

# Estimation des coûts en production mécanique

par Pascal DUVERLIE

*Docteur ès Sciences en génie mécanique*

*Ingénieur ENSIMEV (École nationale supérieure d'ingénieurs en mécanique énergétique de Valenciennes)*

*Conseil en entreprise*

*Responsable de Donam*

Jean-Marie CASTELAIN

*Ingénieur ENSAM (École nationale supérieure des arts et métiers)*

*Professeur des Universités en génie mécanique*

*Directeur de l'ENSAIT (École nationale supérieure des arts et industries textiles)*

et Thibault FARINEAU

*Ingénieur ISIV (Institut supérieur industriel de Valenciennes)*

*Chercheur au LAMIH (Laboratoire d'automatique et de mécanique industrielles et humaines)*

1.	Problématique de l'estimation de coût .....	BM 7 076 - 2
1.1	Contexte .....	— 2
1.2	Différents niveaux d'une estimation de coûts.....	— 3
2.	Décomposition et définition du coût de revient technique.....	— 4
2.1	Coût de fourniture .....	— 4
2.2	Coût de sous-traitance .....	— 5
2.3	Coût de fabrication .....	— 5
3.	Précision d'une estimation et marge d'erreur .....	— 7
3.1	Trois caractéristiques : fidélité, sensibilité et justesse.....	— 7
3.2	Précision théorique et précision industrielle.....	— 7
3.3	Marge d'erreur globale .....	— 7
4.	Courbes d'apprentissage .....	— 8
4.1	Expression mathématique .....	— 8
4.2	Application à l'estimation des coûts.....	— 9
5.	Méthodes d'estimation de coût .....	— 9
5.1	Méthode paramétrique .....	— 9
5.2	Méthode analogique .....	— 12
5.3	Application à l'estimation du coût des pistons.....	— 14
5.4	Méthode analytique.....	— 15
6.	Conclusion .....	— 17
	Références bibliographiques .....	— 17

**L**es entreprises vivent dans un monde de compétition où elles cherchent un maximum de profit et l'acquisition de marchés prometteurs. Face à cette concurrence technico-économique, la maîtrise des coûts d'un projet ou d'un produit n'est pas seulement un atout mais une obligation.

Dans le premier paragraphe de cet article, on situe l'estimation des coûts par rapport au cycle de vie des produits. On présente également les différentes

méthodes d'estimation de coût couramment utilisées en précisant leur domaine d'utilisation par rapport au cycle de vie des produits. On distingue ici principalement les trois méthodes génériques suivantes :

- la méthode analogique ;
- la méthode analytique ;
- la méthode paramétrique.

Dans le deuxième paragraphe, on définit le prix de revient technique et on précise la difficulté à en connaître chaque élément. Cette partie rappelle au lecteur les éléments les plus importants à prendre en compte dans le coût d'une pièce mécanique.

Afin de bien maîtriser les résultats d'un chiffrage, on aborde dans les deux paragraphes suivants la précision des méthodes et les courbes d'apprentissage. Ces deux éléments sont très importants et expliquent les raisons de chiffrages différents pour une même pièce.

Enfin, dans le dernier paragraphe de l'article, il y a une présentation détaillée de chacune des méthodes citées précédemment avec, pour chacune :

- la définition ;
- la mise en œuvre ;
- les avantages et inconvénients ;
- l'application sur un cas réel.

On montre que la **méthode paramétrique** basée sur les Fonctions d'Estimation de Coût (FEC) permet de connaître les tendances générales d'évolution d'un coût mais ne permet pas de résoudre l'estimation de coût d'un cas particulier. Un des exemples utilisés pour illustrer la méthode paramétrique présente la détermination et la mise en œuvre d'une FEC. Quant à la **méthode analogique**, par la recherche de cas similaires, elle est en mesure de résoudre un cas particulier à condition que celui-ci ait déjà été traité. On présente une application de la méthode analogique avec l'utilisation d'un outil de raisonnement à partir de cas passés. Il s'agit d'une technique différente de la technologie de groupe mettant en œuvre des techniques d'apprentissage, d'indexation et de mesure de similarité. Les résultats obtenus aujourd'hui avec les outils de raisonnement à partir de cas sont très intéressants. Enfin, la **méthode analytique** est très utilisée pour la grande série lorsque l'on se trouve en phase d'industrialisation et qu'il s'agit d'optimiser le process de fabrication.

# 1. Problématique de l'estimation de coût

## 1.1 Contexte

Aujourd'hui, on considère qu'il existe trois points de vue différents de l'estimation de coût selon le type de décision à prendre. En

effet, le souci de la direction qui a la charge de définir la stratégie de l'entreprise est principalement la « marge » ou le bénéfice réalisable sur un projet donné. Il est en effet vital pour toutes les entreprises de dégager du profit pour continuer d'exister. Quant au commercial dont l'objectif est de placer le mieux possible son produit par rapport à la concurrence, il cherche à connaître le prix de vente optimal c'est-à-dire le prix du marché. Le prix de vente et la marge forment alors un ensemble définissant les contraintes économiques du projet imposant un prix de revient de fabrication (PRF) maximal. Le coût d'un projet est devenu aujourd'hui un paramètre de conception au même titre que les spécifications techniques.

	Direction	Service commercial	Bureau d'étude
Points de vue	Stratégique	Commercial/Marketing	Technique
Objectifs	Marge	Prix du marché	Prix de Revient de Fabrication (PRF) Conception à coût objectif Optimisation des coûts

L'étude des coûts intervient donc tout au long du cycle de vie d'un produit depuis la phase d'étude jusqu'à la commercialisation.

Au cours de la conception d'un produit, l'évaluation du coût de ce dernier est une information riche en enseignement. Elle peut amener l'ingénieur à concevoir une autre pièce offrant les mêmes caractéristiques fonctionnelles mais dont le coût pourrait être moins élevé.

Par ailleurs, on constate qu'au cours de la phase de conception, 70 % du coût d'un projet y est défini alors qu'elle ne représente que 5 à 10 % du coût total de celui-ci (figure 1). De même, on a pu constater que plus le projet avance, plus les modifications nécessaires pour diminuer le coût sont importantes (figure 2). Il est donc devenu essentiel de maîtriser le paramètre coût le plus tôt possible dans le cycle de vie d'un produit ou d'un projet.

Néanmoins, l'estimation de coût est un travail long et fastidieux qui nécessite beaucoup d'informations. Or, le travail d'un concepteur n'est pas de faire des calculs de prix de revient de fabrication mais de concevoir. Il est donc essentiel de mettre à sa disposition des méthodes d'estimation de coût rapides, précises et fiables lui permettant de prendre les meilleures décisions possibles.

De même, au moment de la préparation à la fabrication, l'estimation de coût basée sur des critères de fabrication ou sur la gamme de fabrication complète permet de connaître avec précision les coûts engagés et la productivité de l'outil de production. Le résultat d'un chiffrage devient alors un critère permettant de choisir entre plusieurs modes de fabrication.

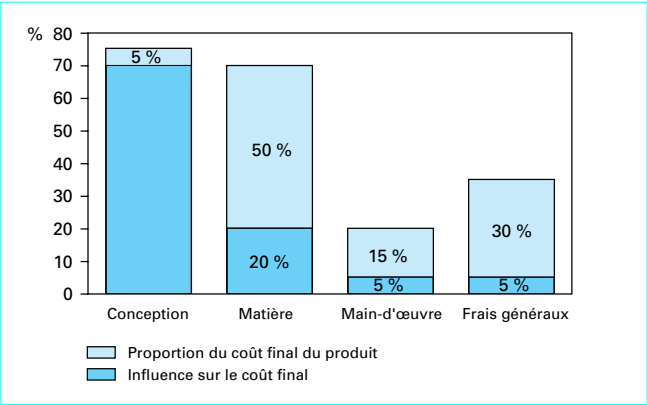


Figure 1 – Influence de la conception sur le coût de fabrication des véhicules de Ford [1]

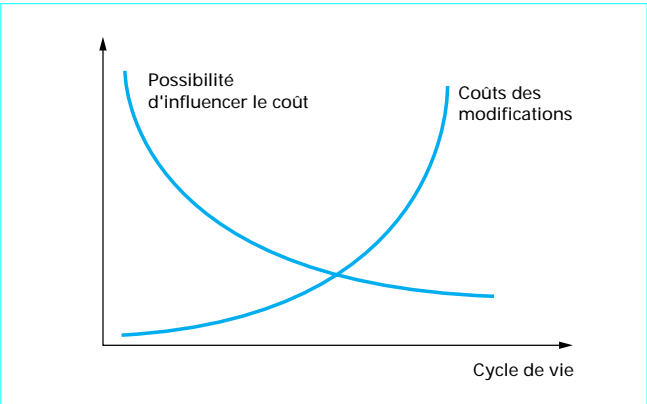


Figure 2 – Évolution du coût des modifications et de leurs influences sur le coût final

Par ailleurs, le suivi du coût de fabrication, par le retour d'informations tant au niveau de la conception que de la préparation à la fabrication, est une information très importante pour l'entreprise. En effet, une analyse détaillée de ces éléments permet de mieux maîtriser les coûts et de fiabiliser les devis. Ce qui va accroître la compétitivité de l'entreprise.

Enfin, pour certaines entreprises, telles que les sous-traitants de mécanique générale, l'élaboration d'un devis est très importante. En effet, on considère que dans ce domaine, seulement 10 % des devis sont transformés en commandes fermes. La qualité des documents fournis, la précision de l'estimation et le temps de réponse sont autant de critères qui déterminent la qualité d'un devis.

1.2 Différents niveaux d'une estimation de coûts

Comme nous venons de le voir, l'estimation de coût apparaît à tous les niveaux du cycle de vie. Il est nécessaire de définir à chaque étape du processus de réalisation d'un produit les conditions du chiffrage selon les points suivants :

- la précision de l'estimation ;
- le temps de réponse ;
- les moyens et le budget disponibles ;
- les résultats attendus (gamme d'usinage ou macrogamme, devis, ...).

Pour cela, on recense dans la littérature les différentes méthodes d'estimation suivantes :

- la *méthode intuitive* qui est basée sur l'expérience de l'estimateur ; son résultat est toujours dépendant des connaissances de l'estimateur ;
- la *méthode analogique* qui tente d'évaluer le coût d'un ensemble ou d'un système à partir d'ensembles ou de systèmes comparables ;
- la *méthode paramétrique* qui cherche à évaluer les coûts d'un produit à partir de paramètres caractérisant le produit sans le décrire ;
- la *méthode analytique* qui permet d'évaluer le coût d'un produit à partir d'une décomposition du travail à réaliser en tâches élémentaires.

Une étude comparative réalisée par Vacossin [2] analyse ces différentes méthodes selon 3 critères :

- la rapidité d'implantation dans l'entreprise ;
- la rapidité d'utilisation ;
- la précision des résultats obtenus.

Les résultats de cette étude sont donnés dans le tableau 1.

Ces méthodes ne sont pas utilisables à tout moment. Certaines méthodes sont préférables à d'autres selon le contexte et des conditions établies précédemment. Il se dégage tout de même une tendance générale quant à l'utilisation qui est présenté dans le tableau 2 [3] :

Tableau 1 – Analyse comparative des méthodes d'estimation de coût [2]			
Performance	Implantation	Mise en œuvre	Précision
analogique	–	+	+
paramétrique	–	+	+
analytique	+	–	+
+ : bon. – : mauvais.			

Tableau 2 – Utilisation des méthodes d'estimation de coût

Faisabilité	Définition	Développement	Production	Utilisation
analogique				
paramétrique				
			analytique	

Les méthodes analogique et paramétrique sont fréquemment utilisées dans les premières phases du cycle de vie d'un produit à cause de leur rapidité d'exécution et de la faible quantité d'informations nécessaire. Lorsque le produit et parfois le processus de fabrication sont parfaitement définis, on utilise plutôt la méthode analytique pour la qualité de ses résultats. Elle rend possible une optimisation locale du processus de fabrication.

## 2. Décomposition et définition du coût de revient technique

On peut considérer les coûts en fonction de la possibilité de les affecter directement ou non à un produit ou à une activité. On distingue ainsi :

— *les coûts directs* : il s'agit, dans la plupart des cas, des coûts disparaissant avec la production (main-d'œuvre, matière, outils, utilisation des machines...) ;

— *les coûts indirects* : ils représentent les dépenses nécessaires pour produire mais que l'on ne peut affecter à un produit spécifique (assurance, encadrement, ...).

La répartition des coûts indirects est une opération délicate. Elle dépend essentiellement de choix stratégiques de la part de la direction de l'entreprise. Par conséquent, nous ne parlerons pas de ces coûts induits appelés coût de structure.

Dans cet article, on ne prend en considération que le coût de revient technique défini de la façon suivante :

**coût de revient technique**

**= coût de fourniture + coût de sous-traitance + coût de fabrication**

Ce coût n'intègre que les dépenses dépendant effectivement de la solution choisie et des moyens de production concernés.

### 2.1 Coût de fourniture

Le coût de fourniture représente essentiellement le coût du brut. On considère deux types de brut :

- le brut standard : brut laminé, étiré... ;
- le brut spécifique : brut de fonderie, estampé...

De nombreuses études montrent que le coût du brut représente une part très importante du coût de revient technique (en moyenne 50 %) [4]. Il est donc essentiel de déterminer son coût d'obtention de manière réaliste et rapide.

En outre, il arrive que :

- l'obtention du brut soit effectuée à l'extérieur de l'entreprise ; dans ce cas, il s'agit bien d'un coût de fourniture ;
- l'obtention du brut soit réalisée en interne ; dans ce cas, il s'agit d'un coût de fabrication.

Dans le cas d'un brut standard, on associe généralement à chaque couple (type de brut, matière) un coût par unité de poids ou de longueur, ce qui permet de connaître très facilement le coût direct de matière. Il existe plusieurs possibilités pour déterminer ce coût par unité d'œuvre :

— *la méthode du FIFO (First In, First Out)* : les matériaux sont fournis au prix où ils ont été achetés ; le lot le plus vieux est sorti en premier ; cette méthode nécessite un effort important de comptabilité mais permet de prendre en compte le prix d'achat exact ;

— *la méthode du LIFO (Last In, First Out)* : les matériaux sont également fournis au prix où ils ont été achetés ; le lot le plus récent est sorti en premier ; comme précédemment, cette méthode demande un effort de comptabilité important mais permet de prendre le brut au coût actuel ;

— *la méthode du prix moyen* : périodiquement, on évalue le prix moyen du stock pour chaque type de brut permettant ainsi d'éliminer les différences de prix d'achat ;

— *la méthode de la valeur de remplacement* : la matière première est facturée au prix du marché en cours ; cette méthode est très intéressante lorsque les prix augmentent ;

— *la méthode des prix standards* : pour chaque matière, on détermine un prix pour une année ; on enregistre les différences entre le prix d'achat et le prix standard permettant ainsi d'évaluer l'effort du service achat et de déterminer le prix standard de l'année suivante ; cette méthode est très simple et efficace si les prix sont relativement stables.

Ces différentes méthodes s'appliquent essentiellement aux bruts standards. Toutefois, il est possible de les appliquer également à des bruts spécifiques à condition que ces derniers fassent l'objet de commandes importantes, régulières et nécessitant la gestion d'un stock.

Pour le brut spécifique, il est difficilement acceptable de se limiter dans le cas d'un devis, à estimer un coût moyen de production en utilisant comme unité d'œuvre le coût moyen au kilo. En effet, l'entreprise ne vendrait que des pièces complexes dont le coût serait sous-estimé. Par ailleurs, il est irréaliste de réaliser une gamme de fabrication complète. En effet, le prix dépend au moins des paramètres suivants :

— la forme du brut (géométrie) : plus la forme est complexe, plus le coût d'obtention du brut sera élevé ;

— le volume de matière ;

— la taille du lot (nombre de pièces et cadence) : on n'aura pas le même prix de revient avec l'utilisation d'une machine à forger horizontale à une cadence de 60 pièces par minute ou avec la réalisation en forge libre à la cadence d'une pièce toutes les 10 minutes ;

— la matière (coût et caractéristiques mécaniques) : les caractéristiques mécaniques auront nécessairement une influence sur l'énergie à dépenser pour transformer la matière ;

— la technique utilisée ;

— les conditions du fournisseur.

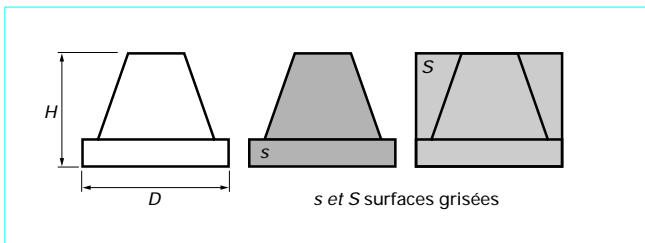


Figure 3 – Exemple de paramètres utilisés [5]

On procède généralement par analogie en comparant la pièce à réaliser à un ensemble de données. Un premier codage permet de classer la pièce en fonction de ses dimensions et de sa morphologie. Ce codage permet de retrouver un certain nombre de paramètres de fabrication permettant de classer les pièces par famille.

Dans le cas des pièces forgées (figure 3), on utilise les rapports  $D/H$  et  $S/s$  pour classer les pièces de révolution par famille [5]. Chaque famille correspondant à un mode de fabrication, il est donc facile de réaliser un chiffrage fiable et réaliste en prenant en compte les paramètres supplémentaires cités précédemment (matière, cadence...).

## 2.2 Coût de sous-traitance

On distingue trois types de sous-traitance :

— *la sous-traitance de moyen* : certaines tâches très spécifiques nécessitent des corps de métier ou du matériel que l'entreprise ne possède pas ; dans ce cas, il est nécessaire de faire appel à la sous-traitance ;

— *la sous-traitance de capacité* : il s'agit d'un appel à un sous-traitant car l'entreprise se trouve en surcharge de travail ; l'entreprise peut soit considérer le coût de la sous-traitance, soit estimer le coût du travail comme si l'opération avait été effectuée dans l'entreprise ; la deuxième possibilité peut avoir comme effet de diminuer la marge bénéficiaire de l'entreprise ;

— *la sous-traitance à coût horaire plus faible* : il arrive fréquemment que le coût horaire de l'entreprise, pour certaines activités, soit supérieur à celui proposé par certains sous-traitants ; il est tout de même nécessaire de faire une analyse plus fine sur l'évolution des coûts horaires dans ce cas ; si on considère en effet que le coût horaire  $Ch$  prend en compte des charges fixes et des charges variables :

$$Ch = \frac{CV + CF}{Np}$$

avec  $CV$  charges variables,  
 $CF$  charges fixes,  
 $Np$  nombre de produits.

si on considère que les coûts variables sont linéaires, on a donc :

$$Ch = \frac{KNp + CF}{Np} = K + \frac{CF}{Np}$$

avec  $K$  constante positive.

Dans ce dernier cas de sous-traitance, moins l'entreprise exploitera ses machines plus le coût horaire sera important. Par conséquent, il est nécessaire de comparer cette augmentation du taux horaire avec le gain que peut apporter la sous-traitance avant de prendre une décision en faveur de la sous-traitance.

## 2.3 Coût de fabrication

Comme nous l'avons indiqué précédemment (§ 2.1), le coût du brut peut être considéré comme un coût de fabrication. Dans ce paragraphe, on se limite donc au coût d'usinage. Néanmoins, il est tout de même important de souligner que le coût du brut dépend de la précision dimensionnelle et des caractéristiques techniques exigées. Par conséquent, le choix d'un procédé d'obtention ne peut être effectué qu'en comparant le coût d'usinage pour chacune des possibilités de fabrication.

Le coût de fabrication se décompose en :

- coût de préparation à la fabrication ;
- coût d'usinage ;
- coût des outils coupants.

### 2.3.1 Coût de préparation à la fabrication

Le coût de préparation à la fabrication concerne l'ensemble des opérations correspondant à la définition de la stratégie de fabrication, au développement et à l'installation et/ou la réalisation des dispositifs nécessaires à la fabrication. Il s'agit de :

1. l'élaboration de la gamme d'usinage [27] ;
2. la programmation CN [28] ;
3. le choix et la conception des outillages [29] ;
4. le montage des outils ;
5. le montage de la pièce.

L'ensemble de ces coûts est très difficile à estimer. En effet, ces opérations représentent un travail humain (physique ou mental). Or la détermination des temps humains (donc des coûts) est sujette à tous les aléas de la réalisation. Beaucoup de paramètres peuvent venir perturber une exécution normale de l'opération :

- la qualification du personnel ;
- la connaissance exacte et le respect du mode opératoire ;
- l'influence de l'environnement ;
- l'apprentissage ;
- la monotonie...

Il existe plusieurs possibilités pour évaluer ces temps :

— l'utilisation des temps élémentaires : la plupart des éléments de travail ont été étudiés et les temps élémentaires correspondants sont regroupés dans des tableaux ; ce procédé s'applique parfaitement pour évaluer les temps de montage des outils sur un poste donné ;

— l'utilisation des standards de temps de mouvement ; deux systèmes de classification de gestes courants sont connus en France [6] ; il s'agit de MTM (*Method Time Measurement*), de WFS (*Work Factor System*), etc. ; l'utilisation de ces standards est facile d'emploi pour la détermination des temps de montage de pièce ;

— l'utilisation de lois empiriques paramétrées : par exemple, Anselmetti [7] propose une relation permettant de définir le temps de programmation en fonction de la difficulté que représente l'usinage de la pièce :

$$\text{Temps de programmation CN} = 10 \text{ mn} + 8 \text{ mn/phase} + 1,5 \text{ mn/outil} + 2 \text{ mn/opération}$$

— par comparaison avec des pièces similaires réalisées dans le passé : dans ce cas, la part d'estimation porte sur les différences de travail.

### 2.3.2 Coût d'usinage ou coût d'utilisation de la machine

Le coût d'usinage correspond au coût engendré lorsque la machine est en fonctionnement. Le temps total dans ce cas correspond au temps total de déplacement de l'outil en approche rapide et en vitesse de travail, le temps de dégagement de l'outil, le change-

ment automatique de l'outil lorsque c'est possible. La détermination du coût d'usinage nécessite la connaissance de coût horaire machine  $C_m$  que l'on peut évaluer de la façon suivante.

Le modèle simplifié du coût horaire machine comprend [8] :

1. l'amortissement de la machine et des frais financiers :

$$A = \frac{P}{HN} + \frac{Pi}{2H}$$

avec  $P$  prix de la machine,  
 $H$  nombre d'heures d'utilisation par an,  
 $N$  durée en année de l'amortissement,  
 $i$  taux d'intérêt ;

2. les frais de fonctionnement :

$$R = \frac{F_r}{H} + \frac{IS}{H} + 0,6 eW + 1,6 CS$$

avec  $F_r$  frais de réparation et d'entretien annuels,  
 $H$  nombre d'heures d'utilisation par an,  
 $S$  surface occupée par la machine,  
 $I$  frais de local par m<sup>2</sup> et par an,  
 $H$  nombre d'heures d'utilisation par an,  
 $W$  puissance de la machine en kW (utilisée qu'à 60 %),  
 $e$  coût du kW par heure,  
 $CS$  charge salariale (1,6 CS comprend les charges sociales).

On a donc  $C_m = A + R$

#### Exemple

Prix de la machine : 800 kF  
 Nombre d'heures d'utilisation par an : 1 600 h/an  
 Durée d'amortissement : 5 ans  
 Puissance de la machine : 15 kW  
 Taux d'intérêt : 8 %/an  
 Frais de réparation et d'entretien : 4 000 F/an  
 Surface occupée : 20 m<sup>2</sup>  
 Frais par m<sup>2</sup> par an : 50 F/(m<sup>2</sup>/an)  
 Frais d'énergie : 0,5 F/kWh  
 Charge salariale : 50 F/h  
 On obtient  $C_m = 207$  F/h

### 2.3.3 Coût des outils coupants

Le coût des outils coupants représente le coût de remplacement de ces outils. Ce remplacement dépend directement de leur usure. On montre que les coûts des outils coupants et d'utilisation de la machine sont dépendants [8]. En effet, lorsque la vitesse de coupe  $V_c$  augmente, le temps d'usinage décroît dans les mêmes proportions. En revanche, l'usure de l'outil augmente aussi et donc le coût des outils coupants par pièce augmente [30].

Pour définir l'optimum, il est nécessaire de modéliser la loi d'usure des outils. On trouve dans la littérature différents modèles de la loi d'usure [9] [10]. Le modèle d'usure le plus simple et le plus couramment utilisé est le modèle de Taylor simplifié que l'on peut écrire de la façon suivante :

$$V_c T^n = Cte = \alpha$$

avec  $V_c$  vitesse de coupe,  
 $T$  durée de vie de l'outil,  
 $n$  coefficient de Taylor.

On démontre facilement que la durée de vie économique suit la relation :

$$T_0 = \left(\frac{1}{n} - 1\right) \frac{C_o}{C_m}$$

et que

$$V_{c_0} = \alpha T_0^{-n}$$

avec  $T_0$  durée de vie économique,  
 $V_{c_0}$  vitesse de coupe économique,  
 $C_o$  coût de l'outil,  
 $C_m$  coût horaire de la machine.

Cette relation très intéressante montre que la durée de vie économique est un compromis prenant en compte  $C_o$ ,  $C_m$  et le couple outil/matière par l'intermédiaire du coefficient :  $n$  de Taylor.

À titre indicatif, on trouve pour  $n$  les valeurs données dans le tableau 3. La durée de vie économique décroît, toutes choses égales par ailleurs, des outils en acier rapide, en carbure ou en céramique. En revanche, la vitesse de coupe économique correspondante croît.

**Tableau 3 – Valeurs du coefficient de Taylor et des vitesses de coupe optimales correspondantes**

Machine à outil	$n$ (1)	$T_0/(C_o/C_m)$
acier rapide.....	0,125	7
carbure.....	0,25	3
céramique.....	0,5	1
(1) Valeurs indicatives.		

À partir de la durée de vie économique on évalue facilement le nombre de remplacements nécessaires. Il suffit alors de connaître le coût de remplacement d'un outil. On détermine ce dernier en prenant en considération le type d'outil (réaffûtable ou à plaquettes amovibles) de la façon suivante.

■ Coût de remplacement d'un outil réaffûtable [8] :

$$C_o = C_{ou} + C_{af} + C_c$$

avec  $C_{ou}$  coût de l'outil pour une durée de vie  $T$  (entre 2 affûtages)

$$C_{ou} = P_o/n_a$$

$P_o$  prix d'achat de l'outil,  
 $n_a$  nombre d'affûtages moyen,  
 $C_{af}$  coût de l'affûtage

$$C_{af} = t_a C_a$$

$t_a$  temps d'affûtage,  
 $C_a$  coût horaire de l'affûtage,  
 $C_c$  coût de changement d'outil

$$C_c = t_c C_m$$

$t_c$  temps de changement d'outil,  
 $C_m$  coût horaire machine.



## ■ Coût de remplacement d'un outil à plaquettes amovibles [8] :

$$C_o = C_{ou} + C_f + C_c$$

avec	$C_{ou}$	coût des plaquettes
		$C_{ou} = ZP/a$
	$Z$	nombre de dents,
	$P$	prix d'achat d'une plaquette (1 plaquette par dent),
	$a$	nombre d'arêtes utilisables,
	$C_f$	amortissement des éléments de fixation des plaquettes
		$C_f = Zf/T_f$
	$f$	coût des éléments de fixation pour une plaquette,
	$T_f$	durée de vie des éléments de fixation (en nombre de changement d'arêtes),
	$C_c$	coût de changement des plaquettes
		$C_c = Zt_p C_m$
	$t_p$	temps de changement d'une plaquette,
	$C_m$	coût horaire machine.

Dans le cas de changement des plaquettes hors machine, il faut bien sûr tenir compte du coût de changement de plaquettes et de montage d'outil sur machine.

**Exemple**

Nombre de dents : 20

Prix de la plaquette : 40 F

Nombre d'arêtes : 6

$C_{ou} = 133$  F

Coût des éléments de fixation : 220 F

$C_f = 22$  F

Durée de vie des éléments de fixation : 100

Temps de changement de plaquette : 30 s

Coût horaire machine : 200 F/h

$C_c = 33$  F

On obtient  $C_o = 188$  F

Il est important de noter que l'estimation du coût des outils coupants est très bien maîtrisée en ce qui concerne les achats annuels et le coût de l'affûtage.

En revanche, la détermination des coûts de stockage, de recyclage, de réglage et de gestion des outils coupants est généralement inconnue. Il s'agit en fait de charges indirectes telles que :

- l'achat ;
- la réception et le contrôle des fournitures ;
- le stockage physique dans le magasin ;
- la préparation des outils et la recherche des composants ;
- la mise à jour du fichier de gestion des outils coupants.

L'estimation de ces coûts dépend fortement de l'organisation de l'entreprise. Pour les définir, il est nécessaire d'enquêter auprès des différents intervenants : magasiniers, acheteurs, ...

### 3. Précision d'une estimation et marge d'erreur

La précision et la marge d'erreur d'une méthode d'estimation sont des caractéristiques essentielles qui doivent être parfaitement maîtrisées. En effet, il serait très dangereux d'accepter le résultat d'une méthode d'estimation sans considérer les risques d'erreurs.

#### 3.1 Trois caractéristiques : fidélité, sensibilité et justesse

M. Pallot [10] considère que l'on peut qualifier une méthode de prédétermination de la même façon qu'un appareil de mesure, c'est-à-dire à l'aide de trois caractéristiques de bases :

- la fidélité ;
- la sensibilité ;
- la justesse.

*La fidélité* d'une méthode de prédétermination caractérise sa capacité à donner toujours le même résultat pour le même produit dont on veut estimer le coût. Dans la pratique, on constate bien souvent que la prédétermination du coût d'une même pièce par des estimateurs différents, appliquant la même méthode, peut donner des résultats très différents. Dans ce cas, on dit que la méthode utilisée est peu fidèle. Pour parvenir à une fidélité correcte de l'estimation de coût, il faut absolument maîtriser tous les paramètres qui interviennent dans les calculs.

*La sensibilité* d'une méthode de prédétermination caractérise sa capacité à tenir compte correctement des variations de données. Par exemple, la diminution de la qualité de l'état d'une surface se traduit par une plus grande souplesse de fabrication ; il en résulte une diminution des temps d'usinage et donc une diminution du coût. Une méthode de prédétermination sensible doit être capable de prendre en compte ces aspects et de les faire ressortir dans les résultats.

*La justesse* : on dit qu'une méthode est juste si elle est capable de fournir des résultats exacts. Si une méthode donne toujours des coûts surestimés de 10 %, on dit alors que cette méthode est fidèle et sensible mais peu juste ou inexacte. Si on connaît ces écarts, il est possible de corriger le résultat à l'aide d'un coefficient d'ajustement.

#### 3.2 Précision théorique et précision industrielle

Seuls les temps de fabrication ou les coûts réels peuvent servir de référence de mesure pour les valeurs prédéterminées. Par conséquent, on ne peut vérifier la précision d'une méthode d'estimation de coût qu'en comparant les coûts estimés avec les coûts réels.

Toutefois, de nombreux facteurs aléatoires (l'irrégularité du brut, la rupture de stock, la commande urgente...) peuvent perturber la production. Les coûts réels sont donc rarement constants pour une même pièce. De plus, dans le cadre de fabrication en séries limitées, le nombre d'ordres de fabrication d'une même pièce est bien souvent trop faible pour admettre qu'une valeur moyenne soit représentative du coût théorique exact. Il en résulte des dispersions difficiles à maîtriser car dépendant des caractéristiques propres à chaque atelier. Il est donc nécessaire de distinguer deux types de précision [10] :

- *la précision théorique* qui englobe les incertitudes relatives de fidélité, de sensibilité et de justesse ; elle est difficile à évaluer à cause de la difficulté à évaluer et à éliminer l'instabilité de la fabrication ;
- *la précision industrielle* qui cumule la précision théorique et l'instabilité de fabrication ; elle est simple à déterminer puisqu'elle prend en compte tous les écarts rencontrés ; c'est celle que l'on utilise le plus souvent.

#### 3.3 Marge d'erreur globale

La prédétermination d'un coût consiste à estimer la valeur la plus probable de ce que peut être ou sera le coût effectif de réalisation du projet ou du produit. Dans la pratique, on peut constater que si on demande à 20 personnes différentes une estimation du coût d'un produit, on obtient 20 résultats différents. La variable coût a donc la nature d'une variable statistique dont il est possible de construire

expérimentalement la courbe de densité de probabilité. Cela est vrai pour les coûts estimés comme pour les coûts réalisés à cause des instabilités de fabrication.

Lorsque l'estimation du coût revient à calculer les charges prévisionnelles de plusieurs opérations ou postes (usinage, équipement, approvisionnement...), il est important de connaître leur degré de dépendance. Si les opérations sont indépendantes, on profite alors de la compensation des résultats [11]. Ce n'est pas toujours vrai. En effet, dans le cas de l'usinage, une mauvaise appréciation de la matière à usiner entraîne une erreur d'estimation dans le même sens (augmentation ou diminution) pour toutes les opérations. Il en est de même pour les temps d'équipement, d'approvisionnement, ou pour l'estimation du coût horaire des machines. Il n'y a donc pas compensation des erreurs et l'erreur absolue totale est égale à la somme des erreurs. Pour des temps élémentaires  $T_i$ , on a :

$$\Delta T_t = \sum \Delta T_i$$

avec  $\Delta T_t$  erreur absolue totale,  
 $\Delta T_i$  erreur pour la  $i^{\text{e}}$  opération.

Si on considère maintenant les erreurs relatives, on peut noter la relation suivante :

$$\frac{\Delta T_t}{T_t} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots}{T_1 + T_2 + \dots} = \frac{T_1 \frac{\Delta T_1}{T_1} + T_2 \frac{\Delta T_2}{T_2} + \dots}{T_1 + T_2 + \dots}$$

Il s'agit donc de la moyenne des erreurs relatives des temps élémentaires. Par conséquent, on a tout intérêt à réduire l'erreur des temps élémentaires les plus longs.

Bien qu'il n'y ait pas de compensation des erreurs au niveau de l'estimation des temps élémentaires, on constate que, dans la pratique, le grand nombre de devis effectués permet de compenser les erreurs. Ce phénomène s'explique en considérant que les écarts sur les devis se répartissent selon une loi normale. En effet, l'hypothèse de dispersion selon la loi normale se justifie par le fait que les erreurs réalisées sur chaque devis, autres que les erreurs de justesse, dépendent d'un grand nombre de causes indépendantes dont les effets s'additionnent et dont aucune n'est prépondérante. Dans ce cas, la valeur théorique du cumul des erreurs d'un grand nombre de chiffrages correspond à la somme quadratique des erreurs de chaque devis. On a donc :

$$\text{erreur} = \sqrt{\text{erreur}_1^2 + \text{erreur}_2^2 + \dots}$$

On considère maintenant que l'erreur relative peut s'écrire :

$$\frac{\sum \Delta T_i}{\sum T_{ti}} = \frac{\sqrt{\Delta T_{t1}^2 + \Delta T_{t2}^2 + \dots}}{T_{t1} + T_{t2} + \dots}$$

avec  $T_{ti}$  temps total donné par le  $i^{\text{e}}$  devis.

Sur un ensemble de devis, on considère donc que l'erreur relative correspond à la moyenne quadratique des erreurs des temps de chaque devis. Dans ce cas, la compensation est très importante. Si on considère  $n$  devis réalisés avec une même précision sur un temps équivalent, on a alors :

$$\frac{\sum \Delta T_t}{\sum T_t} = \frac{\sqrt{n \Delta T_t^2}}{n T_t} = \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{\Delta T_t}{T_t}$$

Ce qui donne numériquement : pour  $n = 100$  et  $\Delta T_t / T_t = \pm 20 \%$  soit :

$$\frac{\sum \Delta T_t}{\sum T_t} = \frac{1}{\sqrt{100}} \times (\pm 20 \%) = \pm 2 \%$$

L'erreur relative sur l'ensemble des devis est seulement de 2 % grâce au phénomène de compensation et à condition de ne pas avoir d'erreurs de justesse. Si on n'avait pas cette indépendance du chiffrage de chaque devis alors, cette erreur relative aurait été de 20 %.

Il convient tout de même de rester prudent pour l'estimation du coût des pièces qui engagent de fortes charges. Dans ce cas, il y a toujours un risque d'introduire une erreur d'estimation importante au niveau de la charge globale.

En modifiant l'exemple précédent, on obtient :

Nombre de devis	Erreur relative $\Delta T_t / T_t$	Charge $T_t$	$\Delta T_t$
99 devis .....	20 %	1 heure	0,2 heure
1 devis .....	20 %	50 heures	10 heures

soit :

$$\frac{\sum \Delta T_t}{\sum T_t} = \frac{\sqrt{99(0,2)^2 + 10^2}}{99 + 50} = 6,84 \%$$

On obtient alors une erreur relative sur la charge globale de 6,84 %. Cette erreur relative a plus que doublé alors qu'il s'agissait d'une charge importante sur seulement 1 % de l'ensemble des devis.

De la même façon que précédemment, on peut noter que si on estime le coût pour un lot de pièces identiques, plus le lot sera important plus le risque d'erreur sera important puisque dans ce cas l'erreur totale sera cumulée.

## 4. Courbes d'apprentissage

On constate dans la pratique que l'apprentissage par un opérateur manuel engendre petit à petit une diminution du temps de réalisation de cette opération. Cette diminution est asymptotique et on parvient à représenter ce phénomène grâce aux courbes d'apprentissage. En effet, on a remarqué que le temps nécessaire pour répéter  $n$  fois la même opération manuelle est différent de  $n$  fois le temps nécessaire de la première opération.

### 4.1 Expression mathématique

Dans la littérature [12] [13] [14] [15], on trouve essentiellement les modèles mathématiques suivants :

- le modèle de Wright ;
- le modèle de De Jong ;
- le modèle de Stanford-B.

Le modèle le plus fréquemment utilisé est le modèle de Wright. En étudiant les temps de réalisation, pour une fabrication donnée, on a constaté que chaque fois que le rang de l'unité était doublé dans la série, le temps unitaire était multiplié par une constante comprise entre 0 et 1.

À partir de ce qui vient d'être énoncé précédemment, on peut écrire :

$$T_{2i} = k T_i$$

avec  $i$  rang de l'unité de la série,  
 $T_i$  temps de réalisation de l'unité de rang  $i$ ,  
 $k$  coefficient d'apprentissage global.

ce qui donne, en répartissant de manière régulière dans le temps les progrès réalisés :

$$T_i = T_1 k^{\frac{\ln i}{\ln 2}}$$

avec  $T_1$  temps de réalisation de la première unité.



Les facteurs qui influencent le coefficient d'apprentissage sont :

- la part de main-d'œuvre ;
- la complexité du produit ;
- le degré d'automatisation du procédé de fabrication ;
- le niveau de préparation de la production ;
- le taux de modification lors de la production.

La détermination du coefficient d'apprentissage est réalisée de manière empirique. On peut trouver dans la littérature [12] quelques exemples :

- $k = 0,92$  pour la fabrication mécanique en alliage léger ;
- $k = 0,95$  pour la fabrication en matériaux nouveaux (fibres...).

## 4.2 Application à l'estimation des coûts

Généralement, on applique la courbe d'apprentissage au coût total d'un produit, ce qui revient au même puisque le coût dépend entre autres du temps réalisé pour les opérations manuelles. Estimer le coût unitaire moyen de  $n$  premiers articles, cela revient à déterminer la valeur suivante :

$$\frac{C_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_1 k^{\frac{\ln i}{\ln 2}} = \frac{C_1}{n} \sum_{i=1}^n k^{\frac{\ln i}{\ln 2}}$$

avec  $C_n$  coût des  $n$  premiers articles.

Il n'existe pas de relation mathématique directe pour calculer le terme de droite. Afin d'éviter les  $n$  itérations, on procède par une approximation de Simpson. En posant  $h = 1 + \frac{\ln k}{\ln 2}$ , on obtient :

$$\frac{C_n}{n} = \frac{C_1}{n} \left[ \frac{1}{h} [(n+0,5)^h - 0,5^h] - \frac{(h-1)(h-2)}{24} \right]$$

**Exemple :** pour une pièce en aluminium avec  $k = 0,92$  et  $C_1 = 100$  F, on obtient un coût unitaire moyen pour une production de 40 unités de :

$$\frac{C_{40}}{40} = 72,12 \text{ F}$$

Cet exemple montre que la prise en compte de l'apprentissage dans le coût unitaire moyen d'une pièce n'est pas négligeable. En effet, on constate un gain de 28 % du coût unitaire moyen par rapport au coût unitaire initial.

Pour plus d'informations sur la courbe d'apprentissage, on pourra se reporter à l'ouvrage de S. Bellut [12].

## 5. Méthodes d'estimation de coût

### 5.1 Méthode paramétrique

#### 5.1.1 Différents modèles paramétriques

Les méthodes paramétriques sont des méthodes de chiffrage mettant à profit la connaissance d'un certain nombre de caractéristiques physiques ou paramètres tels que la masse, le volume, le nombre d'entrée-sortie, etc. Ces méthodes paramétriques permettent d'établir le lien entre des caractéristiques techniques ou physiques d'un produit et le coût par l'intermédiaire de relations mathématiques et logiques.

Dans la littérature, on trouve au moins trois types de méthodes paramétriques :

- la méthode des barèmes ;
- les modèles statistiques ;
- les formules d'estimation de coûts (FEC).

La **méthode des barèmes** s'utilise pour estimer le coût de produits simples, et de tailles variables. La mise en œuvre de ce type de méthode nécessite de déterminer le paramètre technique le plus significatif de l'activité à valoriser. Ce paramètre permet de définir le ratio à quantifier (F/ml, F/kg). La valorisation se détermine ensuite par analogie avec des produits achevés, ce qui place cette méthode à la frontière entre l'analogie et le paramétrique. Un des inconvénients majeurs de cette méthode réside en l'hypothèse d'une relation linéaire entre la valeur du paramètre considéré et le coût.

Les **modèles statistiques** sont construits autour d'un ensemble de relations statistiques qui se veulent universelles. Pour parvenir à cette relation, on découpe l'ensemble des activités pour la réalisation d'un produit en domaines et chacun fait l'objet d'une formule mathématique. Un modèle comporte trois types de données :

- les descripteurs techniques ;
- les relations mathématiques utilisées pour aboutir à l'estimation du coût des différentes activités ;
- des constantes.

À l'inverse des autres fonctions d'estimation de coût, un modèle paramétrique présente les caractéristiques suivantes :

- l'universalité ;
- la généralité ;
- la diversité des variables de sortie.

Bien sûr dans la pratique, il n'existe pas de modèles totalement universels. On peut trouver un exemple de modèle dans [4] où il détermine par exemple, pour une famille de pièces, le temps non productif ou le temps total d'usinage à l'aide de formules complexes.

Une **formule d'estimation de coût** (FEC) est une relation mathématique simple permettant de passer d'un certain nombre de caractéristiques techniques ou dimensionnelles à un coût. On distingue deux catégories de paramètres :

- les grandeurs physiques : répondant à une description en terme de fonction ;
- les grandeurs de dimensionnement ou de prédimensionnement répondant à la description de la solution.

On limite généralement le nombre de paramètres dans les FEC entre deux et cinq. La FEC est généralement limitée à :

- un type de produit à estimer ;
- un type de technologie de mise en œuvre ;
- une phase dans le cycle de vie du produit.

On trouve dans la littérature [16] quelques exemples de FEC permettant d'estimer les coûts de produits à partir de variables indépendantes :

Moteur à turbine	Poids net, poussée maximale, poussée nominale, consommation spécifique, température d'admission
Moteur alternatif	Poids net, course du piston, taux de compression, puissance
Pièces en tôle	Poids net, taux de rebut, nombre de trous percés, nombre de rivets, longueur de soudure, volume enveloppe

Parmi les systèmes permettant de définir des fonctions d'estimation de coût, on peut citer le logiciel *Cost +* développé par la société 3f [17].

#### 5.1.2 Construction d'une FEC

Pour déterminer une FEC, on utilise les techniques de régression et d'analyse de la variance. Pour cela, on procède de la façon suivante :

- la collecte des données, l'évaluation et la normalisation ;
- le choix de paramètres descripteurs de coût : ce choix de paramètre est généralement réalisé par des experts ;
- le choix de la structure de la formule : on peut utiliser n'importe quel type de structure ; on a constaté que de nombreux cas peuvent être résolus par une forme multiplicative facilement linéarisable :

$$C = \beta_0 P_1^{\beta_1} P_2^{\beta_2} \dots$$

avec  $P_1, P_2, \dots$  paramètres descripteurs ;

- la détermination des coefficients  $\beta_i$  à l'aide des techniques de régression linéaire multiple [18] : la détermination des  $\beta_i$  se fait facilement par la généralisation de la méthode des moindres carrés à plusieurs variables ;

- l'examen des résultats obtenus qui peut se faire sur trois points :

- l'écart type sur chaque coefficient  $\beta_i$ ,
- la marge d'incertitude sur les valeurs de coût prédite par la FEC pour un nouveau projet,
- la simplification de la FEC.

Lors de la publication d'une FEC, il est nécessaire de préciser en même temps la famille technologique à laquelle elle s'applique, les unités de mesure de tous les paramètres, le nombre de points utilisés, l'intervalle de confiance et sa précision.

### 5.1.3 Avantages - Inconvénients

La méthode paramétrique est très intéressante grâce à sa rapidité d'exécution.

De plus, la FEC en phase de conception est capable de mettre en évidence l'influence de certains paramètres sur la valeur économique du produit. Le concepteur est alors en mesure d'optimiser sa conception d'un point de vue économique.

En revanche, on peut lui faire le reproche de fonctionner comme une boîte noire. C'est-à-dire qu'à partir de paramètres descripteurs, on obtient seulement, en résultat, les différents coûts. On ne connaît pas l'origine de ces coûts, ce qui a tendance à rebuter l'utilisateur.

Enfin, en phase de conception, on ne dispose pas toujours de toutes les informations. Il se peut donc que certains paramètres descripteurs ne soient pas encore définis. Le concepteur est obligé d'estimer dans un premier temps les paramètres manquants. Ce qui engendre une incertitude dans le résultat.

Dans la mesure où les FEC dégagent les tendances générales, elles ne permettent pas de résoudre les cas particuliers. Même si les paramètres descripteurs d'une pièce sont dans les limites imposées par la FEC, cela ne suffit pas. Il est possible que d'autres paramètres

non pris en compte aient dans certains cas une importance non négligeable.

En définitive, on notera que la méthode paramétrique basée sur l'utilisation des FEC répond aux besoins des concepteurs grâce à sa rapidité d'exécution et à l'information qu'elle fournit sur les tendances globales mais présente les inconvénients cités précédemment.

### 5.1.4 Application 1

#### 5.1.4.1 Contexte de l'application

L'aspect confidentiel des travaux ne nous permet pas de présenter les résultats complets de notre travail de recherche sur ce thème. Nous avons donc décidé d'illustrer notre propos à partir de données obtenues dans un article du CETIM et publié dans l'article de Jiménez [19]. Il s'agit de l'estimation de **coût des pistons** utilisés pour les moteurs Diesel dans le ferroviaire.

Cela nous a permis de constituer une base de 37 cas dont le tableau 4 donne un extrait. L'unité d'œuvre que nous avons choisie correspond au temps unitaire sans réglage (TUN). Une fois le temps unitaire défini, la valorisation en coût est effectuée directement à l'aide d'un coefficient multiplicateur en francs par unité d'œuvre.

#### 5.1.4.2 Recherche des paramètres

La recherche des paramètres de conception à prendre en compte dans la FEC a montré que les trois paramètres les plus importants à prendre en compte sont les suivants : diamètre du piston, hauteur du piston, diamètre de l'axe ainsi que la matière.

#### 5.1.4.3 Détermination de la FEC

Afin de déterminer la meilleure FEC possible, nous avons effectué plusieurs régressions (régression linéaire et polynomiale de degré deux) avec différentes bases de cas (base de cas complète comprenant l'ensemble des cas : pièces en fonte et en aluminium, base de cas des pièces en fonte et enfin base de cas des pièces en fonte FT 26).

Les résultats observés sont les suivants : taux d'erreur moyen, erreur maximale et taux d'erreur entre  $\pm 20\%$ .

Pour la base de cas des pièces en fonte FT 26, on obtient les résultats du tableau 5.

Une étude plus approfondie des résultats de régression est donnée dans le tableau 6 pour la FEC à partir de la base de pièce en fonte FT 26.

Tableau 4 – Extrait de la base de cas

N°	Matière	Diamètre mm	Hauteur mm	Diamètre de l'axe mm	Nombre de perçages	Nombre de gorges	Quantité	Temps unitaire (ch)	Temps de réglage (ch)	Temps série (ch)	TUN (ch)
1	Fonte FT 26	110	172	35	36	5	6	182	60	1 092	172,00
2	Fonte FT 26	90	140	30	36	5	12	148	0	1 764	148,00
3	Fonte FT 26	100	172	40	36	5	5	201	0	1 005	201,00
4	Aluminium	201	270	83	34	5	28	370	900	10 360	337,86
5	Aluminium	92	89,5	28,1	9	4	107	106	1 125	11 342	95,49
6	Fonte spéciale	317,27	458	139	20	5	12	1 310	2 925	15 720	1 066,25

TUN temps unitaire normalisé.

Tableau 5 – Précision des différentes FEC obtenues

Paramètres descripteurs		Régression linéaire (%)	Régression polynomiale (%)
Hauteur du piston	Taux d'erreur moyen	14,37	13,11
	Taux d'erreur entre $\pm 20\%$	69,23	40,95
	Erreur maximale	52,65	76,92
Diamètre et hauteur du piston	Taux d'erreur moyen	13,51	18,99
	Taux d'erreur entre $\pm 20\%$	76,92	69,23
	Erreur maximale	37,60	56,53

Meilleurs résultats pour la régression.

Tableau 6 – Liste des FEC possibles et intervalles de confiance des coefficients

Régression (1)	Erreur type entre valeurs réelles et valeurs prédites (ch)	Intervalle de confiance avec un risque de 5 % pour les coefficients $b$	Coefficient de corrélation $r^2$
TUN = 0,12 diam + 1,47 haut – 67,87	23,40	$-0,57 \leq b_{\text{diam}} = 0,12 \leq 0,81$ $1,07 \leq b_{\text{haut}} = 1,47 \leq 1,88$ $-98,23 \leq b_0 = -67,87 \leq -35,53$	0,9925
TUN = 0,001 haut <sup>2</sup> + 1,47 haut – 57,18	23,45	$-0,0006 \leq b_{\text{haut}}^2 = 0,0001 \leq 0,0008$ $0,975 \leq b_{\text{haut}} = 1,47 \leq 1,96$ $-113,38 \leq b_0 = -57,18 \leq -0,89$	0,9925
TUN = 1,54 haut – 64,53	22,47	$1,45 \leq b_{\text{haut}} = 1,54 \leq 1,62$ $-88,59 \leq b_0 = -64,53 \leq -64,53$	0,9924

(1) TUN en ch  
diamètre (diam) et hauteur (haut) en mm.

On constate sur le tableau 6 que seule la dernière régression ne présente pas de coefficient dont l'intervalle de confiance se situe de part et d'autre de 0. C'est par conséquent la FEC qui sera la plus fiable en terme de résultat même si les résultats obtenus à partir de l'échantillon ne semblent pas les meilleurs en termes d'erreur moyenne, de taux d'erreurs entre  $\pm 20\%$  et d'erreur maximale (tableau 5).

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la méthode paramétrique est toujours très utile pour estimer très rapidement le coût d'un produit ou d'un projet. Elle est également très simple à mettre en œuvre. Toutefois, elle ne permet pas de résoudre de manière satisfaisante les cas particuliers. On retrouve ces résultats en notant à la fois l'importance des erreurs maximales et des pourcentages d'erreurs compris entre  $\pm 20\%$  relativement faibles (respectivement 52,65 % et 69,23 % dans le meilleur des cas).

- le nombre de mise en position ;
- le nombre de surfaces finies.

Le logiciel fournit en résultat les coûts prévisionnels des matériaux, de la préparation et de l'usinage. Un tel système permet d'effectuer une estimation très rapidement. On peut néanmoins regretter le manque de transparence des résultats. Certains éléments sont expliqués dans [4].

Les résultats obtenus avec le logiciel DFM pour la figure 4 sont :

- matière : 0,92 dollar ;
- réglages : 2,07 dollars ;
- coût non productif (montage des pièces, approche d'outils...) : 1,65 dollar ;
- usinage : 0,69 dollar ;

ce qui donne un coût total de 5,33 dollars.

### 5.1.5 Application 2

DFM (*Design For Manufacturing*) est un logiciel américain d'estimation de coût proposant plusieurs modules d'estimation :

- le module usinage ;
- le module fonderie en moule permanent ;
- le module métaux en feuilles (découpe-emboutissage)...

Le module usinage comprend un outil d'estimation paramétrique utilisant les informations :

- la nature des matériaux ;
- le type de brut et les dimensions ;
- le choix de la catégorie de forme de la pièce (cylindrique, cylindrique avec caractéristiques secondaires, prismatique...) ;

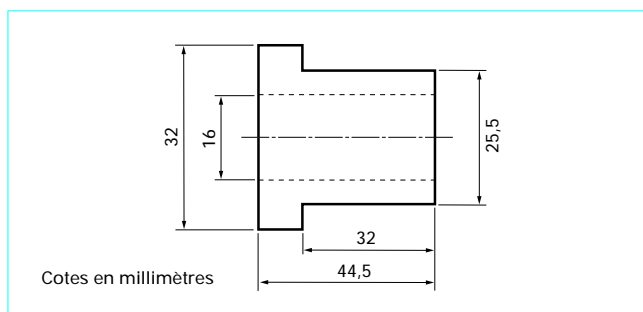


Figure 4 – Pièce utilisée pour l'exemple

## 5.2 Méthode analogique

Dans son principe, la méthode analogique consiste à prédéterminer le coût d'un projet par comparaison avec des projets passés.

La méthode analogique est une solution de chiffrage rapide qui cherche à exploiter de manière optimale l'expérience acquise sur les affaires réalisées. Le projet étudié peut être aussi bien un produit complexe, tel qu'un système mécanique commandé, qu'une « simple » pièce de mécanique générale.

Dans le cas de projets similaires, on réalise au préalable une décomposition par fonction et on recherche des similitudes au niveau de la décomposition des fonctions. Pour ce qui concerne les pièces de mécanique générale, la méthode analogique est basée sur le principe que le coût de fabrication des pièces évolue en fonction de critères morphodimensionnels et technologiques.

La méthode analogique se déroule en quatre étapes majeures :

- *l'analyse du projet ou du produit* : ce travail consiste à retrouver les paramètres importants qui permettront de décrire la pièce en vue de la recherche de similitude ;
- *la description du projet* : on traduit les paramètres relevés à l'étape précédente dans le langage de description. Dans le cadre de la technologie de groupe par exemple, cela revient à coder la pièce ;
- *la recherche de projets ou produits similaires* : une fois la description du projet ou du produit terminée, on recherche alors des expériences passées similaires. Ce travail très fastidieux est généralement réalisé par ordinateur. Cette recherche peut se faire dans certains cas par l'exécution d'une simple requête SQL (*Standard Query Language*) au travers d'une base de données. Dans d'autres cas, la recherche peut se faire au travers d'un arbre d'indexation ;
- *la comparaison et le chiffrage* : une fois que l'on a trouvé des produits ou projets similaires, il devient alors possible de chiffrer le coût d'un produit à partir des comparaisons sur les ressemblances et les différences.

Il existe de nombreux systèmes de chiffrages basés sur le principe de la méthode analogique. Parmi ces systèmes, on trouve bien sûr des systèmes basés sur la technologie de groupe (TG). Ce concept a été développé par Mitrofanov en 1956 après avoir analysé les moyens et les méthodes de fabrication des pièces en fonction de leur forme géométrique, de l'équipement et de l'outillage nécessaire à l'usinage. Cette classification a permis de minimiser les temps de réglage.

Le principe de la technologie de groupe a été généralisé par Opitz afin de pouvoir l'appliquer à tous les stades de l'industrialisation d'une pièce. Par la suite, des variantes du code Opitz ont vu le jour afin de personnaliser les codes et de les adapter parfaitement à l'entreprise.

Dans les années 1970, le CETIM a joué un rôle actif pour sensibiliser l'industrie mécanique française aux possibilités de la technologie de groupe. Il a ainsi développé son propre code : CETIM PMG. L'application de la TG n'est pas réservée au chiffrage des devis. On trouve également cette technologie à toutes les fonctions du processus de réalisation du produit :

- la conception : apport d'une aide aux concepteurs lui permettant d'exploiter au mieux l'expérience de l'entreprise ;
- la préparation à la fabrication : utilisation de gammes types permettant d'obtenir des solutions de gammes plus rationnelles et générées plus rapidement ;
- la fabrication : réorganisation des moyens de production en îlots de fabrication (réduction des en-cours, et raccourcissement des délais de fabrication, ...);
- le commercial : réduction du calcul des temps de fabrication et des devis.

Toutefois, la technologie de groupe ne prend pas en compte la structure de la pièce. Le raisonnement à partir de cas (expériences passées), technique récente issue de l'intelligence artificielle, permet la mise en œuvre de la méthode analogique. Cette méthode est proche des systèmes de technologie de groupe assistée par ordinateur (TGAO) ; cependant, elle s'en différencie par bien des aspects :

- l'absence d'utilisation de gammes types et donc de mise en œuvre importante et lourde ;
- la recherche de cas similaires en deux étapes : extraction et sélection. La phase de sélection qui consiste à effectuer un classement des pièces de la plus proche à la plus éloignée est une opération inexistante dans les systèmes de TGAO. À ce niveau, on effectue une recherche beaucoup plus précise que dans le cas d'une recherche par codification prenant en compte la structure de la pièce ;
- l'existence d'une phase d'adaptation : cette étape utilise différentes méthodes (analytique, paramétrique...) et des cas concrets ;
- l'existence d'une phase d'apprentissage qui est plus systématique que celle d'un système de TGAO.

### 5.2.1 Méthode basée sur le raisonnement à partir de cas

#### 5.2.1.1 Principe et processus

Le raisonnement à partir de cas est une méthode utilisant les solutions d'expériences passées (les cas) pour résoudre un problème. Ce mode de raisonnement met en jeu les opérations de base suivantes : la reconnaissance du problème, la remémoration d'expériences similaires et de leurs solutions, le choix et l'adaptation d'une des solutions (cas source) au nouveau problème (cas cible), l'évaluation de la nouvelle situation et l'apprentissage du problème résolu.

Des études menées en psychologie cognitive permettent de justifier l'intérêt du raisonnement à partir de cas. En effet, on constate que la plupart des personnes améliorent leur capacité à résoudre des problèmes par leur expérience.

Le raisonnement à partir de cas suit les étapes élémentaires suivantes proposées par Slade [20] :

- extraire les candidats pertinents à partir des caractéristiques de nouveaux cas ;
- sélectionner le ou les meilleurs cas de la sélection précédente à l'aide d'une mesure de similarité ;
- modifier, adapter les cas à partir de la sélection afin de proposer une solution ou une interprétation pour le nouveau cas ;
- tester la solution proposée, évaluer la solution ;
- réaliser l'apprentissage en enregistrant les nouveaux cas et mettant à jour l'indexation des cas.

Dans certains cas, les deux premières étapes sont regroupées pour n'en former qu'une seule. On obtient alors le schéma illustré sur la figure 5.

On peut en déduire les points importants de ce mode de raisonnement :

- repérer les cas dans la mémoire est un des éléments essentiels du raisonnement à partir de cas. Cela nécessite une attention particulière sur la méthode d'indexation et les mesures de similarité ;
- adapter les cas en vue de proposer une solution ou une interprétation. Dans certains systèmes, la tâche d'adaptation n'est pas toujours utile.

#### 5.2.1.2 Principe général de construction d'un arbre d'indexation

L'arbre d'indexation permet de contraindre l'espace de recherche afin de retrouver très rapidement un ensemble de cas susceptibles de fournir une solution au problème traité. Le moteur d'induction utilisé pour réaliser l'indexation fait appel aux techniques d'apprentissage inductif à partir d'exemples.

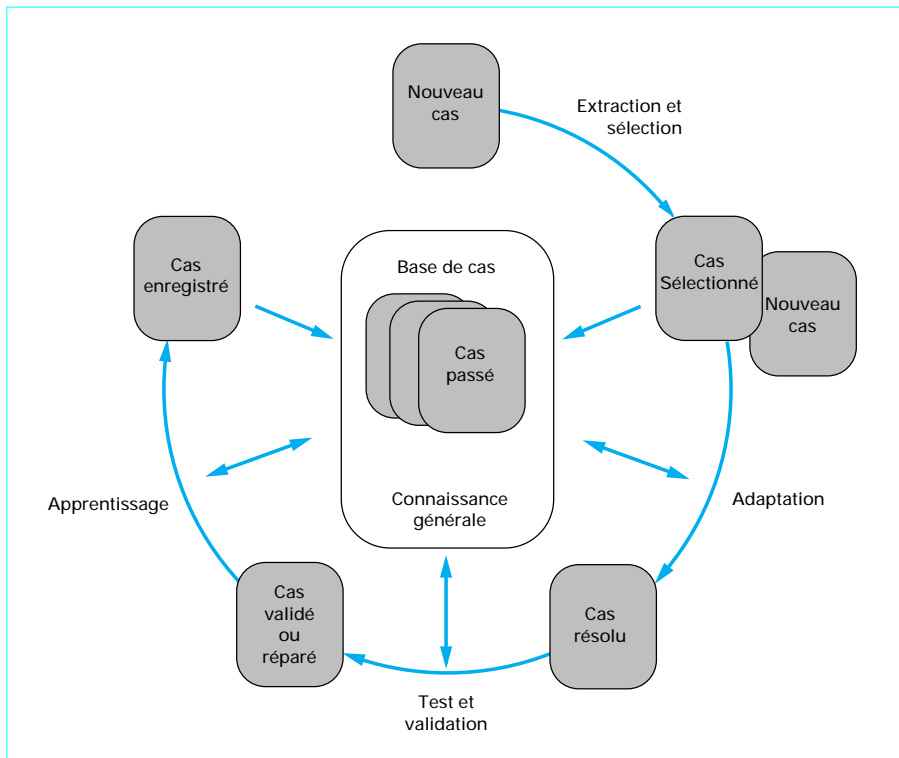


Figure 5 – Processus du raisonnement à partir de cas

Afin de réaliser la partition de l'ensemble des cas, on détermine, à chaque étape du processus de partitionnement, le descripteur à tester pour créer les sous-ensembles suivants. Pour cela, on choisit le paramètre dont le pouvoir discriminant est le plus élevé afin de répartir les cas de la population en différentes classes.

Lorsque l'on utilise un concept symbolique, le calcul du pouvoir discriminant se base sur une mesure d'entropie visant à optimiser le gain d'information [21].

Si on dispose d'un concept numérique, il n'est plus possible de déterminer l'entropie de Shannon dans la mesure où les valeurs du concept peuvent être en quantité infinie. Le critère de discrimination utilisé devient alors la variance des partitionnements. Les arbres obtenus par cette méthode sont des arbres de régression.

L'arbre d'indexation, outre son utilité en phase d'extraction du raisonnement à partir de cas, permet de découvrir un certain nombre de connaissances de la base. En effet, il met en évidence les paramètres importants, détermine les seuils de valeur pour les paramètres numériques. Toutefois, il est nécessaire de disposer d'une base de cas « propre » et représentative du domaine étudié.

Pour plus d'informations sur la construction des arbres d'indexation, on peut se reporter à l'ouvrage de Riesbek et Shank [22].

### 5.2.1.3 Mesure de similarité

Il existe un nombre important de mesures de similarité toutes très différentes et répondant à des exigences particulières. La plupart des développements d'applications basées sur le raisonnement à partir de cas nécessitent le développement d'une mesure spécifique. On en recense de nombreuses dans la littérature [23] [24] [25] ...

En raisonnant à partir de cas, les similarités numériques ont pour objet de quantifier les ressemblances qui existent entre deux ou plusieurs objets ou structures. Lorsque les **objets ne sont pas décrits à l'aide d'attributs (paramètres descripteurs) de type relationnel**, on

fait généralement appel aux mesures classiques de l'analyse de données. Dans ce cas, la forme la plus générale de la mesure de similarité est la suivante :

$$Sim_{globale}(X_1, X_2) = \frac{\sum_j p_j \times Sim_j(X_1, X_2)}{\sum_j p_j}$$

avec  $p_j$  pondération de l'attribut  $j$ ,  
 $Sim_j$  fonction de similarité de l'attribut  $j$ .

En ce qui concerne la mesure de similarité des attributs, lorsque ce dernier est de type numérique, on fait le plus souvent appel à la mesure de Minkowski définie par la relation suivante :

$$d(X_1, X_2) = \left[ \sum_{j=1}^n (X_1^j - X_2^j)^{1/\lambda} \right]^\lambda$$

avec  $\lambda$  coefficient supérieur ou égal à 1,  
 $X_1^j$  et  $X_2^j$  valeurs du  $j^e$  attribut des objets 1 et 2.

Dans certains cas, on pondère chaque variable par l'inverse de sa variance permettant ainsi de diminuer l'effet de taille. On peut également pondérer par l'écart maximal transformant la mesure de distance en indice de similarité.

Lorsque les attributs sont de type symbolique, la mesure de similarité s'effectue généralement à partir d'une matrice de similarité prédéfinie comme on peut le voir ci-après :

Nuance	AU 4G	FT 26	FT 30
AU 4G	1	0	0,75
FT 26	0	1	0
FT 30	0	0,75	1

S'il y a présence d'**attributs relationnels**, la mise en œuvre d'une mesure de similarité est plus complexe. Il n'est plus possible de se contenter des mesures classiques. On trouve de nombreux exemples de mesures de ce type dans la littérature [23] [24].

Comme pour l'indexation, la définition d'une mesure de similarité reste dans la plupart des cas à l'initiative de l'utilisateur. Celle-ci peut être définie de manière empirique. Parfois, elle peut être le reflet du degré de certitude que l'on a sur la valeur de l'attribut ainsi défini ou sur son degré d'importance dans la similarité.

### 5.2.2 Avantages et inconvénients

Comme pour la méthode paramétrique, le raisonnement à partir de cas présente la faculté de proposer très rapidement une solution. En outre, elle fonctionne de manière transparente. En effet, à tout moment, l'utilisateur est en mesure de connaître l'origine de la solution et éventuellement de corriger le résultat.

Il est également important de noter la possibilité de raisonnement sur des données inconnues à partir de cas à prendre en compte. La recherche s'effectue alors sur les paramètres connus et le système propose diverses solutions avec des valeurs pour les données inconnues.

De plus, en se basant sur le cas le plus proche pour estimer le coût d'une pièce ou d'un produit, le raisonnement à partir de cas est en mesure de résoudre les cas particuliers déjà rencontrés. Il est également en mesure d'éviter les erreurs déjà commises.

Enfin, le raisonnement à partir de cas joue le rôle de mémoire collective de l'entreprise permettant à l'utilisateur de faire appel à des solutions élaborées par d'autres personnes de l'entreprise.

En revanche, il est difficile de connaître les tendances générales. Pour cela, l'utilisateur n'a pas d'autre possibilité que de faire plusieurs essais successifs et de comparer l'évolution des résultats.

De plus, la diffusion dans l'entreprise d'une méthode d'estimation basée sur le raisonnement à partir de cas est moins aisée que dans le cas de la méthode paramétrique. En effet, il est nécessaire de fournir en même temps la base de cas, l'indexation des cas, la mesure de similarité et les fonctions d'adaptation.

## 5.3 Application à l'estimation du coût des pistons

Reprenons l'exemple 1 de la méthode paramétrique (§ 5.1.4).

### 5.3.1 Définition des cas

Un cas se décompose en deux parties : le problème et la solution. À partir des données dont on dispose, la description des cas a pu se faire de la façon suivante :

#### Description du problème

	taxonomie	
— matière	réel	[0, ∞]
— diamètre du piston	réel	[0, ∞]
— hauteur du piston	réel	[0, ∞]
— diamètre de l'alésage	réel	[0, ∞]
— nombre de gorges	entier	[0, ∞]
— nombre de perçages	entier	[0, ∞]
— quantité	entier	[0, ∞]

#### Description de la solution

— temps de la série	entier	[0, ∞]
— temps de réglage	entier	[0, ∞]
— temps unitaire	entier	[0, ∞]

La figure 6 donne un exemple de description de cas.

Les dimensions sont en millimètres  
Les temps sont en centièmes d'heure

Figure 6 – Exemple de description d'un cas

De même si le concepteur ne connaît pas la nuance de la fonte du piston, il lui suffira alors d'indiquer qu'il recherche des cas en fonte et la recherche se fera d'abord sur tous les cas en fonte quelle que soit la nuance.

### 5.3.2 Détermination de l'indexation, de la similarité et de l'adaptation

Pour effectuer l'**indexation de la base de cas**, nous avons utilisé la méthode du gain d'information.

En ce qui concerne la **mesure de similarité**, celle-ci évalue une moyenne pondérée des similarités sur chacun des descripteurs. La détermination de la pondération d'une mesure de similarité est un problème difficile. Celle-ci est souvent définie expérimentalement.

Pour l'**adaptation**, nous avons cherché une fonction simple et représentative de la méthode de travail des estimateurs. En effet, ceux-ci utilisent généralement des règles très simples pour évaluer divers temps. Par exemple, les temps d'usinage en ébauche sont proportionnels au volume de copeaux usinés. Après plusieurs essais, nous avons pu établir la relation suivante :

$$TUN(cible) = \sqrt{\frac{diamètre(cible) \times hauteur(cible)}{diamètre(source) \times hauteur(source)}} \times TUN(source)$$

Bien sûr, nous avons pu utiliser cette relation parce que nous savions que les phases d'extraction et de sélection nous fourniraient des cas de même matière que le cas cible.

### 5.3.3 Examen des résultats

La figure 7 présente un extrait du résultat de l'indexation des cas.



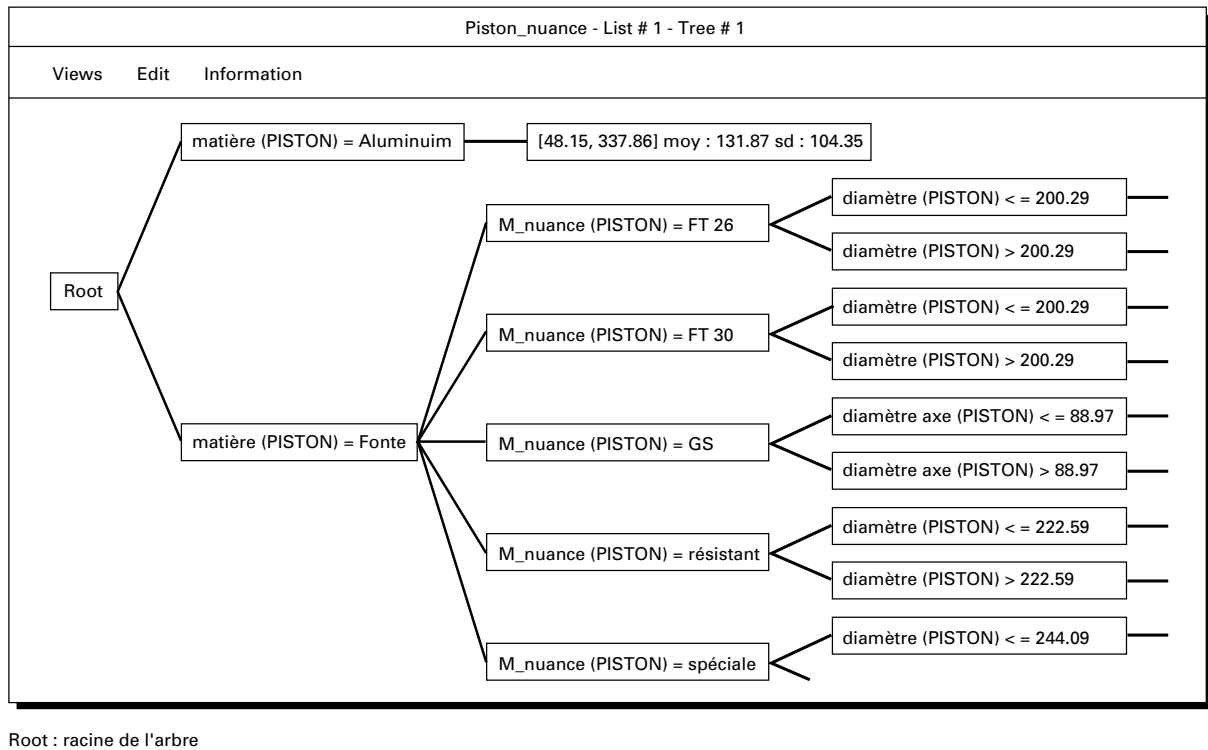


Figure 7 – Extrait du résultat de l'indexation des cas

Nous avons testé cette méthode en utilisant les mêmes cas que pour la méthode paramétrique. Nous avons donc recherché les quatre cas de la base les plus proches du cas considéré auxquels nous avons appliqué la règle d'adaptation établie précédemment. En considérant que le concepteur est en mesure de donner son avis sur le meilleur cas à utiliser pour l'adaptation. Il utilise alors le système comme un outil d'aide à la décision. Il vérifie chacun des cas proposés et leurs solutions afin de sélectionner le cas le plus favorable. Dans cette configuration, on obtient les résultats suivants :

- erreur moyenne : 9,58 % ;
- erreur maximale : 33,57 % ;
- taux d'erreurs entre  $\pm 20$  % : 89,29 %.

Cette simulation sur une base de cas limitée apporte des résultats intéressants. Tout d'abord, on peut constater que le système ne se limite pas à donner la valeur du TUN mais fournit également l'origine complète de son calcul. Ainsi, l'utilisateur comprend mieux le résultat obtenu. De plus, l'utilisateur dispose de toutes les informations pour lesquelles il n'existe pas d'algorithme analytique tel que les temps de réglage ou même les informations concernant des difficultés particulières d'usinage (nécessité d'utiliser un type de machine, conditions de coupe faibles pour éviter les vibrations...).

L'utilisateur, à partir de la mesure de similarité entre les cas cible et sources, dispose d'une indication quant à la particularité du cas traité par rapport à ceux de la base de cas. Plus les distances entre cas source et cible sont importantes plus le cas cible est un cas particulier par rapport à la base de cas.

De plus, la mesure de similarité prend en compte tous les paramètres de description de la pièce. On peut donc considérer que la méthode basée sur le raisonnement à partir de cas utilise toutes les informations disponibles pour fournir un résultat.

## 5.4 Méthode analytique

### 5.4.1 Présentation de la méthode analytique

La méthode analytique est à la fois la plus ancienne, la plus classique et la plus répandue de toutes les méthodes d'estimation de coût.

Elle consiste à décomposer le processus de réalisation d'un produit en un ensemble de tâches élémentaires. Puis, on évalue le coût de chacune des tâches (figure 8).

Par exemple, dans le cas de l'estimation du coût de fabrication d'une pièce mécanique, la décomposition du travail consiste à décrire la gamme d'usinage. Les opérations peuvent être regroupées en sous-phases (ensemble d'opérations effectuées sans remise en position de la pièce) et en phases (ensemble d'opérations effectuées sans changement de machine). Opération par opération, on calcule alors le temps estimé d'usinage après avoir recherché les conditions de coupe. Ces conditions de coupe peuvent être optimisées grâce à des modèles comme celui de Taylor (cf. § 2.2.3).

On estime les temps série (temps de réglage et de changement d'outils, temps de positionnement de la pièce dans son montage...). Cette estimation peut se faire en additionnant des temps élémentaires ou en prenant des temps forfaitaires. Dans ces deux cas, ces temps peuvent être modulés pour prendre en compte l'effet de série de pièces (dextérité qu'acquiert l'opérateur au fur et à mesure de la réalisation d'une série de pièces) grâce aux courbes d'apprentissage.

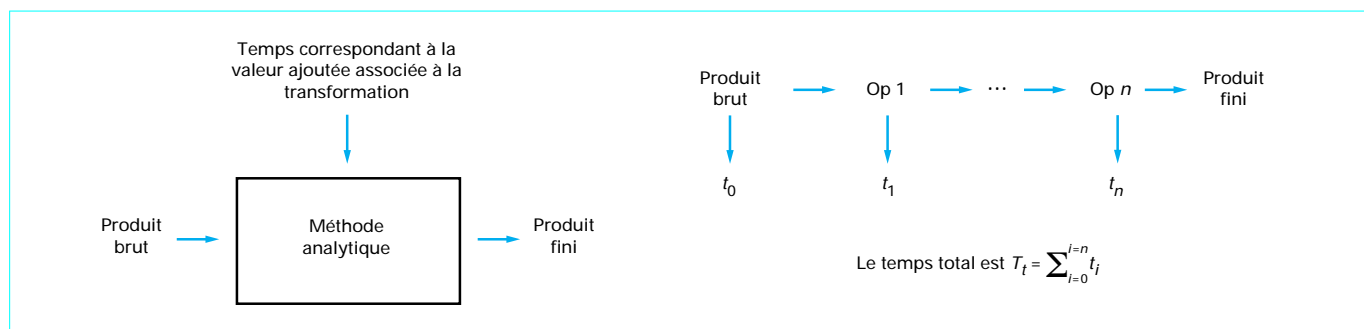


Figure 8 – Description de la méthode analytique

### 5.4.2 Architecture générale et mise en œuvre

L'architecture générale des systèmes permettant la mise en œuvre de la méthode analytique comprend toujours une base de données regroupant les informations suivantes :

- matières :
  - groupe,
  - sous-groupe,
  - nuance traitement thermique,
  - classe d'usinabilité ;
- machines :
  - type,
  - désignation,
  - taux horaire,
  - différents temps (temps de changement d'outils, temps de réglage...) ;
- équipements ;
- données de coupe.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la méthode analytique évalue le temps de fabrication d'un produit grâce à la décomposition en un ensemble d'opérations du processus d'usinage qui transforme le produit brut en produit fini. Cette décomposition et la détermination des temps et des coûts peut être effectuée manuellement ou à l'aide d'un système informatique.

Dans le deuxième cas, il existe plusieurs types d'outils :

- *les outils métiers d'aide à l'édition des devis*. Il s'agit de système permettant, par exemple, l'édition de gamme d'usinage et la détermination automatique des conditions de coupe économiques. On peut citer parmi ces produits le logiciel Devigam du CETIM ;
- *les systèmes experts* qui permettent grâce à la capitalisation du savoir-faire sous forme de modèles économiques de s'adapter à différents métiers. Les chiffreurs ont alors à leur disposition un système sophistiqué permettant de gérer des règles et des restrictions. L'utilisateur peut à tout moment accéder aux formules, aux bases de données connectées et à toutes les règles gérant le savoir-faire de l'entreprise. Parmi les systèmes experts dédiés à l'estimation de coût, on peut citer le logiciel Cost Advantage de la société Cognition [27].

### 5.4.3 Avantages et inconvénients

La précision de la méthode analytique dépend évidemment du degré de décomposition du processus de fabrication et de la pertinence de ses estimations. Dans certains cas, la méthode analytique présente donc l'avantage d'être très précise. En effet, elle rend parfaitement compte de l'estimation des temps et des coûts pour un produit donné et un processus de fabrication précis et déterminé. La méthode analytique est donc fréquemment utilisée juste avant l'étape de production afin d'optimiser le processus de fabrication (par exemple optimisation des conditions de coupe...).

De plus, il s'agit d'une méthode classique. Elle est donc parfaitement naturelle pour l'estimateur et présente dans le cas des systèmes experts, un intérêt pédagogique grâce à l'explication de la solution.

Toutefois, la mise en œuvre de la méthode analytique n'est pas toujours évidente. En effet, la capitalisation du savoir-faire représente un investissement important. De plus, certains systèmes nécessitent des informations très détaillées sur le produit et le process, ce qui engendre :

- un temps d'exploitation plus important que pour les autres méthodes ;
- la nécessité de connaître le métier de la production ;
- la nécessité de pouvoir définir complètement le produit et le process.

### 5.4.4 Application

L'exemple présenté a été réalisé en utilisant un logiciel d'estimation de coût utilisant la méthode analytique. Il s'agit de Devigam. La pièce estimée est identique à celle de l'exemple 2 illustrant la méthode paramétrique (§ 5.1.5).

#### Pièce : pièce mécanique

matière : E 24  
 date de création : 3-12-1998  
 nombre de pièces : 50  
 n° plan : 1  
 date de mise à jour : 3-12-1998  
 brut : Barre ronde  
 diamètre : 35,00 mm  
 longueur : 50,00 mm

#### Libellé de la phase : Scie alternative

1 libellé du poste : SCIE KASTO  
 numéro du poste : SC1

Total	Charge (h)	TMR (ch)	TU (ch)	Matière (F)	Coût (F)
pièce	0,03	14,06	2,26		2,54
série	1,27	14,06	113,05		127,11

TU temps unitaire.

TMR temps de mise en route.

#### Libellé de la phase : Tour parallèle

2 libellé du poste : TOUR  
 numéro du poste : PT1

Sous-phase 1 Tournage	TMR (ch)	TU (ch)	Coût (F)
Temps complémentaire sous-phase	20,00	3,40	7,6
1 Dressage	0,00	0,58	1,2
2 Chariotage	0,00	1,43	2,9
3 Perçage axial	0,00	0,74	1,5
4 Tronçonnage	0,00	0,75	1,5

Total	Charge (h)	TMR (ch)	TU (ch)	Matière (F)	Coût (F)
pièce	0,07	20,00	6,90		14,70
série	3,65	20,00	344,94		729,88
Total pièce	0,10	34,06	9,16	6,81	17,14
Phases série	4,92	34,06	457,99	340,52	856,98

## 6. Conclusion

Au cours de cet article, nous avons montré l'importance et la complexité de l'estimation de coût au sein de l'entreprise. Puis, nous avons identifié les différentes composantes du prix de revient. Enfin, nous avons présenté les différentes méthodes d'estimation illustrées d'exemples. Il est important de retenir que le choix d'une méthode d'estimation dépend de plusieurs paramètres :

- l'étape du cycle de vie du produit (préétude, conception, production...);
- les données disponibles ;
- les délais accordés pour réaliser le chiffrage ;
- la précision exigée ;
- le type d'élément dont on veut estimer le coût...

On a pu constater également que pour toutes les méthodes d'estimation (analogique, paramétrique et analytique), il est nécessaire de constituer une base de données ou de connaissances technico-économique fiable. En effet, il est très important de noter que la plupart des estimations sont réalisées par extrapolation du passé. De plus, les résultats obtenus pour un chiffrage ne pourront jamais être de meilleure qualité que les données utilisées au cours de l'estimation.

## Références bibliographiques

- [1] MILLER (F.W.). – *Design for Assembly : Ford's better idea to improve products*. Manufacturing System, mars 1988.
- [2] VACOSSIN (B.). – *Rapport interne projet Metacost*, 1993.
- [3] CHAUVET (A.). – *Documents séminaire méthodes de conception*. Salon CAO/CFAO, 1993.
- [4] BOOTHROYD (G.). – *Estimate cost at an early stage*. Annals of CIRP, 1988.
- [5] TICHKIEWITCH (S.). – *Optimisation des structures avec contraintes technologiques, un exemple : la CAO de pièces estampées*. Thèse d'habilitation, Paris, 6 juin 1989.
- [6] AFNOR. – *Précis de construction mécanique*. Tome 2 Méthodes, fabrication et normalisation, 1985.
- [7] ANSELMETTI (B.). – *Génération automatique de devis pour l'usinage sur MOCN*. Revue d'automatique et de productique appliquée, vol. 8, n° 1, 1995, p. 81-100.
- [8] *Manuel de données technologiques en fraisage*, CETIM, 1984.
- [9] PADILLA (P.), ANSELMETTI (B.), MATHIEU (L.) et RABOYEAU (M.). – *Production mécanique - Fabrication générale*. Collection génie mécanique, Dunod, 1986.
- [10] PALLOT (B.). – *Prédétermination des temps d'usinage relatifs aux séries limitées - Application au tournage numérique*. Thèse ENSAM Paris, 20 déc. 1988.
- [11] FOURASTIÉ (J.) et LASLIER (J.-F.). – *Probabilités et statistique*. Série J. Quinot Dunod.
- [12] BELLUT (S.). – *La compétitivité par la maîtrise des coûts*. AFNOR, 1991.
- [13] DE MOOR (D.). – Rapport interne projet Metacost BRITE EURAM.
- [14] VACOSSIN (B.). – *Présentation de DFM*. Journée devis du CETIM : les devis en fabrication mécanique, le 9 nov. 1994, CETIM Senlis.
- [15] BADIRU. – *Manufacturing cost estimation : a multivariate learning curve approach*. Journal of manufacturing systems, vol. 10, n° 6, p. 431-441, 1995.
- [16] *Parametric cost estimating handbook*. Department of defense United States of America, 1995.
- [17] FOUSSIER (P.). – *Cost +*, congrès AFAV, le 18-19 nov. 1998, p. 252-265.
- [18] LEBART (L.), MORINEAU (A.) et PIRON (M.). – *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. Dunod, 1995.
- [19] JIMÉNEZ (A.). – *Les devis en fabrication mécanique, méthodes et outils informatiques pour la détermination des temps*. Revue « Travail et méthodes », p. 15-25 et p. 20-24, n° 521 et 522, 1995.
- [20] SLADE (S.). – *Case based reasoning : a research paradigm*. AI magazine, vol. 12, n° 1, p. 42-55, 1991.
- [21] QUINLAN (J.R.). – *Learning efficient classification procedures and their application to chess end games*, Machine Learning 1 : An Artificial Intelligence Approach, Michalski (R.-S.), Carbonell (J.-G.), Mitchell (T.-M.) eds, Morgan Kaufmann, Los Altos, 1983.
- [22] RIESBEK (C.K.) et SHANK (R.C.). – *Inside Case Based Reasoning*. Hardcover, 1984.
- [23] DUVERLIE (P.). – *Étude et proposition d'une méthode d'estimation du coût de revient technique appliquée à la production mécanique et basée sur le raisonnement à partir de cas*. Thèse Université de Valenciennes, déc. 1996.
- [25] RICHTER (M.). – *Classification and learning of similarity measures*. Proceedings des Jahrestagung der Gesellschaft für Klassifikation, Optiz, Lausen, Klar, Verlag, 1992.
- [26] CONTIN (J.-C.) et GOMART (O.). – *Chiffrage du coût de revient de fabrication prévisionnel des lignes d'échappement chez ECIA*. Colloque AFITEP, 9 sept. 1998, Roubaix.

Dans les Techniques de l'Ingénieur

- [27] WEILL (R.D.). – *Conception des gammes d'usinage*. B 7 025. Traité Génie mécanique (8-1993).
- [28] PRUD'HOMME (G.). – *Commande numérique des machines-outils*. B 7 130. Traité Génie mécanique (2-1996).
- [29] GLADEL (G.), GOURDET (D.) et TOUS (J.-L.). – *Matériaux pour outils de coupe*. B 7 080. Traité Génie mécanique (5-1992).
- [30] LEROY (F.). – *Endommagement des outils de coupe*. B 7 042. Traité Génie mécanique (2-1993).