

# La fabrication, un problème de conception

J.F. Debongnie  
Université de Liège  
Méthodes de fabrication

## 1. Introduction

La division traditionnelle du travail place d'un côté le concepteur, qui établit des plans en fonction de critères de fonctionnalité et de résistance, et d'un autre côté, la fabrication où les agents de méthodes essaient par tous les moyens de satisfaire aux exigences du concepteur, dans une perspective où les coûts jouent bien entendu un grand rôle. C'est ce que MUNRO [3] appelle conception "over the wall", un concept qu'il illustre par la figure 1.

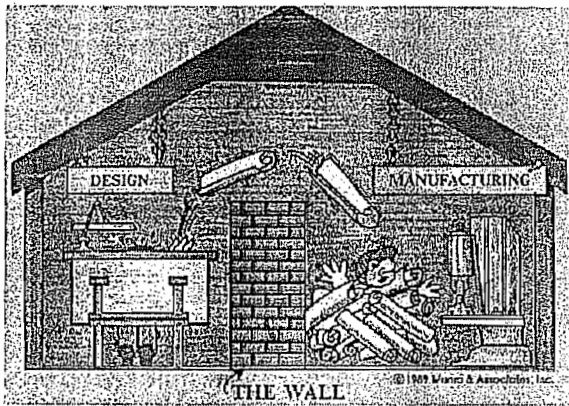


Figure 1 : Over the Wall Design

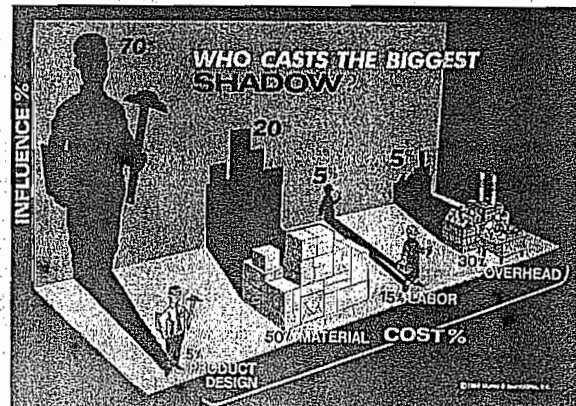


Figure 2 : Coûts de fabrication

Cet état de chose qui résulte d'une part d'une spécialisation des fonctions et d'autre part du peu de considération qu'ont beaucoup de formations universitaires pour les faits technologiques, peut être extrêmement préjudiciable à la fois à la qualité des produits fabriqués et à leur coût. Il faut en effet préciser que la structure des coûts de fabrication est très largement déterminée par la conception elle-même, ainsi que l'illustre la figure 2.

Il est donc naturel et économiquement justifié de s'interroger sur les interactions et la complémentarité de la conception et de la fabrication.

## 2. Généralités

On peut dire qu'une conception efficace se caractérise par l'obtention de la fonctionnalité requise au travers d'une fabrication et d'un assemblage aussi aisés et aussi peu coûteux que possible. Cet objectif ne peut être atteint que si les impératifs de la fabrication sont présents à l'esprit du

concepteur dès le *premier dessin*. C'est dans cet esprit que certaines entreprises confient délibérément le premier dessin à un homme de la fabrication, avec pour mission d'indiquer quelles formes sont les plus propices à une réalisation économique.

Pour notre part, nous nous limiterons à rappeler quelques règles permettant d'éviter les écueils les plus courants.

### 3. Tolérancement

Toute cote industrielle est, explicitement ou non, affectée d'une certaine tolérance. Les tolérances sont explicites lorsqu'elles expriment une condition de fonctionnalité de l'ensemble considéré. A ce niveau, la tendance naturelle du bureau d'études est de spécifier des tolérances aussi serrées que possible, de manière à se mettre en sécurité. Or, le resserrement des tolérances est toujours synonyme d'augmentation des coûts. Il est donc utile de se rappeler le principe : *coter aussi fin que nécessaire, mais aussi large que possible*.

### 4. Cotation fonctionnelle

La première règle permettant de limiter la finesse des tolérances est la *cotation fonctionnelle*, qui consiste à adopter comme principe que les cotes tolérancées sur le dessin sont *directement* représentatives d'une condition fonctionnelle. Imaginons l'exemple simple d'une barre devant accoupler deux pièces à une distance bien précise (figure 3).

C'est la distance  $l$  entre les deux trous qui est fonctionnelle. Par contre, la longueur  $L$  de la barre n'intervient que pour des raisons d'encombrement et peut être beaucoup moins précise. La cotation (a) est donc fonctionnelle.

Par contre, la cotation (b) ne définit  $l$  que par un *transfert de cote* :

$$l = L - a - b$$

dont on déduit les valeurs extrêmes de  $l$  par les relations

$$l_M = L_M - a_m - b_m \qquad l_m = L_m - a_M - b_M$$

qui, par soustraction, impliquent la liaison suivante sur les intervalles de tolérance (différences entre maxima et minima) :

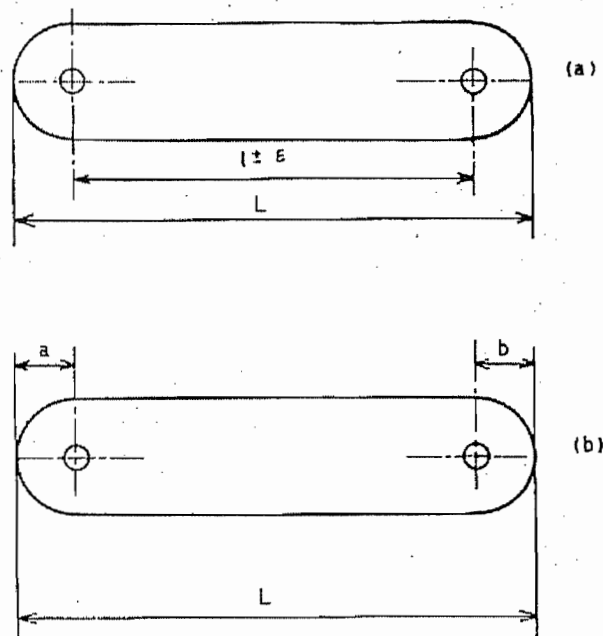


Figure 3 : Tolérancement

$$IT(l) = IT(L) + IT(a) + IT(b)$$

Ceci exprime la règle générale selon laquelle l'intervalle de tolérance d'une cote obtenue par transfert est la somme des intervalles de tolérance des cotes composantes. Ainsi, pour obtenir une tolérance de 0,1 mm sur l, il faudra réaliser L, a et b avec des tolérances *plus fines*, par exemple 0,033 mm, ce qui est plus coûteux et nécessite une définition précise des trois cotes L, a, b qui n'ont pas de grande utilité. *Le transfert de cotes implique donc toujours une augmentation des coûts* et doit être évité autant que possible.

## 5. Eviter l'hyperstaticité

Toute construction, tout mécanisme suppose un certain nombre de liaisons de manière à maintenir les éléments en place. Il y a hyperstaticité lorsqu'une même liaison est réalisée plusieurs fois. L'hyperstaticité signifie toujours une plus grande difficulté de réalisation. La figure 4a représente un arbre positionné axialement par deux roulements. Il va de soi que cela n'est possible que si la distance des deux roulements sur l'arbre est très précisément égale à la distance des appuis par circlips dans le logement, c'est-à-dire des tolérances très fines. Même dans ces conditions, la dilatation thermique de l'arbre en service fera naître des effets secondaires qui nuiront à la durée de vie des roulements. La solution, dessinée en figure 4b, est bien entendu de ne fixer axialement qu'un seul des deux roulements. La figure 4c représente un chariot monté sur deux glissières en V. Ce système suppose entre autres que les Vés aient le bon écart sur toute leur longueur. On lui préférera le système V-é-plat (figure 4d) qui, bien qu'encore hyperstatique, est beaucoup plus simple à réaliser et donne une portance analogue. La figure 4e représente un assemblage par deux trous. En dehors du cas où les trous sont plus larges que les vis ou les tiges, ce système est hyperstatique, car la distance des deux trous doit être obtenue avec précision. L'assemblage risque donc d'être impossible, au contraire de la conception 4f qui lève cette difficulté.

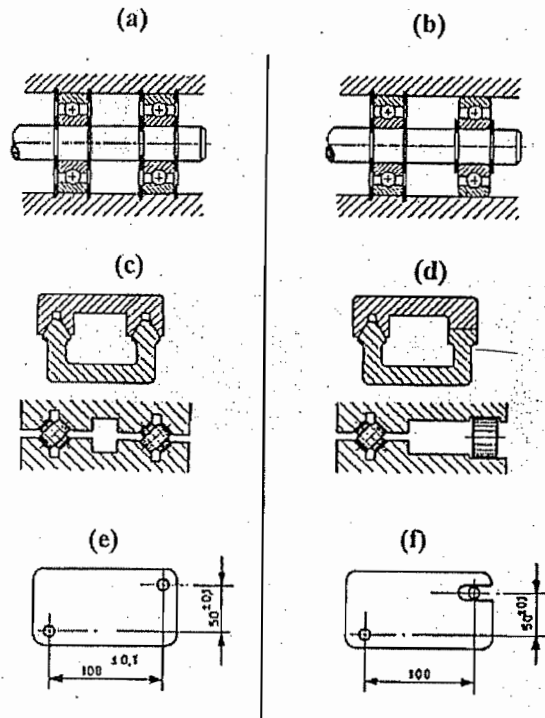


Figure 4 : Hyperstaticité

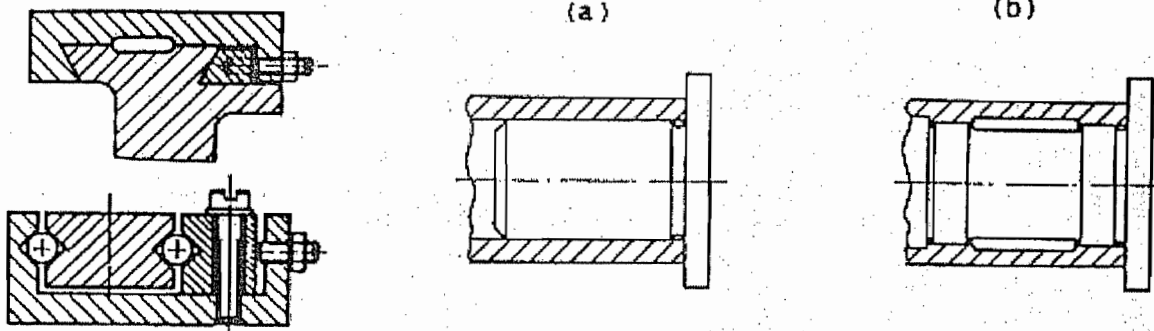


Figure 5 : Eléments de réglage

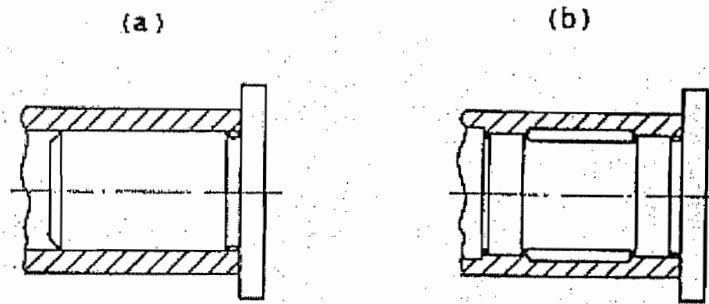


Figure 6 : Centrages long et court

Bien entendu, des liaisons hyperstatiques peuvent être rachetées par des éléments de réglage (figure 5), mais ceux-ci sont autant de pièces supplémentaires à fabriquer, qui augmentent le coût global.

Les liaisons étendues sont toujours hyperstatiques puisque elles supposent une forme très correcte des pièces en regard. Ainsi, le centrage long de la figure 6a suppose une cylindricité très précise de l'arbre comme de l'alésage. Le même résultat s'obtient beaucoup plus aisément à l'aide des deux centrages courts de la figure 6b.

Une hyperstaticité mal gérée mène à la nécessité de procéder un *ajustage manuel* requérant une main d'oeuvre très qualifiée et coûteuse. Ce genre d'opération est à réserver strictement à la fabrication de très haute précision.

## 6. Interchangeabilité

Le concept d'interchangeabilité évoque d'abord la possibilité de remplacer une pièce défectueuse par une pièce de même type sans ajustage. Dans un sens un peu généralisé, il s'agit de la *possibilité de fabriquer chaque élément indépendamment des autres*, au besoin dans des sites différents. Soit par exemple à réaliser un assemblage boulonné. Le système est hyperstatique à partir du deuxième boulon, ce qui signifie que sa fabrication nécessitera quelques précautions. La méthode artisanale consiste à percer les trous dans les deux pièces simultanément, ce qui garantit évidemment la possibilité d'assembler. Mais si l'on vient à intervertir les pièces de deux assemblages différents, on risque fort de ne plus pouvoir passer les boulons. Une solution beaucoup plus rationnelle consiste à combiner un *positionnement* relativement précis des trous dans chaque pièce avec la réalisation de trous *suffisamment larges* pour compenser les petites variations de position. Dans ces conditions, une fabrication séparée des pièces est possible et assure l'interchangeabilité. La fabrication et l'assemblage sont facilités.

## 7. Maximum ou minimum de matière ?

En prolongeant l'étude d'un assemblage vissé, on se rend compte que sa réalisation n'est possible dans de bonnes conditions que si les vis ont toutes du jeu dans les trous. *Le jeu minimal* est réalisé lorsque les dimensions des éléments correspondent au maximum de matière et qu'en outre, les erreurs de positionnement ou de forme sont les plus désavantageuses. Par contre, le *jeu disponible* pour l'assemblage est plus grand si les éléments assemblés s'écartent du maximum de matière et on peut alors, sans compromettre la possibilité d'assembler, élargir les tolérances de positionnement et de forme. Chaque fois que la précision du positionnement est seule en cause, il convient de laisser cette liberté au fabricant, ce qui se fait par *la cotation* dite au maximum de matière (ISO1101/II). Ainsi, sur la figure 7, l'entre-axe peut être en erreur de  $\pm 0,1$  mm au *maximum de matière*, soit pour des trous de 10 mm. Si les trous ont un diamètre de 10,1 mm, l'assemblage restera possible pour une erreur de  $\pm 0,2$  mm, et le symbole M indique que cette liberté est laissée à la fabrication. Cette procédure facilite la réalisation. En outre, elle reflète la véritable condition physique d'assemblage, ce qui signifie que la vérification peut se faire à l'aide de calibres.

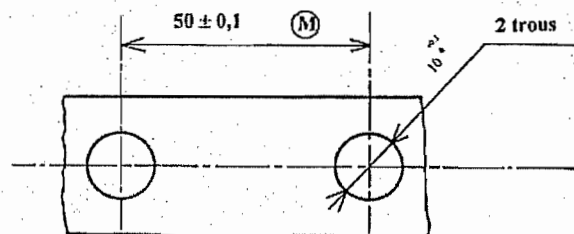


Figure 7 : Cotation au maximum de matière

Il faut du reste être conscient que les outils s'usent, ce qui provoque, d'une pièce à l'autre une dérive de la cote qui va toujours dans le sens d'une augmentation de la matière.

## 8. Limitation du nombre de pièces

Il est clair que plus l'objet fabriqué comporte de pièces, plus il y aura d'assemblages et de conditions fonctionnelles, ce qui va dans le sens d'un accroissement des coûts. La figure 8 montre quatre exemples de simplification de ce genre.

## 9. Limitation du nombre de surfaces à usiner et de leur étendue

Dans la mesure du possible, il convient de rassembler les surfaces fraisées dans un seul plan, ce qui permet de simplifier le travail et d'utiliser des fraises plus grandes. En outre, il est judicieux de limiter la partie usinée de la surface à son strict minimum (figure 9).

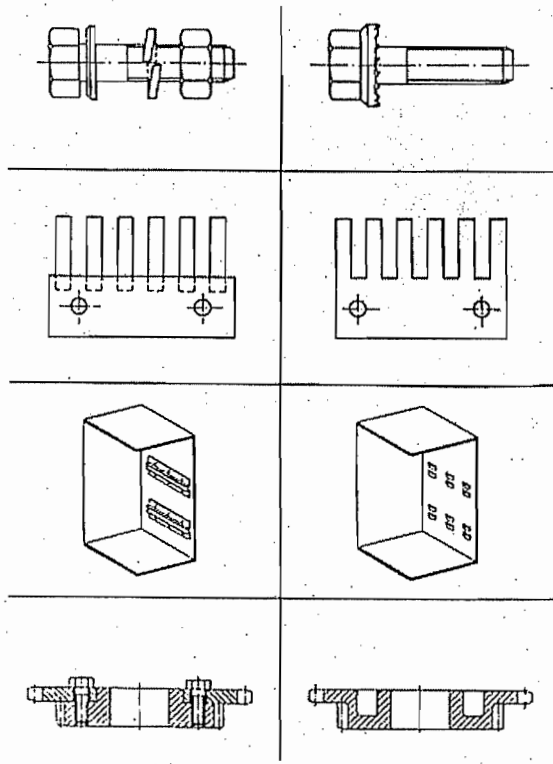


Figure 8 : Simplifications

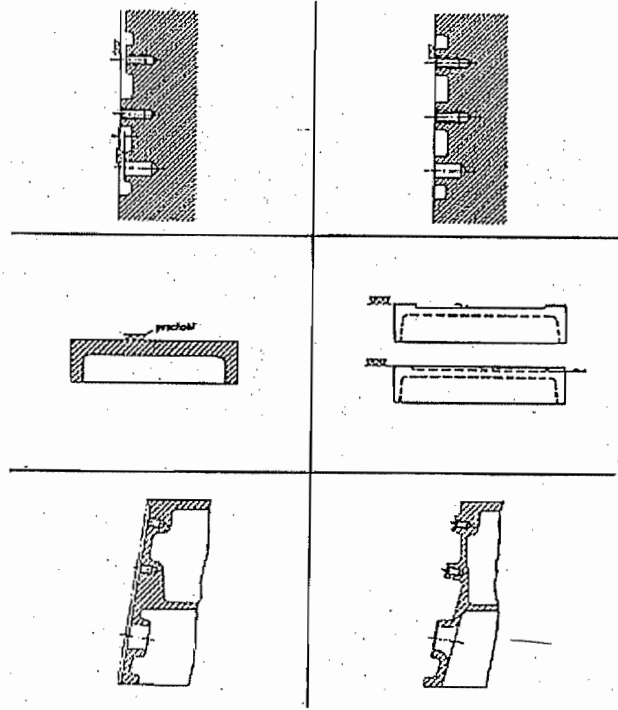


Figure 9 : Limitation du nombre de surfaces

### 10. Diminuer les directions de perçage

Il faut éviter autant que possible le perçage dans des directions différentes, ce qui complique la gamme de fabrication et rend impossible le travail avec des machines multibroches (figure 10). Pour ces dernières, il faut du reste un entraxe suffisant entre les trous (figure 11).

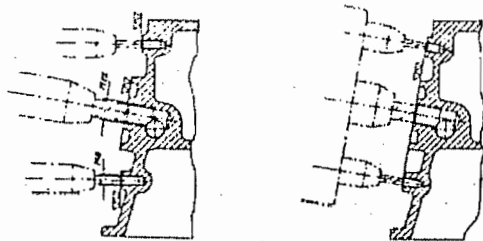


Figure 10 : Limitation des directions de perçage

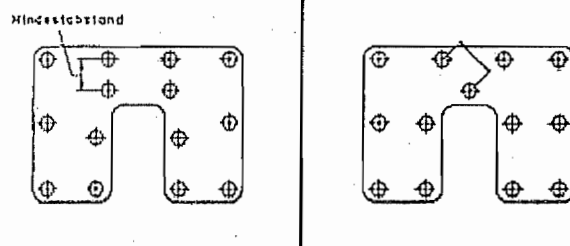


Figure 11 : Entraxe entre les trous

### 11. Réduction de l'enlèvement de matière

L'enlèvement de matière (usinage) est coûteux à la fois en matière perdue et en temps de travail. La règle générale est qu'il faut limiter les usinages aux surfaces qui doivent être précises. Ainsi, la poulie de la figure 12 peut être réalisée par usinage dans la masse (à gauche) ou par assemblage de pièces embouties (à droite). La seconde réalisation est bien plus économique et convient parfaitement dans la mesure où les poulies à gorge ne nécessitent pas une précision extraordinaire.

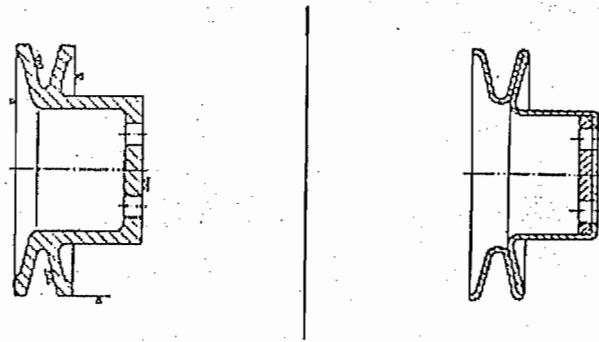


Figure 12 : Réduction de l'enlèvement de matière

### 12. Symétrisation des ensembles

La boîte représentée en figure 13a se compose de deux éléments dissymétriques, qu'il faut fabriquer sur deux lignes différentes. La conception 13b conduit à deux demi-boîtes identiques, ce qui ramène à une seule ligne de fabrication.

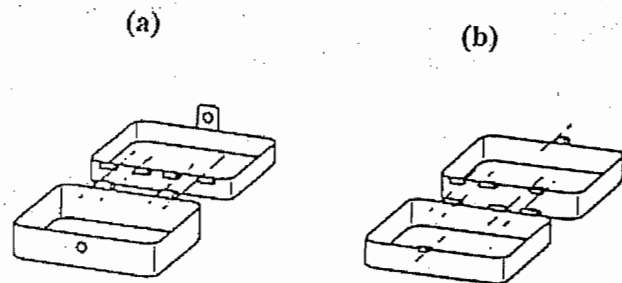


Figure 13 : Symétrisation

### 13. Faciliter le montage

Si l'on n'y prend garde, l'assemblage peut ressembler à un casse-tête chinois, difficile et coûteux. Dans la mesure du possible, il faut d'abord s'arranger pour que le *positionnement* soit *simple* (figure. 14) ou mieux *automatique* (figure 15). Dans ce domaine, la *limitation du nombre de pièces* peut mener à de grandes économies. Dans le cas des assemblages boulonnés, l'*accessibilité des vis* peut être rendue difficile par la présence de parois voisines. Ce problème doit toujours être envisagé.

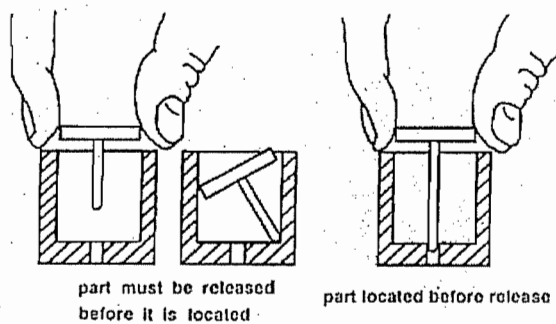


Figure 14 : Problème de positionnement

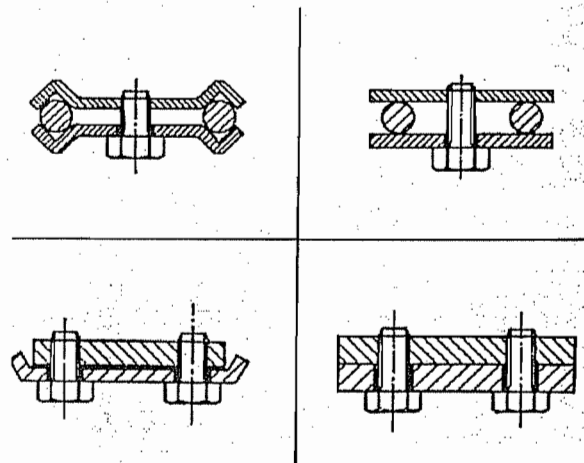


Figure 15 : Assemblages boulonnés

#### 14. Utilisation d'éléments normalisés

La normalisation est un outil puissant à la fois pour l'interchangeabilité et l'économie. Les éléments normalisés correspondent au programme standard des fournisseurs et sont donc accessibles au meilleur prix. Ainsi, une vis de 8 mm avec diamètre sur pans de 13 mm correspond à la norme. Par contre, la même vis avec un diamètre sur pans de 12 mm - cela s'est vu en construction automobile - nécessite une fabrication spéciale et coûte plus cher, même si elle comporte moins de matière. Elle nécessite en outre un stockage à part, tant au niveau de la fabrication que pour la maintenance.

#### 15. Contraintes résiduelles

Lors de l'utilisation de profils laminés, il faut prendre garde au fait qu'ils sont inévitablement le siège de contraintes résiduelles. Lors de certaines opérations d'usinage, celles-ci se libèrent, au prix d'une déformation du profilé. Ceci est particulièrement vrai lors d'usinages dissymétriques, qui doivent donc être pratiqués avec prudence ou, mieux, évités.

#### 16. Conclusions

Loin d'avoir épuisé le sujet ni même d'avoir esquissé les grandes lignes des disciplines appelées design for manufacturing et design for assembly, le présent exposé avait pour seule prétention de montrer sur quelques exemples à quel point la conception peut influencer la fabrication. Il existe des ouvrages assez complets sur le sujet [1,2] que l'on pourra consulter avec profit. Les quelques directives que nous avons données sont néanmoins d'une portée générale et définissent une certaine philosophie de la conception qui ne doit jamais perdre de vue que tout plan est en définitive destiné à être réalisé.



## Bibliographie

- [1] G. BOOTHROID, P. DEWHURST, W. KNIGHT - *Product Design for manufacture and assembly*. Marcel Dekker, New York, 1994.
- [2] R. KOLLER - *Konstruktionslehre für den Maschinenbau*. 2<sup>ème</sup> éd., Springer, Berlin, 1985.
- [3] MUNRO and ASSOCIATES, Inc., 911 West Big Beaver Road, Troy, MI48084.
- [4] R. QUATREMER, J.-P. TROTTIGNON - *La construction mécanique*. I, Nathan/AFNOR, Paris, 1978