schématiquement les pièces progresser en 4 à 8 étapes, suivant le degré de finesse retenu pour l'analyse (4 "niveaux", ou 8 "phases").

**ELABORATION D'UN PROJET**

Selon la méthode développée à l'IMT, un projet en assemblage s'élabore suivant les directives du tableau 4.1.7. ci-dessous. On constate évidemment un recoupement avec la méthode présentée en Section 2 – LaRA-IBM-Plus. Dans l'optique d'une solution optimale, intégrée, les points B à F du tableau ci-dessous devraient s'intégrer dans l'étape 2 de la méthode LaRA-IBM-Plus, lui donnant ainsi un caractère particulièrement adapté au cas de l'assemblage. Quant aux points A, G et H ci-dessous, ils peuvent se négliger, leur substance étant probablement mieux structurée et utilement complétée dans les étapes 1, puis 3-10 de la méthode LaRA-IBM-Plus présentée dans la Section 2.

- |  |
|--|
| ( A- Spécifications de départ )            |
| B- Définition de la gamme des opérations   |
| C- Définition des ressources par opération |
| D- Définition du temps de cycle technique  |
| E- Implantation théorique                  |
| F- Evaluation de l'efficacité              |
| ( G- Optimisation par simulation )         |
| ( H- Choix économique )                    |

Tableau 4.1.7 Elaboration d'un projet, selon la méthode IMT. Trois éléments sont mis ici entre parenthèses car ils feraient double usage avec la méthode LaRA-IBM-Plus présentée en Section 2.

La fig. ci-dessous présente une place de travail comprenant plusieurs postes. Ceci correspond à un projet de ligne d'assemblage pour prises électriques d'électro-vannes pneumatiques. L'étude a été réalisée par un étudiant durant son travail de diplôme à l'EINEV, en s'inspirant partiellement de la méthode présentée ci-dessus.

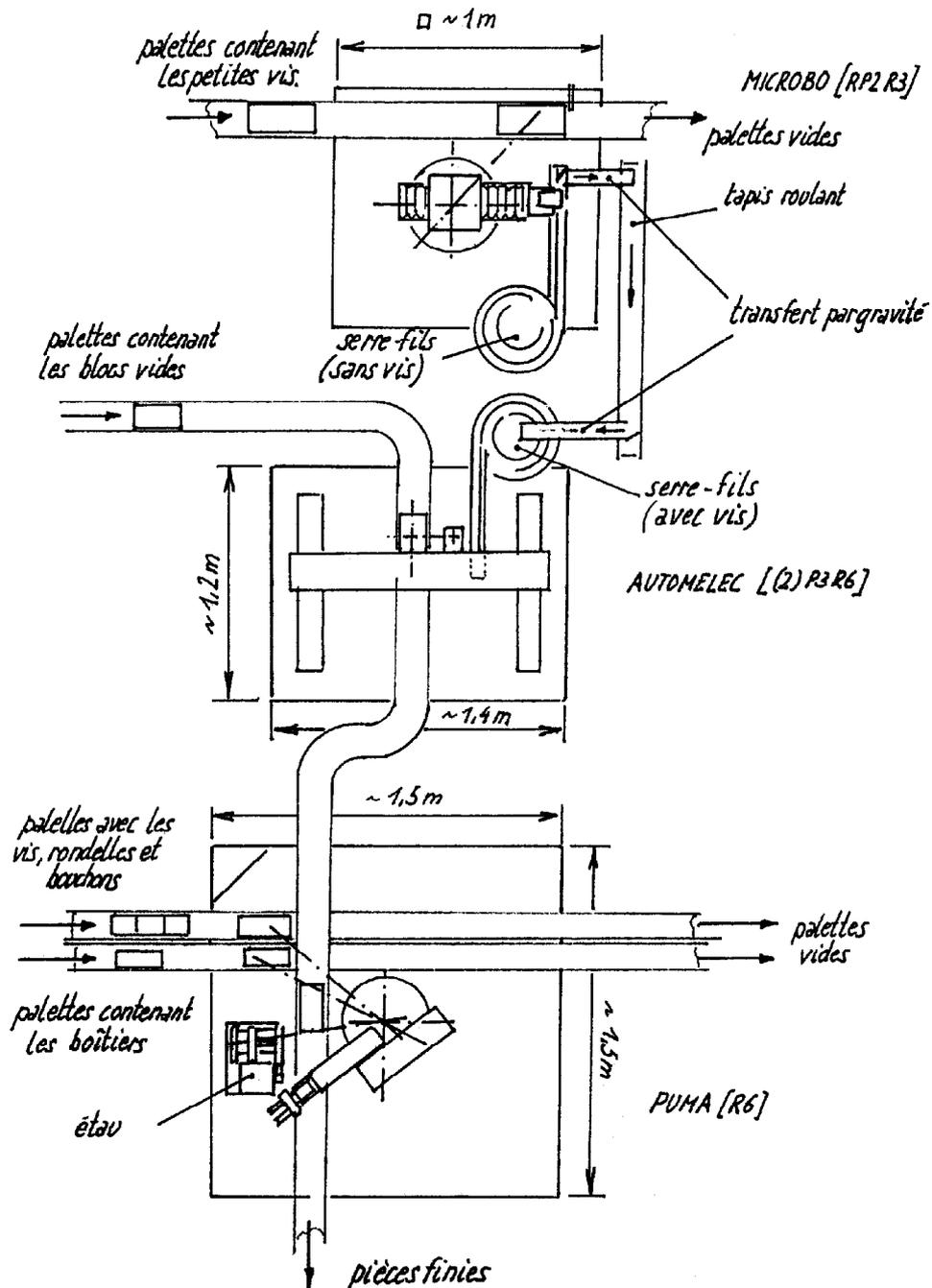


Fig. 4.1.24 Organisation d'une place de travail, à l'EINEV, pour l'assemblage du produit de la fig. 4.1.22 [PET].

## 6.2 GENERATION AUTOMATIQUE DES GAMMES D'ASSEMBLAGE

Les assemblages comprennent par définition plusieurs composants. Le problème c'est que, statistiquement, le nombre de combinaisons possibles croît de façon extrêmement rapide en fonction du nombre de composants (croissance plus qu'exponentielle, combinatoire!). A chaque combinaison correspond une gamme d'assemblage.

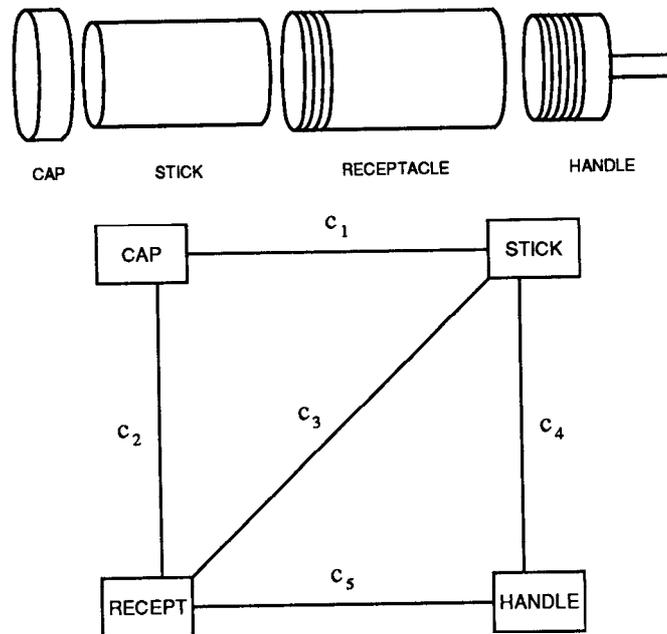


Fig. 4.1.25 Exemple de produit à assembler, avec représentation des liaisons mutuelles [HOM].

### PRINCIPE

Actuellement, les méthodes pour déterminer les gammes d'assemblage sont principalement basées sur les éléments suivants: approche constituants, modélisation basée sur les caractères géométriques et physiques, contraintes géométriques, matérielles, et de stabilité.

*Approche constituant.* L'approche "constituants", ne base pas la modélisation du processus d'assemblage sur les liaisons entre éléments ou la séquence d'actions menant au produit final, ce qui serait intuitivement plus naturel. En fait, l'élément de base y est l'assemblage de deux constituants en un nouveau constituant. Cette méthode est directement liée à la représentation des gammes d'assemblage par des arborescences, les arbres d'assemblage.

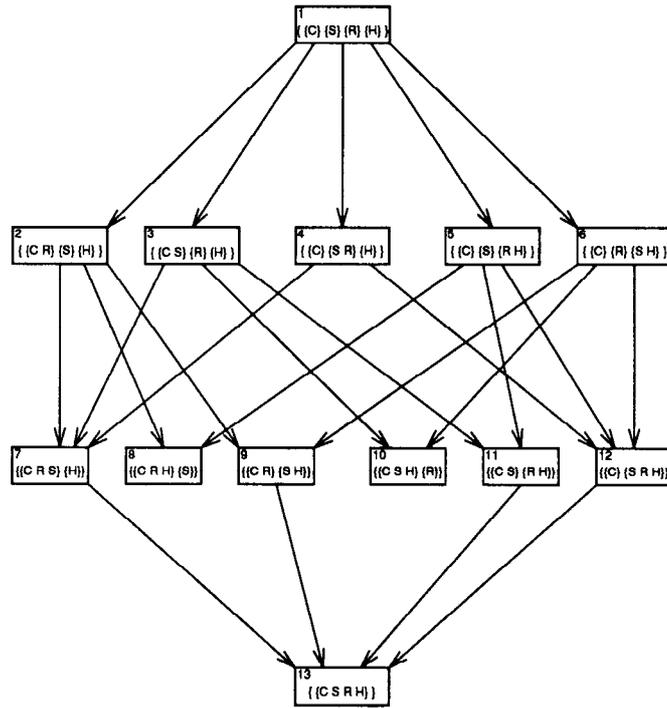


Fig. 4.1.26 Représentation des gammes d'assemblage possibles pour le produit de la fig. précédente [HOM].

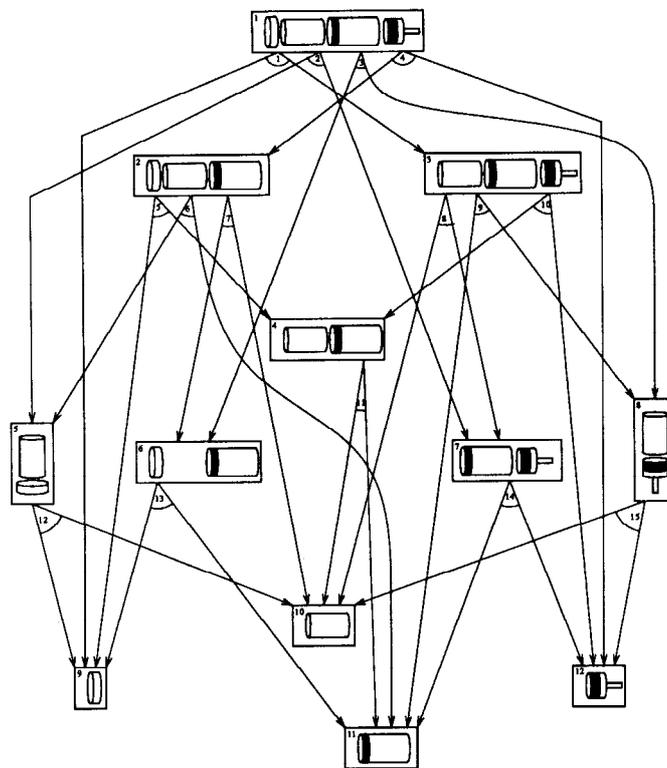


Fig. 4.1.27 Arbre d'assemblage pour le produit de la fig. 4.1.25, avec liaisons ET-OU [HOM].

*Caractères des produits.* De même, alors que traditionnellement on décrivait un assemblage par une modélisation fonctionnelle, il est apparu récemment préférable de modéliser séparément les caractères géométriques (la forme) et physiques (matériau, état de surface, etc.) des produits à assembler, ainsi que leurs caractères complémentaires.

*Contraintes opératoires.* Enfin, les contraintes à respecter pour limiter le nombre de gammes considérées gagnent à se répartir principalement en trois catégories:

- Les contraintes géométriques garantissent que deux constituants peuvent bien parcourir au moins une trajectoire qui les assemble sans collision.
- Les contraintes de stabilité exigent que le résultat intermédiaire d'un assemblage se maintienne (pas de rupture, de perte de constituants, etc.).
- Enfin, les contraintes matérielles font référence aux mêmes phénomènes physiques que celles des deux premières catégories, mais en prenant en compte les ressources extérieures: préhenseur de robot, posage, etc.

A ces trois catégories de contraintes - dites opératoires, car nécessaires au succès de l'opération d'assemblage - s'ajoutent éventuellement la catégorie des contraintes stratégiques. La prise en compte des ces dernières peut améliorer certains aspects du produit (coût, ergonomie, etc.) mais dont le caractère n'est plus absolu.

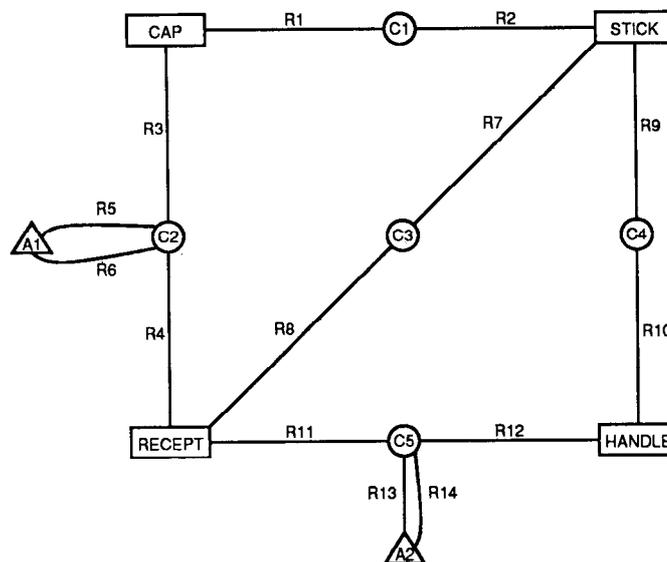


Fig. 4.1.28 Représentation de l'assemblage du produit de la fig. 4.1.25, avec rendu explicite des caractéristiques des liaisons [HOM].

### **PERSPECTIVES**

Le problème de l'élaboration de l'ensemble des gammes admissibles pour tout produit donné est maintenant considéré comme bien maîtrisé ([HEN]). On constate d'ailleurs une forte convergence des travaux consacrés à ce domaine dans des laboratoires de plus en plus nombreux.

Aujourd'hui, des progrès sont encore attendus pour qu'on puisse automatiser le procédé créatif de *choix* de la meilleure gamme. Non seulement les gammes irréalisables devraient être écartées, mais de plus un certain degré d'optimisation en termes de temps de cycle ou de ressources requises est visé. De plus, il faudrait prendre en compte le fait qu'une ligne d'assemblage est souvent destinée à une production *multi-produits*.

Il faut noter que, conjointement à ces progrès, on s'attend à ce *l'interaction* entre systèmes informatisés et spécialistes de l'assemblage croisse.

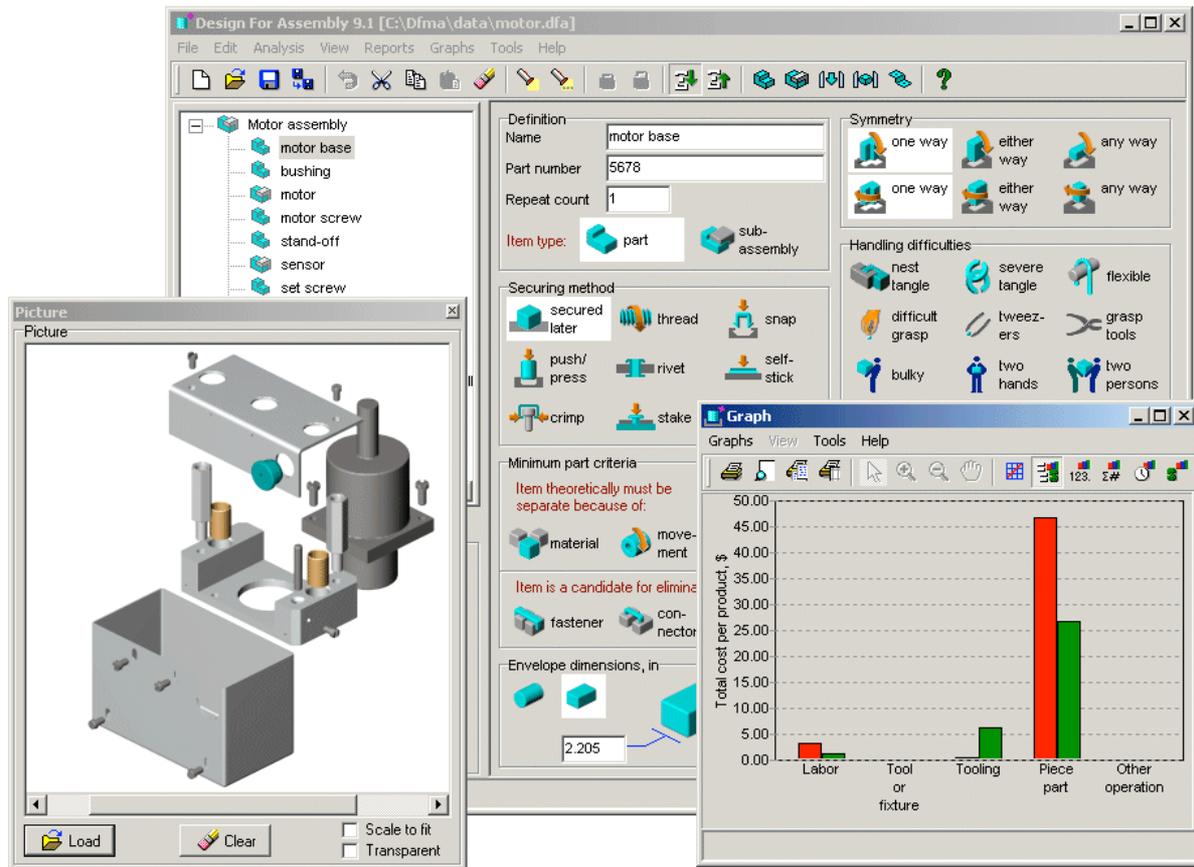
Les bases théoriques les plus significatives ont été apportées par A. Bourjault, de l'Institut de Productique de l'ENSMM, à Besançon et son équipe (par ex. [HEN]). Elles sont maintenant renforcées par divers travaux se déroulant ailleurs dans le monde (par ex. [HOM]).

## 7. CONCLUSION

Le chapitre a d'abord traité de l'étude d'automatisation d'une opération générale de production. Ensuite l'attention s'est fixée au problème particulier de l'assemblage.

Etudier la transformation d'une place de travail, ou concevoir un nouveau poste, c'est toujours un exercice difficile, pour plusieurs raisons. Le concepteur doit tirer parti d'un grand nombre d'informations. Celles-ci proviennent de domaines divers, aussi sont-elles généralement peu structurées. Enfin il s'agit toujours d'un processus créatif, et ce type de processus est des moins connus. Néanmoins, le cours apporte, dans ses chapitres antérieurs des éléments de solutions importants. Des entreprises apparaissent, qui offrent des connaissances et des services dans ce domaine (voir fig. et liens web ci-dessous). Et par ailleurs, il est bien établi que l'expérience finit par pallier aux éventuelles maladresses initiales...

Malgré son importance extrême sur le plan économique, l'assemblage semble progresser relativement lentement dans le sens de l'automatisation. Outre l'aspect de création que leur automatisation implique, les procédés d'assemblage présentent plusieurs défis sur le plan théorique: quantité énorme de variantes possibles, synchronisation des flux, grande quantité d'information contenue dans les formes volumiques, multi-dimensionnalité des trajectoires dans l'espace, incertitudes de positionnement réclamant une analyse sensorielle, et formalisation encore embryonnaire du procédé lui-même.



[dfma] (Boothroyd et al.)

		<b>Principe organisationnel</b>				
		←		→		
		<b>Effet potentiel de l'informatique:</b>		<b>Effet potentiel de l'organisation:</b>		
<b>Opportunités</b>	<b>Gages de succès</b>	Le traitement automatique des données augmente les degrés de liberté de l'organisation	➔ Réduit la séparation horizontale des tâches: permet l'intégration de tâches de support	<b>Système orienté processus</b>	Simplification des processus et du fonctionnement, augmentation de l'orientation clients	➔ Diminution des interfaces entre l'entreprise et ses clients
		Mise à disposition décentralisée d'informations pour les décisions-clés	➔ Réduit la séparation verticale des tâches: permet l'intégration de tâches ciblées de planification et de contrôle	<b>Régulation locale et décentralisée des variations et perturbations</b>	Exécution autonome des tâches	➔ Permet le classement des résultats opérationnels (responsabilités liées au résultat)
		Adaptabilité du système standard	➔ Permet une démarche orientée processus, adaptée à la situation	<b>Seuls les éléments critiques font l'objet de spécifications</b>	Pré-requis pour une régulation décentralisée	➔ Permet un système de motivation basé sur les tâches des collaborateurs
<b>Menaces</b>	<b>Freins au succès</b>	Désir de standardisation maximale et d'utilisation uniforme	➔ Les synergies sont plus importantes que les bénéfices d'une utilisation adaptée	<b>Spécifications maximales, règles et prescriptions strictes</b>	Aboutit à un comportement passif des collaborateurs	➔ Nécessite un système pécuniaire de récompenses et de punitions pour la motivation des collaborateurs
		Désir d'un système centralisé de planification et de contrôle	➔ Permet l'augmentation du nombre d'indicateurs et d'évaluations statistiques	<b>Régulation centrale des variations et perturbations</b>	En raison de leur grande dépendance entre eux, des événements non planifiés agissent sur l'ensemble des processus	➔ Provoque dans l'environnement actuel la surchauffe du système de planification et de contrôle et nécessite un système de gestion encombrant
		Désir d'un système complet de saisie et de traitement des données	➔ Contrainte de spécialisation en raison de la complexité de l'utilisation du système	<b>Spécialisation, système orienté fonctions</b>	Expérience et perception des interdépendances disparaissent	➔ Innovation visant exclusivement la fonction, amélioration continue très limitée, régression de l'identification au produit fini

**Interactions entre l'organisation de l'entreprise et une informatique moderne**

Le système d'information agit comme gage de succès

Le système d'information agit comme frein au succès

**REFERENCES**

- [AND] Andreasen et al. "Design for Assembly - an integrated approach, Principles and strategies", 3rd Int. Conf. on Assembly Automation, IPA, Böblingen, 1982, pp 215 - 227.
- [BAI] Bailey, "Product Design for Robotic Assembly", Proc. 13th ISIR, IFS Ltd, Chicago, April 17-21, 1983, pp 11 - 44 à 11 - 57.
- [BOR] David Borel, "Assemblage d'une gamme d'éléments pneumatiques par robot industriel", rapport de diplôme, EINEV, 1986, pp 86.
- [DES] J.-D. Dessimoz, "Comment mener à bien un projet ; quelques éléments de méthode", HESSO.HEIG-VD, Yverdon-les-Bains, 21pp., 2007.
- [DES2] - , "Choosing a robot versus another automated system", 23rd Intern. Symp. on Industr. Robots, Barcelone, Espagne, Oct. 1992.
- [dfma] <http://www.dfma.com/> (Design for manufacture and assembly), 2004
- [DIS] "Composants Montés en Surface", doc. technique Distrelec, Zürich, 1990.
- [FIG] Jean Figour, "Les bases de l'assemblage automatique", Marché suisse des machines, Vol. 58. No 1, pp. 28-34, 1990
- [GON] J.-R. Gonthier et J.-D. Figour, "L'assemblage, un des problèmes du CIM", pp14-17, Marché Suisse des Machines, No3, févr. 1992.
- [HEN] J.M. Henrioud, "Contribution à la conceptualisation de l'assemblage automatisé: Nouvelle approche en vue de la détermination des processus d'assemblage", Thèse de doct., No 238, Univ. de Franche-Comté, déc. 1989.
- [HEN2] J.M. Henrioud et A. Bourjault, "Détermination des arbres d'assemblage", R.A.I.R.O., APII, 25: 547-564, Nov. 1990.
- [HES] "Concept bachelor Génie électrique – Annexe 3 – Référentiel de compétences ", plan d'études et site web TIN-GEL, HESSO, Delémont, pp.4, 26 octobre 2005
- [HOM] L. S. Homen de Mello, and Sukhan Lee, "Computer Aided Mechanical Assembly Planning", ISBN 0-7923-9205-1, Kluwer Acad. Publ., pp 446, 1991.
- [HOM2] L. S. Homen de Mello, and A.C. Sanderson, "Two Criteria for the Selection of Assembly Plans: Maximizing the Flexibility of Sequencing the Assembly Tasks and Minimizing the Assembly Time through Parallel Execution of Assembly Tasks", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7, No 5, oct., pp.626-633, 1991.
- [IBM] IBM, "Robot System/I", General Information Manual and User's Guide, no A 34-0180-1, pp 3-1 à 3-36.
- [KOR]\* Yoram Koren, "La robotique pour l'ingénieur", 1986
- [MAK] Makino, N. Furuya, "Scara robot and its family", Proc. of the 3rd Int. Conf. on assembly automation, Boblingen, Deutschland, mai 1982, pp 433 - 444.
- [MUL]\* Mulkens, Marché suisse des machines
- [OWE] Owen. Ed. by Kagan Page Ltd 1985. "Assembly with robots".
- [PET]\* Petitpierre, rapp. de dipl., EINEV, 1990

- [POP] R.J. Popplestone, A.P. Ambler, and I. Bellos, "An interpreter for a language for describing assemblies", *Artificial Intelligence*, vol 14, no 1, pp 79-107, 1980.
- [SOL] Marc Solbes, "Assemblage d'une gamme d'éléments pneumatiques par robot industriel", rapport de diplôme, EINEV, 1984, pp 31.
- [WHI] D.E. Whitney, , "Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts", *J. Dynamic Syst., Meas., Contr.*, vol. 104, no 1, pp 65-77, March 1982.

\* ref à compléter

#### AUTRES SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES ET LIENS WEB

Andreasen, Myrup/S. Kahler/T. Lund "Design for Assembly", Second edition, IFS Publications/Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio. 1988.

Pahl, G. and W. Beitz "Engineering Design" ,Second edition, Springer,London, 1996

Proceedings of the 1st International Conference on Product Design For Assembly, Published by Troy Conferences, Michigan.

Bralla, James G. "Handbook of product design for manufacturing", first edition, McGraw-Hill, New York, 1986

He, David W. and Kusiak,Andrew, Design of Assembly Systems for Modular Products, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 13, NO. 5, OCTOBER 1997

<http://www.pdmic.com/bibliographies/design.html> ,2004

Bakerjian, Tool and Manufacturing Engineer's Handbook, Volume 6, Design for Manufacturability, Editor: R. Bakerjian, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1992, (800) 733-4763 or (313) 271-1500

<http://deed.ryerson.ca/~fil/t/dfmdfa.html> Design for assembly, 2003

<http://deed.ryerson.ca/cgi-bin/serf/search> Searchable Engineering Resource Facility, 2004

Interaction entre l'organisation d'une entreprise et l'informatique moderne, Bulletin du CCSO No 58, mars 2004

Référentiel de compétences - Génie électrique, Annexe 3, Département TIN, HEIG-VD, 26 nov. 2005.

Assembly Automation , Journal, Emerald, ISSN 0144-5154 , as follows :

Editorial Objectives (downloaded 13.07.2011) :

Assembly technology is constantly being developed, refined and researched to provide the most cost-effective and efficient solutions to manufacturing problems. Driven by increasing demands for better quality, faster production and minimum running costs, innovations are constantly being devised, tested and deployed throughout the manufacturing world. Assembly Automation aims to keep pace with new developments, making it invaluable to engineers and managers who design and apply automation systems in user industries all over the world.

Lean automated manufacturing: avoiding the pitfalls to embrace the opportunities, Hongyi Chen, Richard

R. Lindeke, David A. Wyrick, *Assembly Automation* , Journal, Emerald, Volume: 30 Issue: 2; 2010