AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ
N° inv. 2002 0115
Cote S/MZ 02/04
Loc Magasin

Université de Metz

THESE

Présentée par

Fehmi H'Mida

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE METZ

Spécialité : Génie Industriel

Contribution à l'estimation des coûts en production mécanique : L'approche Entité Coût appliquée dans un contexte d'ingénierie intégrée

---

Date de soutenance : Le 20 Mars 2002

Composition du jury :

Jean Paul Kieffer	Professeur à l'ENSAM d'Aix-en-Provence	Président
Christian Tahon	Professeur à l'Université de Valenciennes	Rapporteur
François Villeneuve	Professeur à l'Université Joseph Fourier-Grenoble	Rapporteur
Pierre Padilla	Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz	
René Buffe	Manager Général de la société Cognition	
Hervé Lallemand	Chef Projet DEVIS au CETIM Senlis	
Patrick Martin	Professeur à l'ENSAM de Metz	Directeur de Thèse
François Vernadat	Professeur à l'Université de Metz	Directeur de Thèse

---

Thèse préparée au sein du Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique LGIPM
- Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz / Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers / Université de Metz -

A la mémoire de ma grand mère

A mon père et ma mère pour tous leurs sacrifices et leur amour

A ma sœur et meilleure amie Faten

Remerciements

Remercier, c'est le plaisir de se souvenir de tous ceux qui, par leurs encouragements, leur amitié, leur compétence ont su créer un cadre de recherche m'ayant permis de finaliser ma thèse.

Le présent travail a été effectué au sein du Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique (LGIPM) sous la co-direction de Monsieur Patrick Martin, Professeur à l'ENSAM de Metz et Monsieur François Vernadat, Professeur à l'Université de Metz. Qu'il me soit permis de les remercier pour le soutien et pour la confiance qu'ils m'ont accordé. Ils ont toujours été très ouvert aux idées que j'ai proposées et m'ont toujours encouragé à les développer. Je les remercie également pour leurs conseils ainsi que pour leurs apports.

A Monsieur le Professeur Pierre Padilla, directeur de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz, j'exprime ma profonde gratitude et mes vifs remerciements pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour les discussions fructueuses et enrichissantes qu'il m'a prodigué, ainsi que pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de siéger à mon jury de thèse.

A Messieurs C. Tahon, Professeur à l'Université de Valenciennes, et F. Villeneuve, Professeur à l'Université Joseph Fourier-Grenoble, vous m'avez fait le grand honneur d'accepter d'analyser ce mémoire et d'en être les rapporteurs, je vous prie de bien vouloir accepter l'expression de ma profonde reconnaissance.

A Monsieur le Professeur J. P. Kieffer, directeur de l' Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers d'Aix-en-Provence, j'exprime mes vifs remerciements pour avoir accepter de juger ce travail et de présider ce jury de thèse.

A Messieurs R. Buffe, Manager Général de la société Cognition, et H. Lallemand, Chef Projet DEVIS au CETIM, qui ont accepté de nous faire part de l'avis de professionnelles, j'exprime mes vifs remerciements.

J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler dans notre laboratoire de recherche LGIPM (équipes IFAB-AGIP). Je le dois aussi aux très bonnes relations établies avec tous les membres et aux amitiés qui en sont nées. Que soient remerciés en particulier N. Rezg, D. Roy, L. Ben Yousef, D. Mihalaki, F. Munerato, D. Anxiaux, B. Finel, O. Boment, J.Y. Dantan, A. Siadat, ...

A Madame Cathy Jung, il m'est agréable de lui témoigner toute ma gratitude pour sa gentillesse et sa sympathie.

Je tiens enfin à remercier mes amis L. Ben Hassine, Z. Achour, C. Visa pour leur soutien et leur amtié.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

DE LA MESURE AU MANAGEMENT DES COÛTS 7

1.1 Le système de coûts 9
1.1.1 Définition 9
1.1.2 Typologie des coûts 11
1.1.3 Typologie des systèmes de coûts 13
1.1.3.1 Le système de coût complet 13
1.1.3.2 Le système de coût partiel 14
1.1.3.3 Conclusion 14

1.2 Fonctions stratégiques de performance économique : la conception, le devis 15
1.2.1 Le rôle économique de la Conception 16
1.2.2 Le rôle stratégique du devis 17

1.3 La mesure des coûts dans l'approche traditionnelle 21
1.3.1 L'estimation de coûts en conception 21
1.3.1.1 En phase conceptuelle 22
1.3.1.2 En phase préliminaire 23
1.3.1.3 En phase détaillée 28
1.3.1.4 Conclusion 29
1.3.2 L'estimation de coûts en devis 30
1.3.3. Conclusion 32

1.4 Impact de l'évolution Produit / Production / Environnement sur les systèmes de coûts .. 33
1.4.1 Une réponse au modèle de standardisation : les sections homogènes 35
1.4.2 Une réponse à la variété des produits et des méthodes de production : l'activité et l'inducteur 36
1.4.3 Une réponse à l'instabilité de l'environnement de l'entreprise : le Processus 37

1.5 Le management des coûts dans l'approche concourante 38
1.5.1 Méthodologies d'estimation des coûts en conception 38
1.5.1.1 Processus d'estimation des coûts orientée processus 39
1.5.1.2 Processus d'estimation des coûts orientée client 41
1.5.2 L'évolution de la fonction Devis 45

1.6 Conclusion 47

LE CADRE D'ESTIMATION DES COÛTS : OBJECTIFS, CONCEPTS ET PRINCIPES DE BASE 49

2.1 Introduction 49

2.2 Objectifs de l'approche 50
2.2.1 L'intégration de l'estimation des coûts 50
2.2.2 Capitalisation des connaissances relatives à l'estimation des coûts 51
2.2.3 La diversité des objets de coût 52
2.2.4 Minimiser la répartition des coûts indirects 53

2.3 Concept de base de l'approche : L'Entité Coût (EC) 55

2.4 Limitation du concept d'Entité Coût 61

2.5 Notre approche relativement aux méthodes actuelles 61
2.5.1 Relativement à la méthode des centres d'analyse 61
2.5.2 Relativement à la méthode de comptabilité par activités (ABC) 62

2.6 La démarche de la méthode d'estimation des coûts 63

2.7 Conclusion 64

ESTIMATION DES COÛTS : MODÉLISATION DES CONNAISSANCES 67

3.1 Introduction 67

3.2 Le Modèle Produit 69
3.2.1 L'intégration autour des entités 70
3.2.2 Définition de l'Entité de fabrication 73
3.2.3 Définition de l'opération 80
3.2.4 Définition des variables 82

3.3 Le Modèle Costgrammes 85
3.3.1 Identification des Entités Coût 86
3.3.2 Identification des inducteurs 92

3.4 Le passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes 94

ESTIMATION DES COÛTS : MODÉLISATION DES RAISONNEMENTS 99

4.1 Introduction 99

4.2 Les principes retenus 101

4.3 Entité de fabrication et estimation des coûts du processus de fabrication associé 106
4.3.1 Approches d'estimation des coûts d'une entité de fabrication 109
4.3.2 Construction du raisonnement d'estimation des coûts d'une entité de fabrication ... 116
4.3.3 Conclusion 121

4.4 Produit et estimation des coûts des processus de production alternatifs 121
4.4.1 L'estimation des coûts de production : un problème de satisfaction de contraintes . 124
4.4.2 Les problèmes de satisfaction de contraintes 126
4.4.2.1 Notion de contrainte 126
4.4.2.2 Propriétés du CSP 128
4.4.2.3 Environnements de programmation par contraintes 129
4.4.2.4 Résolution d'un problème CSP 130
4.4.3 Modélisation de l'estimation des coûts de production 133
4.4.3.1 Contrainte de coût 138
4.4.3.2 Contraintes de fabrication 139
4.4.3.3 Contraintes de production 145
4.4.4 Génération des inducteurs 147
4.4.4.1 Fonctions inducteurs des Entités Coût concourantes 149
4.4.4.2 Estimation du coût unitaire du produit 151
4.4.4.3 Estimation du coût d'une entité de fabrication 152
4.4.5 Conclusion 154

4.5 Une méthodologie de décision intégrée 155
4.5.1 En conception préliminaire 158
4.5.2 En conception détaillée 159
4.5.3 En devis 160

4.6 Conclusion 162

MAQUETTE DE VALIDATION : APPLICATION À LA PIÈCE TERMOZ 165

5.1 Introduction 165

5.2 Spécification du problème à résoudre 168
5.2.1 La pièce Termoz 168
5.2.2 L'atelier de production 171

5.3 Conception du Modèle Produit – Costgrammes 174

5.4 Génération du coût des opérations de fabrication et activation des contraintes 183

5.5 Génération du coût des processus de production alternatifs 187

5.6. Choix d'un processus de production et estimation des Entités Coût concourantes 189

5.7. Conclusion 190

CONCLUSION GÉNÉRALE 193

GLOSSAIRE 199

BIBLIOGRAPHIE 205

ANNEXE: La Méthode UVA 215

Table des Figures

Figure 1. Elaboration et négociation d'un devis 3
Figure 2. Flux d'information typique dans un processus de développement de produit 8
Figure 3. Flux d'information intégré dans un processus de développement de produit 8
Figure 4. Caractéristiques des coûts 11
Figure 5. Coûts directs et coûts indirects 12
Figure 6. coûts fixes 12
Figure 7. coûts variables 12
Figure 8. Coûts et systèmes de coûts 13
Figure 9. Coûts directs/Coûts induits des fonctions 17
Figure 10. Cycle de vie d'un produit 17
Figure 11. La courbe Freiman [Daschbach et Apgar, 1988] 18
Figure 12. Courbe de fidélité 19
Figure 13. Courbe de justesse 20
Figure 14. Principe d'estimation des coûts d'un produit 21
Figure 15. Schématisation de la méthode paramétrique 23
Figure 16. La méthode paramétrique 24
Figure 17. Implantation de la méthode paramétrique 24
Figure 18. La méthode analogique 26
Figure 19. Processus du raisonnement à base de cas 27
Figure 20. Adéquation entre la phase de développement du produit et la méthode d'estimation 29
Figure 21. Ventilation des charges indirectes dans le cas d'une entreprise à produit unique 31
Figure 22. Ventilation des coûts indirectes dans le cas d'une entreprise à produits variés 32
Figure 23. Inversion de prépondérance entre coûts directs et coûts indirects [H'mida *et al.*, 2001a]. 32
Figure 24. Les changements dans l'entreprise [H'mida *et al.*, 2001c] 34
Figure 25. Les changements dans l'entreprise et les réponses correspondantes [H'mida *et al.*, 2001c] 34
Figure 26. Flux d'informations pour le management des coûts 38
Figure 27. Approche itérative d'estimation de coûts orientée processus 39
Figure 28. Classification des contraintes de fabrication [Feng et Kusiak, 1995] 40
Figure 29. Design For Manufacturing ans Assembly DFMA 41
Figure 30. Approche d'estimation de coûts itérative orientée client 42
Figure 31. La maison de la qualité selon QFD 44
Figure 32. Un cadre intégré de traitement de devis [Veeramani et Joshi, 1996]] 47
Figure 33. Mécanisme de capitalisation de connaissances d'estimation de coûts 52
Figure 34. Croissance des coûts indirects 53
Figure 35. Coûts affectables [H'mida *et al.*, 2001e] 53
Figure 36. Réduction des estimations des coûts indirects 54
Figure 37. Représentation de l'Entité Coût 55
Figure 38. Rôle des inducteurs d'activité et de ressources 57
Figure 39. Inducteur et unité d'œuvre [bouquin, 1997] 58
Figure 40. Exemple de modélisation par Entités Coût. 60
Figure 41. Association Produit / Entités de fabrication / Entités Coût 63
Figure 42. L'architecture CostAdvantage 68
Figure 43. Le Modèle Produit 70
Figure 44. Ambiguïté dans la reconnaissance d'entité [Mony, 1992] 71
Figure 45. Propriété d'appui d'une entité de fabrication 75
Figure 46. Les paramètres et les spécifications de l'entité de fabrication Trou Taraudé 76
Figure 47. Exemple de processus de fabrication 77
Figure 48. Une relation d'orientation de type perpendicularité entre deux faces 78
Figure 49. Exemples de relations topologiques 80
Figure 50. L'ensemble $\mathcal{T}$ des opérations potentielles de l'entité de fabrication Trou Taraudé 81
Figure 51. Le sous contexte opération de fabrication 82
Figure 52. Le Modèle Costgrammes 85
Figure 53. Les attributs d'une Entité Coût 87
Figure 54. Répartition des ressources liées au service entre les Entités Coût 87
Figure 55. Exemple de décomposition en entités d'une entreprise fictive 89
Figure 56. Plate-forme Entités Coût élémentaires 90
Figure 57. Les contextes et sous contextes Entités Coût 90

Figure 58. Processus d'Entités Coût 91
Figure 59. Construction des Processus 92
Figure 60. Identification des inducteurs 92
Figure 61. Inducteur de l'Entité Coût « opération de fabrication » 93
Figure 62. L'Entité Coût : un lien entre le Modèle Produit et le Modèle Costgrammes et un traitement commun du coût direct et indirect [H'mida *et al.*, 2001a] 94
Figure 63. Le Modèle Produit / Costgrammes 95
Figure 64. Logique de passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes 96
Figure 65. Exemples d'inducteurs d'Entités Coût du niveau 2 96
Figure 66. Plate-forme Entités Coût élémentaires 97
Figure 67. Extrait de l'expertise liée au Trou Taraudé 102
Figure 68. Schéma global de construction d'une estimation des coûts 105
Figure 69. Estimation en deux temps du coût d'un produit 106
Figure 70. L'estimation des coûts des entités : un vecteur d'intégration Etudes – Méthodes 106
Figure 71. Elargissement des coûts affectés aux entités de fabrication 108
Figure 72. Etape préparatoire de la TGAO, d'après [Villeneuve, 1994] 110
Figure 73. Etape productive de la TGAO, d'après [Villeneuve, 1994] 110
Figure 74. Principe général d'un Système Expert 112
Figure 75. Rappel des notions de base relatives à l'entité d'usinage 115
Figure 76. Une mise en parallèle avec la fonction élaboration gamme 116
Figure 77. Extrait de l'expertise liée au Trou Taraudé borgne 117
Figure 78. Entité Coût « opération d'usinage » 119
Figure 79. Les sous contextes opération de fabrication 120
Figure 80. Démarche de l'évaluation économique des décisions de conception 125
Figure 81. Exemple d'utilisation d'un sous ensemble flou [30, 60] modélisant une contrainte flexible 128
Figure 82. Nature d'un système de contraintes [Fischer 2000] 129
Figure 83. Exemple de filtrage (propagation de contraintes) sur des variables entières 131
Figure 84. Les algorithmes de recherche [Fischer 2000] 132
Figure 85. Entité Coût opération de fabrication 135
Figure 86. Entité Coût préparation machine 135
Figure 87. Entité Coût manutention 136
Figure 88. Les contraintes propres au modèle 138
Figure 89. L'ensemble flou associé à la contrainte flexible Coût 139
Figure 90. Exemple de relation géométrique : la perpendicularité entre *E1* et *E2* 142
Figure 91. Exemple de relation topologique : *E1* commence sur *E2* 143
Figure 92. Les contextes relations géométriques et topologiques 143
Figure 93. Règles de pose de contraintes associées à la relation « Parallélisme » 144
Figure 94. Règles de pose de contraintes associées à la relation « commence sur » 144
Figure 95. Le contexte CostAdvantage : Planifié / Matière / Entité de fabrication 145
Figure 96. Règle d'activation des contraintes de production relatives à 146
Figure 97. Une portion d'assemblage d'Entités Coût d'un processus de production 147
Figure 98. Le passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes 148
Figure 99. L'élargissement de l'analyse causale depuis la conception à la production 148
Figure 100. Entités Coût Concourantes 149
Figure 101. Les fonctions inducteurs des Entités Coût concourantes 150
Figure 102. Les fonctions inducteurs des Entités Coût concourantes (Suite) 151
Figure 103. Coûts et cycle de vie d'un produit 155
Figure 104. Interaction entre conception et coût de production [Noble et Tanchoco, 1990] 156
Figure 105. Le modèle multi-étape de décision intégrée 157
Figure 106. Evolution des bornes de coûts engagés du produit 158
Figure 107. Evolution des bornes de coûts engagés au cours de la phase de conception préliminaire 159
Figure 108. Evolution des bornes de coûts engagés au cours de laphase de conception détaillée 160
Figure 109. Evolution des bornes de coûts engagés au cours de la phase d'élaboration du devis 161
Figure 110. Etapes et composants de la maquette logicielle 166
Figure 111. La pièce Termoz 168
Figure 117. Temps de préparation machine 172
Figure 118. Chariot électrique à trois roues à fourche avec un conducteur 173
Figure 119. L'agencement des machines dans l'atelier 174
Figure 120. Le Modèle Produit de support 175
Figure 121. Exemple de règle de génération de processus de fabrication d'une entité de fabrication 176

Figure 122. Affectation des machines capables à une opération de fabrication 176
Figure 123. Règle d'estimation de l'Entité Coût élémentaire « opération de fabrication » 177
Figure 124. Génération du processus de fabrication de l'entité « Trou_Traudé » 178
Figure 125. Exemple d'activation des contraintes de fabrication 179
Figure 126. Exemple d'activation des contraintes de production 180
Figure 127. Le Modèle Costgrammes de support 181
Figure 128. Attributs d'une Entité Coût 183
Figure 129. Formule d'estimation d'une Entité coût élémentaire 182
Figure 130. Formule d'estimation d'une Entité Coût mère 182
Figure 131. L'Entité Coût Machine 183
Figure 132. Coût des opérations de fabrication de la pièce Termoz sur les machines par défaut 185
Figure 133. Coûts des processus de production solutions à un degré de satisfaction égale au moins à 0.390 188
Figure 134. Le sous-ensemble flou [4,9 ; 7,3] du coût total 189
Figure 135. Un processus de production solution de la pièce Termoz 189

Introduction générale

Motivation de l'étude

Ce travail de thèse porte sur les méthodes d'estimation des coûts dans le monde de la production manufacturière, et plus précisément de la production mécanique. Il a été réalisé au Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique (LGIPM) de Metz en collaboration entre l'ENIM, le CER Metz de l'ENSAM, l'Université de Metz et la société Cognition.

Le travail part de la constatation qu'à l'heure où les marges de bénéfice des entreprises sont laminées par la compétition pour offrir le meilleur prix au client, on ne peut plus se permettre d'évaluer grossièrement les coûts de développement et de production des produits. Or, force est de constater que l'entreprise se retrouve démunie en termes de méthodes et outils fiables et précis pour évaluer ces coûts et fait souvent confiance à l'expérience de ses ingénieurs avec plus ou moins de bonheur.

Les méthodes d'estimation des coûts induisent des façons de voir et des comportements. Les coûts estimés guident les orientations et les décisions. Ce couple détermine ainsi pour une grande part les performances de deux fonctions stratégiques de l'entreprise manufacturière : la Conception et le Devis.

Des études détaillées sur les coûts de production ont montré que ces coûts sont principalement engagés dès la phase de conception des produits. Selon General Motors, 70% des coûts de production des transmissions de camion sont déterminés pendant les étapes de conception. Une étude faite au sein de Rolls-Royce a révélé que l'activité de conception détermine 80% des coûts finaux de 2000 composants des produits fabriqués par cette entreprise [Corbett, 1986].

Autre enseignement qui peut être déduit du rôle stratégique de l'activité de conception, c'est que durant cette phase, les possibilités de réduire le coût total du produit sont les plus importantes. Si le temps passé pour étudier les solutions techniques alternatives augmente les dépenses de cette phase, il permet par la suite de diminuer le coût de production et les délais de mise sur le marché du produit [Carter et Baker, 1991].

Les deux constatations précédentes placent l'estimation des coûts au cœur de l'intégration conception/production. Fournir aux concepteurs les informations nécessaires à l'estimation et la réduction des coûts des nouveaux produits passe par l'application de nouvelles procédures

d'organisation du cycle conception/industrialisation/production, dite *Ingénierie Intégrée*. Cette démarche a pour objectif d'exploiter au mieux et à faire remonter les connaissances métiers aussi tôt que possible en phase de conception. Pour éviter des coûts élevés en production et des infaisabilités en fabrication, la méthode s'attache à prendre en compte, dès la définition du produit, les contraintes et les orientations de la fabrication et de la production.

En conception traditionnelle, les concepteurs manipulent des formes géométriques sans informations complémentaires sur les moyens industriels utilisables pour les réaliser. La représentation du produit est trop « fermée » [Mer *et al.*, 1995]. Il est alors aussi difficile d'estimer le coût de production que de juger ce qui peut être modifié sur le produit pour réduire son coût.

De nouvelles représentations du produit, plus « ouvertes », restent donc à créer. Elles devront permettre aux ingénieurs intervenant dans le couple produit-process, au fur et à mesure de l'avancement des travaux, d'améliorer la définition du produit tout en défendant les objectifs de qualité requise (bonne satisfaction des fonctions exigées) et de coût minimum (définition du processus de production le moins coûteux). Elles devront aussi capitaliser les solutions techniques et leurs moyens de mise en production.

Dans l'entreprise, une autre activité concernée par l'estimation des coûts est le Devis. Dans un marché concurrentiel, l'établissement sur des bases solides d'un devis revêt une importance cruciale. Rappelons que l'élaboration du devis est l'activité qui consiste à annoncer le couple Prix-Délai au client.

Les entreprises opèrent actuellement dans un environnement caractérisé par l'accroissement des variétés des produits, la diminution des commandes semblables, la diminution des lots de production et du cycle de vie des produits. Celles travaillant sur commandes se retrouvent sous forte pression pour répondre *rapidement* et *précisément* aux devis demandés par leurs clients et leurs donneurs d'ordres.

Face à une compétition globale grandissante, l'incapacité d'une entreprise à répondre rapidement et de façon adéquate aux demandes de devis reçues peut se répercuter sévèrement sur sa capacité à survivre économiquement. En effet, un coût sous-estimé se traduit par des pertes, un coût sur-estimé empêche l'entreprise de rester concurrentielle.

Emettre un devis sur la base d'une gamme fabrication unique ou standard ouvre la discussion sur la validité d'une estimation qui peut prévoir, sans aucune consultation avec la gestion de production, que le produit sera réalisé par un processus de production *P1* dont le coût est *C1*, alors que l'affaire étant engagée, les contraintes d'ordonnancement amèneront le travail sur un processus de production *P2* de coût *C2*.

L'omission des alternatives de production au cours de l'élaboration d'un devis pourra se traduire par un manque à gagner, par la non prise en compte d'éléments de fiabilité et de flexibilité. En effet, cela offre aux commerciaux la possibilité de négocier avec les clients sur la base d'un ensemble de coûts possibles relatifs aux processus de production solutions, en fonction de la qualité désirée du produit (figure 1).

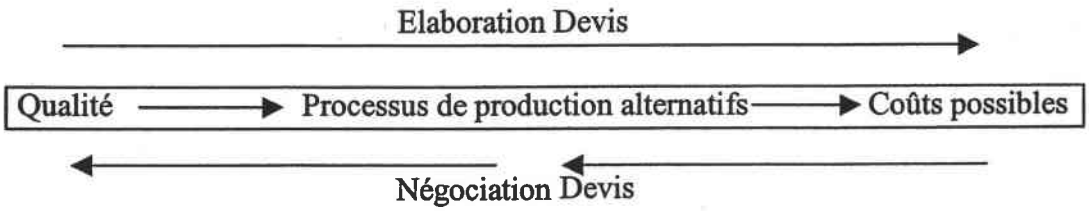


Figure 1. Elaboration et négociation d'un devis

Dans un autre ordre d'idée, on peut également critiquer la lenteur d'une élaboration de devis basée sur la gamme de fabrication. Cette organisation est issue de l'approche traditionnelle séquentielle qui n'est plus adaptée à la vitesse du marché. Aujourd'hui, l'application de l'ingénierie intégrée permet d'alléger l'organisation liée à la préparation et à la négociation des devis, pour gagner en efficacité et en temps grâce à la capitalisation des connaissances de fabrication et à une bonne maîtrise de données techniques tenant compte des options et variantes des produits.

Ainsi, les entreprises expriment un besoin urgent, tant en conception qu'en devis, pour disposer de solutions (outils et méthodes) d'estimation des coûts, leur permettant d'améliorer la performance de ces deux fonctions stratégiques de l'entreprise.

Face à cette demande, et en remplacement de la méthode analytique basée sur la décomposition de l'estimation de coût d'un produit, beaucoup d'entreprises appliquent les méthodes paramétriques et analogiques d'estimation des coûts. Si ces méthodes sont réellement rapides c'est parce qu'elles sont essentiellement synthétiques. En effet, ces techniques fonctionnent en boîte noire, elles fournissent le coût total du produit en fonction de certaines de ses caractéristiques. En conception, l'absence d'informations sur la structure (composition) du coût et sur le processus de production du produit n'aide pas le concepteur pour faire des modifications éventuelles ciblées de réduction de coût. En devis, l'affectation à un produit d'un coût unique et figé limite le champ de négociation dans la transparence.

Une autre préoccupation majeure de notre travail de recherche sur l'estimation des coûts est la croissance sans cesse grandissante des activités indirectes. En effet, la part des opérations directement productives, et donc directement évaluables, a tendance à diminuer de manière importante au profit d'activités indirectes, que les entreprises n'ont pas fréquemment la possibilité de suivre avec autant de précision que les opérations de fabrication [Kieffer, 1994]. Le degré de sophistication technique de la fabrication et la mise en œuvre des nouvelles

méthodes de production vont de pair avec le gonflement des coûts indirects matérialisés par les activités de soutien et d'assistance. En d'autres termes, la structure de coût des produits inclut progressivement une partie plus importante de coûts indirects dont les liens de causalité aux produits sont difficiles à cerner et la traçabilité plus délicates à assurer avec l'approche traditionnelle d'estimation des coûts basée sur des concepts (sections principales et secondaires) et des données (taux horaires) issus de la comptabilité analytique, dont les limites ont été analysées par plusieurs auteurs [Lorino, 1991][Bescos *et al.*, 2000] [Mevellec, 1993].

Plan de lecture

Ce mémoire porte sur l'étude et la définition d'une approche d'estimation des coûts en production mécanique basée sur un concept nouveau, l'Entité Coût, appliqué dans un cadre d'ingénierie intégrée. Plus précisément, notre objectif est de fournir une assistance à l'élaboration de devis en production mécanique et une aide à l'évaluation économique au niveau de la conception. Le concept d'Entité Coût proposé apporte un traitement unifié des coûts directs et indirects. Il permet de formaliser l'expertise d'estimation des coûts liés aux diverses activités de production. La modélisation d'estimation des coûts proposée a permis d'intégrer des connaissances et des données issues de la fabrication et de la production.

Le premier chapitre présente de manière plus détaillée la problématique d'estimation des coûts dans le contexte actuel. Dans un premier temps, nous définissons l'outil responsable de la fiabilité et de l'étendue des informations économiques circulant à l'intérieur de l'entreprise qu'est le système de coûts ainsi qu'une typologie des coûts. Dans un deuxième temps, nous expliquons le rôle stratégique de l'estimation des coûts en conception et en devis. Un état de l'art des méthodes employées dans l'approche traditionnelle d'organisation de l'entreprise nous permet de constater que ce cadre limite l'estimateur à la mesure des coûts. Nous analysons ensuite l'impact de l'évolution Produit / Production / Environnement sur les systèmes de coûts et nous distinguons quatre éléments importants de réponse : l'homogénéité, l'activité, l'inducteur et le processus. Enfin, nous concluons ce chapitre par la présentation des méthodes actuelles mises en œuvre pour l'estimation des coûts en phase de conception dans le cadre d'une approche concourante d'organisation de l'entreprise. Nous constatons le passage de la mesure au management des coûts.

Le deuxième chapitre expose les concepts et les principes de base de la méthode proposée. Nous commençons par présenter les objectifs de l'approche dans un cadre d'ingénierie intégrée et dans le contexte actuel de croissance des coûts indirects. Ensuite, nous détaillons la définition du concept Entité Coût. Enfin, nous expliquons notre principe pour établir un modèle d'estimation des coûts associant les variables techniques (entités de fabrication) et les variables économiques (entités coût) autour du produit estimé. Cette réflexion nous a amené à la modélisation des connaissances et des raisonnements du domaine d'estimation des coûts.

Ainsi, le troisième chapitre porte sur la modélisation des connaissances où nous distinguons deux modèles : le Modèle Produit et le Modèle Costgrammes. Le premier porte sur la construction du produit sur la base des entités de fabrication, pour lesquelles nous associons un certain nombre d'opérations de fabrication nécessaires potentiellement à leur réalisation. Ensuite, partant du principe que le coût d'un produit n'est que l'assemblage des Entités Coût traversées, nous définissons le Modèle Costgrammes. Pour cela, nous détaillons la procédure d'identification des Entités Coût présentes dans l'entreprise et des inducteurs associés. Enfin, nous remarquons que l'opération de fabrication est commune aux deux modèles et nous expliquons la possibilité du passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes à condition de connaître les opérations effectives (processus de fabrication) de chaque entité de fabrication et le processus de production du produit.

Le chapitre quatre fournit les données nécessaires à l'estimation complète des coûts sur la base du Modèle Produit-Costgrammes développé au chapitre précédent. Dans un premier temps, la modélisation des raisonnements porte sur l'estimation des coûts du processus de fabrication[1] d'une entité de fabrication. Nous évoquons aussi l'intérêt de cette information pour la conception. Dans un deuxième temps, nous démontrons que l'estimation des coûts des processus de production[2] alternatifs d'un produit est un problème de satisfaction de contraintes. Nous définissons trois types de contraintes : contrainte de coût, contraintes de fabrication et contraintes de production. Les solutions du problème sont classées par ordre de satisfaction économique. A chaque processus de production solution correspond une estimation de coût ascendante du Modèle Costgrammes. Des Entités Coût concourantes telles que « changement d'outil » ou « maintenance » sont fortement dépendantes du processus de production, leur coût est identifié à l'aide de fonctions inducteurs proposées. Notre objectif à travers cette démarche est de cerner les causalités et d'assurer la traçabilité des coûts. Enfin, nous présentons une application de la démarche d'estimation des coûts avec une méthodologie de décision intégrée en phases de conception et devis.

Le développement d'une application informatique offrant un support à notre proposition est le sujet du cinquième chapitre. Le système est développé au moyen de deux environnements. D'une part, le générateur de systèmes experts CostAdvantage nous a permis de concevoir notre Modèle Produit-Costgramme et de générer automatiquement le coût des opérations de fabrication d'une entité de fabrication ainsi que les contraintes de fabrication et de production. A cet effet, des règles d'expertise en fabrication ont été capitalisées, ainsi que des règles et des méthodes relatives à l'expertise d'estimation des différentes Entités Coût concernées. D'autre part, le deuxième outil employé est l'environnement de programmation par contraintes Con'flex. Ce dernier nous a permis de valider la modélisation réalisée de

---

[1] somme des coûts des opérations de fabrication de l'entité de fabrication.
[2] somme des coûts des opérations de fabrication des différentes entités de fabrication, des coûts de préparation des machines et des coûts de manutention.

l'estimation des coûts des processus de production alternatifs sous forme de problème de satisfaction de contraintes. Une application numérique d'estimation des coûts d'une pièce mécanique dans un atelier de production est proposée comme support didactique de la méthode. Un interfaçage entre les deux environnements et une intégration avec un modeleur CAO sont envisagés pour une utilisation en tant que logiciel intégré de l'outil développé.

Un dernier chapitre présente nos conclusions et perspectives relativement à ce travail.

Chapitre 1

De la Mesure au Management des Coûts

L'évolution des méthodes d'estimation de coûts peut être récapitulée comme une série de transitions, d'un rôle d'évaluation *a posteriori* au début du 20ème siècle vers un rôle proactif intégré vers la fin du siècle. Essentiellement, tout au long de ce siècle une auto-actualisation lente du rôle d'un système de coûts comme composante intégrale d'une mise en place de stratégie de l'entreprise s'est produite. Dans plusieurs entreprises, le système de coûts a été intégré dans les processus de décision qui orientent la production. Cependant, la phase finale de l'évolution et de l'intégration des systèmes de coûts jusqu'à la fonction conception a seulement commencé à la fin du 20ème siècle.

La figure 2 illustre le flux global d'information, que se soit technique ou économique, entre les services de bureau d'études, bureau des méthodes, service de comptabilité et service

commercial qui sont responsables respectivement de la conception du produit, de la gamme de fabrication, des données nécessaires à la valorisation et du devis. En absence d'information sur la fabrication et les coûts, le concepteur ne peut pas évaluer la conséquence économique de ses choix techniques. En se basant sur une gamme unique, le commercial ne peut pas négocier le rapport coût / délai avec ses clients. L'indisponibilité de ces informations en phase de conception et leur rigidité en phase commerciale est due au cloisonnement des services. Le flux d'information est unidirectionnel avec des objectifs conflictuels. La meilleure conception fonctionnelle peut ne pas être économiquement faisable à fabriquer et à vendre.

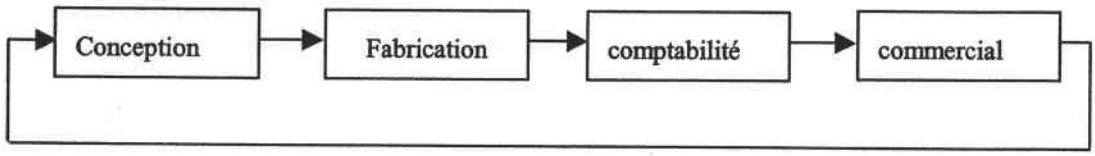


Figure 2. Flux d'information typique dans un processus de développement de produit

Pour faire face à ce problème, une interaction constante des flux d'information entre les services conception, fabrication, comptabilité et commercial est nécessaire. Pour promouvoir une telle interaction, des approches telles que l'ingénierie intégrée, l'ingénierie simultanée, et la conception pour la fabrication (DFM) peuvent apporter des voies d'intégration. La figure 3 montre les flux d'information nécessaires dans un processus intégrée de développement d'un produit.

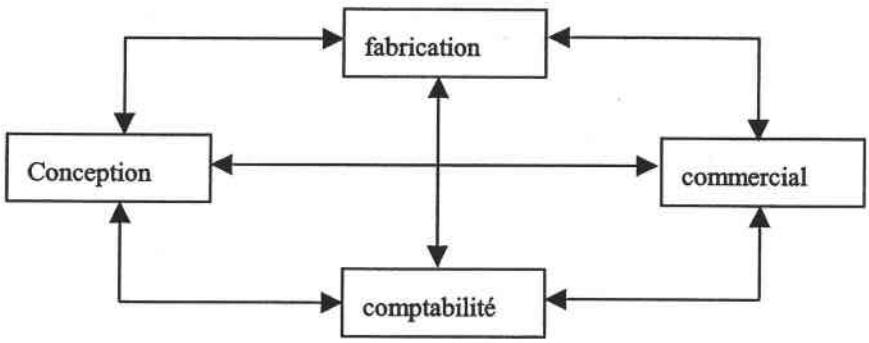


Figure 3. Flux d'information intégré dans un processus de développement de produit

Cette évidence pousse les nouveaux systèmes de coûts à inclure la phase de conception dans leur structure. Ainsi, des outils simples et précis peuvent être mis à la disposition des concepteurs et des fabricants pour évaluer au plus tôt l'impact de leurs choix sur le coût de production et au deviseur pour négocier efficacement les demandes de prix. On assiste ainsi au passage de la mesure au management des coûts.

Dans ce premier chapitre, nous définirons l'outil responsable de la fiabilité et de l'étendue des informations économiques circulant à l'intérieur de l'entreprise qu'est le système de coûts. Nous présenterons une typologie des coûts et des systèmes de coûts.

Nous évoquerons deux fonctions stratégiques de performance économique : la conception, le devis. Les méthodes d'estimation de coûts relatives à ces deux fonctions et employées dans l'approche traditionnelle d'organisation en entreprise seront exposées.

Nous analyserons ensuite l'impact de l'évolution Produit / Production / Environnement sur les systèmes de coûts. C'est sous l'angle de la cohérence entre l'entreprise et son système de coûts, qu'on examinera chacune des réponses apportées à l'évolution de l'entreprise et de son environnement. On distinguera quatre réponses importantes : l'homogénéité, l'activité, l'inducteur et le processus.

Enfin, nous décrirons les méthodes mises en œuvre pour l'estimation des coûts en phase de conception dans le cadre d'une approche concourante et l'évolution de la fonction Devis.

1.1 Le système de coûts

1.1.1 Définition

La connaissance des coûts est un des impératifs de base de toute prise de décision. Quelles ressources économiques consomme-t-on, pour aboutir à quels résultats ?

C'est pour répondre à ces questions souvent posées par les estimateurs de coûts, que le système de coûts doit montrer quelles relations lient les ressources aux finalités poursuivies (ou subies). Ce faisant, il crée une double représentation [Bouquin, 1997] : celle des finalités et celle des processus qui les relient aux consommations des ressources.

En ce qui concerne les finalités, leur identification se construit : un produit peut être perçu comme un assortissement d'attributs (matériau, entités de fabrication, qualité...). Est-il suffisant de connaître globalement le coût du produit ? Il convient plus certainement de détailler et d'analyser ceux des attributs qu'il réunit.

Quant aux processus, on distingue deux cas limites : celui de l'industrie « *de process* », où des opérations stables se succèdent selon un ordre constant (fabrication de verre plat, de bière, chimie, traitement de dossier standard...), et celui de la fabrication discrète ou à la commande «*job order*» où chaque commande fait enchaîner une variété différente d'activités élémentaires, de sorte que la parcours des flux physique n'est pas stable. L'estimation des coûts sera ici bien plus complexe que dans le cas de l'industrie du process.

> *« Un système de coûts est le résultat des efforts déployés pour fournir aux gestionnaires les moyens de « savoir, de comprendre et d'agir sur les consommations de ressources ». Ceci se traduit concrètement par la production d'une série d'instruments visant à assurer la traçabilité des ressources, à identifier les causalités des consommations et à cerner les responsabilités. C'est*

cet ensemble instrumental que l'on désigne sous le terme de système de coûts »
[Mévellec, 1994].

La traçabilité : terme emprunté récemment à la gestion de production, c'est la propriété qui permet de suivre, dans le réseau d'analyse, le cheminement des coûts, depuis l'enregistrement des coûts dépensés en comptabilité générale jusqu'à leur incorporation aux produits ou services. C'est le champ couvert par l'effort de traçabilité qui permet de qualifier le système de coûts en système de coûts complets ou de système de coûts partiels. Dans le premier cas, la traçabilité doit être totale alors que dans le second la traçabilité est réduite à une fraction spécifique des coûts. La finesse du système d'information détermine les possibilités de traçabilité. Ainsi, l'absence ou la présence d'un suivi détaillé des consommations d'outillages fait passer celles-ci de la zone des coûts directs à celles des coûts indirects. La traçabilité se traduit par un ensemble de conventions et de procédures de traitement de l'information depuis sa saisie jusqu'à sa destination finale en passant par sa circulation. L'utilisation de la technique des sections homogènes (centres d'analyse) en comptabilité analytique conduit à des agrégations de coûts qui constituent des ruptures dans la traçabilité et peut être source d'imprécision dans les devis.

La causalité : en absence de relations de causalité entre les produits ou services et les consommations de ressources qui leur sont reliées, le système de coûts est incapable de remplir son rôle d'outil d'aide à la décision et à la gestion. Comme le souligne Bouquin [1997], « *le calcul du coût complet d'un produit n'est utile que s'il ne fait pas disparaître les lois des diverses catégories de coûts qu'il intègre* ». La gestion des liens de causalité n'est pas indépendante de l'organisation de la traçabilité. Ainsi, au sein d'un atelier, même si certains outillages sont spécifiques à certains produits et sont techniquement bien identifiés, leur coût, agrégé dans une nature comptable « outillage », ne pourra pas être pris en compte, sur le plan économique, par un traitement de type causal [Mévellec, 1994].

La responsabilité : la prise en compte des relations de causalité ouvre la voie à l'action, sous réserve de cerner les responsabilités dans la mise en œuvre des ressources. La question est de savoir si le lieu de constatation du coût coïncide avec le lieu de maîtrise de ce coût. Pour la fonction conception, la réponse est affirmative. Les concepteurs doivent avoir à leur disposition des signaux suffisamment clairs et puissants pour que chacun puisse agir de manière pertinente sur les coûts locaux tout en ayant conscience des effets transversaux de son action.

Les systèmes de coûts sont généralement étudiés sous leur aspect technique, lequel se réduit habituellement à la recherche d'un processus de modélisation des consommations de ressources. Selon le cas, cette modélisation donne plus ou moins de place aux notions de traçabilité, de causalité ou de responsabilité.

1.1.2 Typologie des coûts

L'objet de ce paragraphe est de rappeler les principales notions et points de vue suivant lesquels le calcul du coût est réalisé et de définir les terminaisons les plus courantes telles que le prix de vente, le coût de revient, les coûts directs, indirects, fixes et variables.

Le concept de coût ne peut pas être attaché sans ambiguïté à un produit ou service sans se heurter à des habitudes de pensées qu'il est nécessaire d'expliciter. En effet, il est fréquent d'entendre utiliser le même mot « coût » pour les deux valeurs distinctes que sont le coût de revient, le prix de vente. Or ces valeurs sont deux notions très différentes et la confusion entre elles peut avoir de graves conséquences.

Le coût de revient d'un produit ou d'un service est égal à la somme des dépenses nécessaires à la production et à la gestion pour toutes les activités de l'entreprise, depuis l'entrée des matières premières ou composantes jusqu'à la sortie du produit fini [Debaene, 1981]. Il recouvre donc toutes les opérations de transformation et de distribution du produit. Cette valeur est très importante pour l'entreprise.

Le prix de vente correspond à une activité de transaction. En effet, le prix de vente dépend principalement du marché. La comparaison du prix de vente et du coût de revient permet de dégager la marge perçue par l'entreprise pour chaque produit vendu.

Le coût peut être classifié de diverses façons suivant son champ d'application, son contenu et le moment dans le cycle de vie du produit où il est calculé (figure 4).

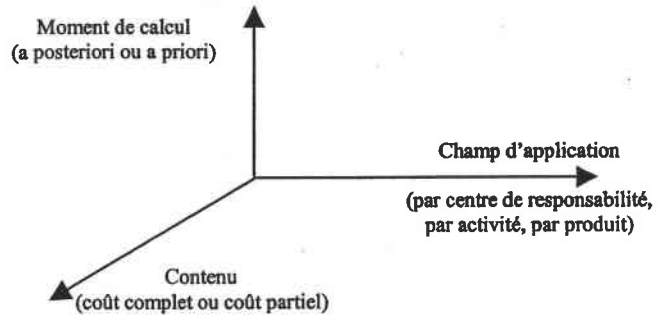


Figure 4. Caractéristiques des coûts

La combinaison de ces trois caractéristiques (champ d'application, contenu, moment de calcul) fournit une grande variété de coûts différents. La classification que nous avons retenue rappelle les deux notions que nous avons définies ci-dessus : la traçabilité et la causalité, et permet de distinguer les principaux types de coûts : directs et indirects, fixes et variables.

La traçabilité :

- *Coûts directs* : Ce sont les coûts qui peuvent être directement attribués à un produit, un service ou une activité.
- *Coûts indirects* : Ce les coûts qui ne peuvent pas être directement attribués à un produit, à un service ou à une activité, mais qui permettent à l'entreprise de produire ce produit (figure 5). Ces coûts doivent être répartis sur le coût de chaque produit grâce à des règles (clés de répartition) choisies par l'entreprise.

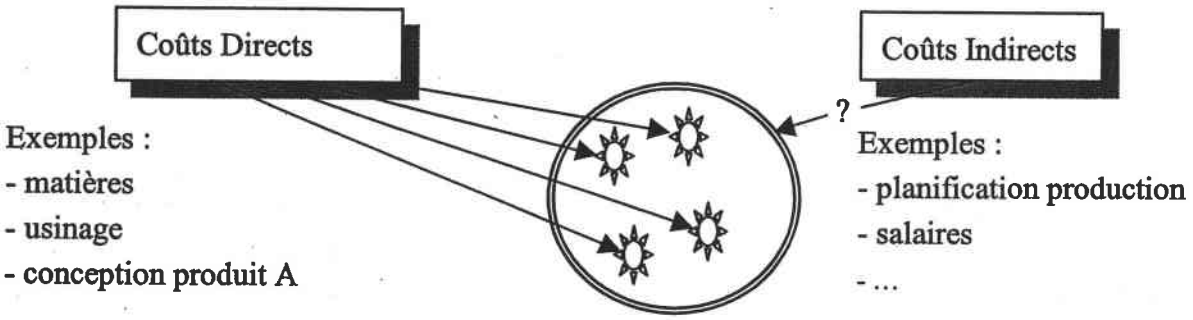


Figure 5. Coûts directs et coûts indirects

La causalité :

Coûts Fixes : Ce sont les coûts, qui à l'intérieur de certaines plages sont indépendants du niveau d'activité. Ils évoluent par pallier avec le niveau d'activité (figure 6).

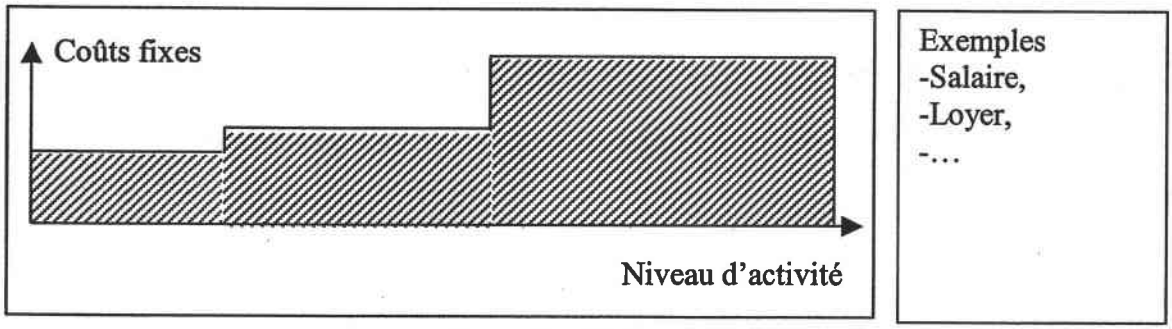


Figure 6. coûts fixes

Coût Variables : Ce sont les coûts dont la variation est directement dépendante du niveau d'activité (figure 7).

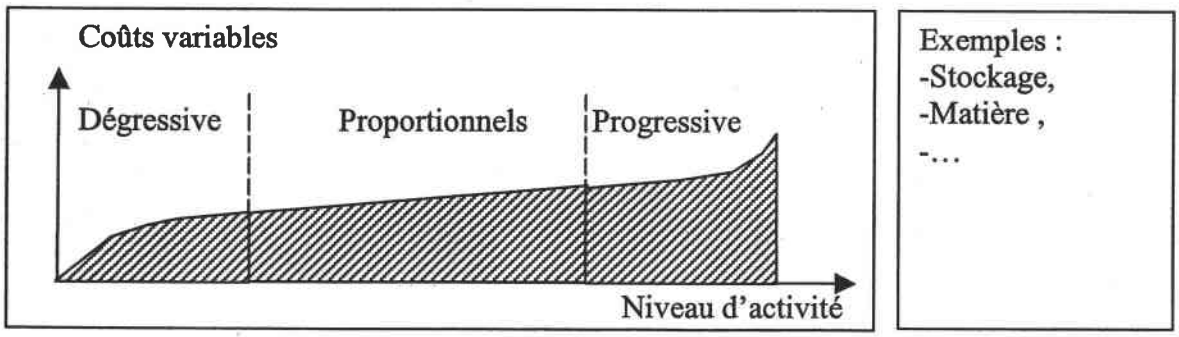


Figure 7. coûts variables

1.1.3 Typologie des systèmes de coûts

Nous avons vu précédemment les différents types essentiels de coûts. Nous avons ainsi défini les coûts directs et indirects et les coûts variables et fixes. Ils sont les supports respectifs des deux principaux systèmes de coût, système de coût complet et système de coût partiel, permettant d'analyser le coût total d'un produit (figure 8).

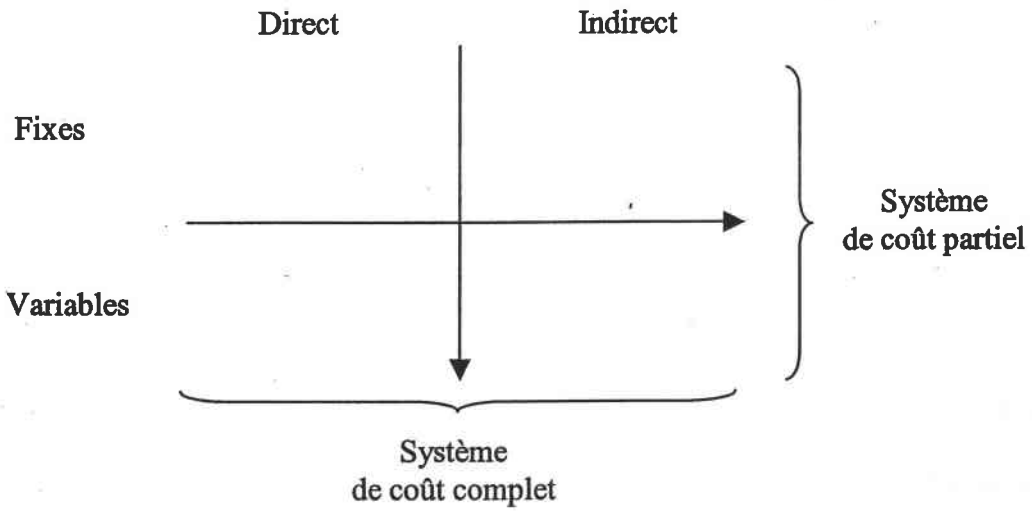


Figure 8. Coûts et systèmes de coûts

1.1.3.1 Le système de coût complet

Dans ce système, le coût complet d'un produit est « constitué par la totalité des charges qui peuvent lui être rapportées par tout traitement analytique approprié : affectation, imputation » [Pesqueux, 1990], c'est à dire les coûts directs et indirects.

Le coût de revient est le coût complet d'un produit au stade final, coût de distribution inclus. Cette approche suppose la décomposition de l'entreprise en sections, chaque section répondant à une étape. En amont, on trouve ce qui est nécessaire au bon fonctionnement de l'entreprise et en aval la distribution. Les sections ainsi définies sont de deux types, les sections auxiliaires qui fournissent des prestations aux sections principales qui fourniront des prestations aux produits dont on cherche à calculer le coût. Les coûts de ces différentes prestations sont calculés par le biais d'unités d'œuvre.

C'est le système le plus ancien (1928), connu sous le nom des centres d'analyse, d'apparence rationnelle par le traitement et la répartition de l'ensemble des charges. Cependant, il suppose un grand nombre d'hypothèses de calcul telles que la définition des unités d'œuvre ou des clés de répartition.

1.1.3.2 Le système de coût partiel

Ce système connu sous le terme général de *Direct Costing* (1957), porte sur l'analyse partielle des coûts. Seuls sont pris en compte les éléments du coût d'un produit variant avec le volume de la production. Un coût variable s'obtient en prenant les coûts variables directs (matière, personnel de production, énergie...) et en y ajoutant les coûts variables indirects des centres. Ceci entraîne un découpage dans chaque centre entre coûts variables et coûts fixes. Le premier résultat de cette approche est que :

Prix de vente – Coûts variables = Marge sur coûts variables

S'il existe une référence possible à des prix de marché, l'évaluation se fera par référence à ce prix. Dans le cas contraire, un prix sera retenu après discussion entre « fournisseurs » et « clients ». La marge sur coûts variables représente la contribution du produit à couvrir la totalité des charges fixes de l'entreprise. Tout produit dont la marge sur coûts variables est positive contribue à l'amélioration du résultat de l'entreprise. Les analyses fournies par ce système de coût sont tournées vers l'extérieur de l'entreprise et destinées à répondre à des questions, à aider à prendre des décisions face au marché.

- Quelle est la limite inférieure du prix de vente à laquelle il est possible de descendre pour pénétrer un marché, ou introduire un nouveau produit sur un marché ?
- Quel est le produit qui laisse la marge la plus importante et qui absorbe donc le plus de « frais généraux » ?

Si l'objectif de ce système est de retenir seulement les éléments de coûts pertinents par rapport à une décision, la procédure de calcul du coût variable reste identique à celle du calcul du coût complet (l'unité d'œuvre sert à imputer les charges variables du centre au coût variable du produit). Ceci revient à dire que les coûts variables sont frappés par la même part d'arbitraire dans la définition des unités d'œuvre ou des clés de répartition.

1.1.3.3 Conclusion

Une nouvelle modélisation du fonctionnement de l'entreprise, prenant en compte sa complexité et son évolution, est nécessaire. La description de cet environnement modifié et ses incidences sur ces systèmes de coûts sera abordée en détail à la section 1.4. Nous reprenons dans le Tableau 1 les deux notions de traçabilité et de causalité pour synthétiser les limites auxquelles sont confrontées spécifiquement chacun des systèmes de coûts (complet et partiel) ainsi que les réponses permettant d'améliorer leur fiabilité.

	Système de Coût Complet (France)	Système de Coût Partiel (USA)
Objectif : Traçabilité et Causalité	La causalité est limitée mais la traçabilité concerne l'ensemble des ressources consommées	Traçabilité et causalité sont respectées mais ne concernent qu'une fraction des ressources consommées
Limite d'origine interne	Diminution du poids de la relation causale au sein de la procédure de traçabilité.	Diminution du poids relatif des ressources traçables au sein de la masse des ressources consommées
Réponse à cette limite	Amélioration des relations de causalité	Amélioration de la traçabilité
Limite d'origine externe	Les objets de coût qui organisent le décryptage des liens de causalité et l'organisation de la procédure administrative de traçabilité ne sont plus pertinents au regard de la stratégie poursuivie et/ou des attentes du marché	
Réponse à cette limite	La modification des objets de coût (activité, attributs produit, service…)	

Tableau 1. Objectifs, limites et réponses dans les systèmes de coût actuels

Dans cette recherche, nous définirons un système de calcul de coûts comme un dispositif visant l'organisation et le traitement de l'information économique et physique interne à l'organisation. Ce dispositif repose sur deux propriétés majeures. La première vise à expliciter les liens de causalité entre objets de coût et consommation de ressources. La seconde ambitionne d'assurer la traçabilité qui permette de remonter du coût d'un objet aux ressources consommées.

Les progrès réalisés dans les systèmes d'information permettent d'améliorer le suivi et le contrôle des consommations. Cela permet de mettre à disposition nombre d'informations quantifiées, d'ordre technique, pouvant être utilisées pour raffiner l'analyse des coûts indirects. L'idée est dans chaque cas d'obtenir des coûts plus exacts en cernant au plus près les caractéristiques techniques de la production.

1.2 Fonctions stratégiques de performance économique : la conception, le devis

Un système d'estimation de coût efficace est un facteur de performance interne et externe pour toute entreprise. Une estimation de coûts argumentée en phase de conception, activité

interne à l'entreprise, permet une prise en compte au plus tôt des coûts de production. Une estimation de coût (Devis) rapide et précise destinée aux clients, entités externes à l'entreprise, améliore la position compétitive de l'entreprise et la satisfaction des clients.

1.2.1 Le rôle économique de la Conception

Typiquement, conception et justifications économiques ont été considérées comme deux domaines séparés. Bien que les deux aient le même objectif d'arriver à un produit compétitif, leur cibles sont diamétralement opposées l'une de l'autre, la cible consistant à concevoir le meilleur produit possible est souvent contrariée par la cible de minimisation des coûts [Noble et Tanchoco, 1990]. Pugh [1974] est parmi les premiers à faire mention de la mise à disposition d'informations économiques aux concepteurs. L'importance de la modélisation du coût dès l'étape de conception a été exposée par d'autres auteurs tels que Ehrlenspiel [1987], Dewhurst et Boothroyd [1998], Wierda [1988], et Alting [1993]. Les outils proposés ne se limitent pas à des méthodes d'estimation des coûts mais aussi à des développements ayant pour objectif de donner au concepteur des évaluations rapides et exactes des conséquences économiques et des procédures pour déterminer les paramètres optimaux de conception.

Le rôle économique de la conception est primordial. Elle conditionne en majeur partie le coût global du produit et « fige » sa fabrication. La conception d'un produit est un processus complexe qui engage de 70 à 80 % des coûts d'un produit. L'hypercompétitivité des entreprises exige de plus en plus de savoir concevoir rapidement des produits optimaux. L'arrivée de nouveaux concurrents offrant la même qualité et le même potentiel d'innovation a par exemple obligé la firme TEKTRONIX[3] à se préoccuper de l'influence de son système de coûts sur le comportement des ingénieurs chargés de la conception des nouveaux produits [Mévellec, 1993]. Si on ne constate pas une incohérence dès que possible en conception, ou qu'on ne prend pas en compte tout de suite une contrainte, on fait du travail inutile ou en perd son temps en allers et retours de modifications coûteux. Plus une modification de conception est déclenchée tard dans le cycle de vie d'un produit, plus elle coûte chère. Hewlett-Packard a modifié son système de calcul des coûts à plusieurs reprises depuis 1986 pour améliorer la prise en compte par ses ingénieurs de conception du coût de la complexité des différents procédés techniquement disponibles [Mévellec, 1993].

Paradoxalement, ce sont les phases les moins productives, et dans l'absolu les moins coûteuses, qui déterminent à terme la majeure partie des coûts associés au produit. Cela apparaît très clairement si on considère l'évolution des coûts de chaque fonction et celles des coûts induits par les décisions au niveau des mêmes fonctions (figure 9).

---

[3] TEKTRONIX a pour principale activité la conception et la fabrication d'oscilloscopes, de produits de développement de systèmes numériques, ainsi que d'instruments de mesure électroniques manuels, de tests de télécommunications, d'audio et de vidéo.

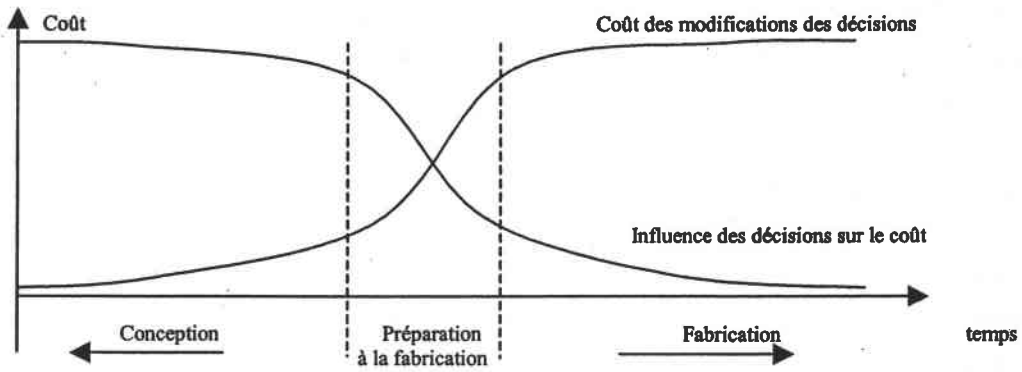


Figure 9. Coûts directs / Coûts induits des fonctions

La figure 10 montre les courbes des coûts engagés et dépensés durant le cycle du vie d'un produit. La perspective d'estimation des coûts suppose de pouvoir gérer la courbe haute du graphique avant que les coûts ne soit réellement figés, alors que les systèmes comptables traditionnels portent principalement sur la courbe basse.

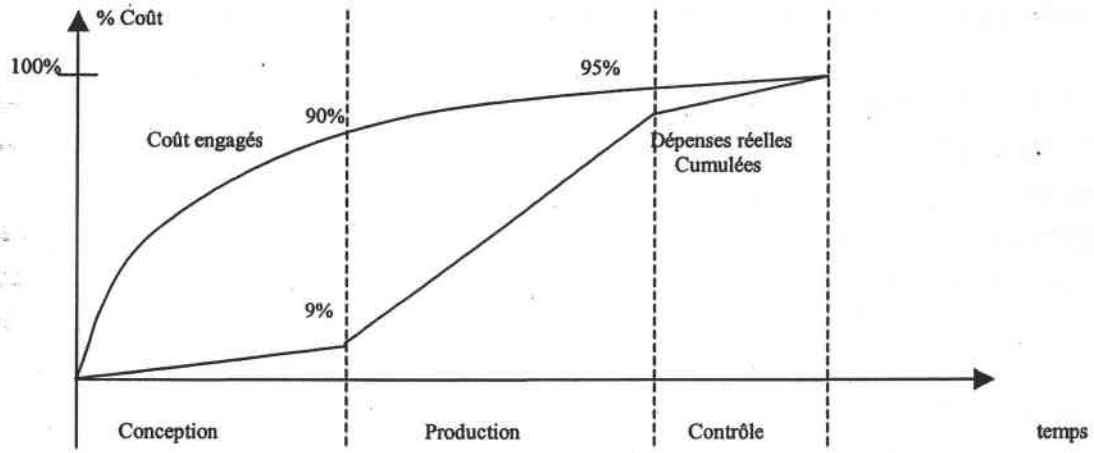


Figure 10. Cycle de vie d'un produit

Il est préférable de décider pour les coûts engagés que de constater pour les coûts dépensés. Les coûts doivent être estimés à la source (phase de conception). Des choix techniques associés au processus de fabrication doivent être évalués durant le processus de conception.

1.2.2 Le rôle stratégique du devis

Le devis est une proposition de prix et de délai, dans une qualité et pour une quantité définie, que transmet le consulté au consultant concernant l'éventuelle réalisation d'un produit pas encore élaboré. Si le devis est accepté, il devient une commande ferme pour le consulté. C'est un moyen d'alimenter en commandes l'entreprise.

L'établissement de devis sur des bases solides est crucial, « un prix trop bas se traduit par des pertes, et un prix trop élevé empêche l'entreprise d'être compétitive et de se placer lors d'une soumission ».

Les entreprises opèrent dans un environnement caractérisé par l'accroissement de la variété des produits et la diminution des quantités produites, des commandes semblables et du cycle de vie des produits. Les entreprises, particulièrement les PME travaillant sur commandes, se retrouvent sous pression pour répondre *rapidement* et *précisément* aux devis demandés par leurs clients et leurs donneurs d'ordres.

La difficulté réside dans le fait qu'il faut optimiser deux paramètres incompatibles entre eux :

La finesse de calcul par l'erreur minimale
La rapidité de réponse exigée par le client

L'incapacité d'une entreprise à répondre rapidement aux demandes de devis reçues de la part de ses donneurs d'ordres et de ses clients, peut se refléter sévèrement sur sa capacité à obtenir des commandes. En effet, le temps de réponse à un devis revêt une importante croissante dans la sélection de l'entreprise vendeuse, il améliore significativement le taux de capture de commandes (le pourcentage de transformation des devis en commandes fermes) de l'entreprise et sa position compétitive sur le marché. Par exemple, l'entreprise d'industrie mécanique *Ingersoll* a triplé le nombre de commandes d'un de ses produits (ligne de machines outils) suite à la réduction du temps de traitement des devis du produit considéré de dix à deux jours [Veeramani et Joshi, 1996].

La relation entre le coût estimé et le coût réel d'un produit peut être représentée par la courbe de Freiman. Ceci est illustré par la figure 11 où la courbe montre que :

- Une sous-estimation augmente les dépenses réelles.
- Une sur-estimation augmente les dépenses réelles.
- Une estimation réaliste minimise les dépenses réelles.

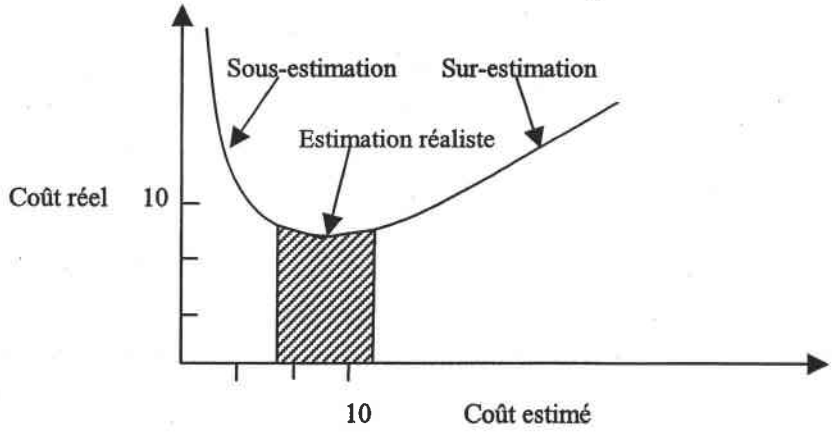


Figure 11. La courbe Freiman [Daschbach et Apgar, 1988]

Quand les coûts sont sous-estimés, les plans initiaux de fabrication, de planification,... sont irréalisables. Il devient difficile de respecter la limite du coût annoncée. En réponse, il y a une réorganisation, une re-planification et une possibilité d'ajouter du personnel et de l'équipement, ce qui entraîne une forte croissance du coût réel. D'autre part, la sur-estimation des coûts, au lieu d'augmenter la marge du bénéfice, devient une source de gaspillage dans l'entreprise, le coût alloué a un produit sera dépensé.

L'élaboration d'un devis exige une méthodologie souvent absente. L'objectif se définit en deux mots, connus parce qu'exigés, VITE et BIEN.

Pour réaliser cet objectif, quatre qualités fondamentales sont demandées à ce chiffrage : Fidélité, Justesse, Précision et Rapidité [Bottecchia, 1984], [Bodin, 1975].

- Fidélité

La fidélité d'une méthode caractérise son aptitude à redonner le même résultat pour le même chiffrage (figure 12). L'agent chargé de devis (ou deviseur) doit donner à des moments différents, des coûts très voisins pour des pièces ou ensembles sensiblement similaires. Par exemple, un devis peut être exécuté plusieurs fois par la même personne à quelques mois d'intervalle ou simultanément par des personnes différentes, si les résultats accusent une dispersion importante, c'est que la méthode n'est pas fidèle. Il s'agit là d'un défaut important car, à juste titre, il retire toute crédibilité aux prédéterminations. Quand une méthode de prédétermination s'avère peu fidèle, on dit que ses résultats ne sont pas homogènes.

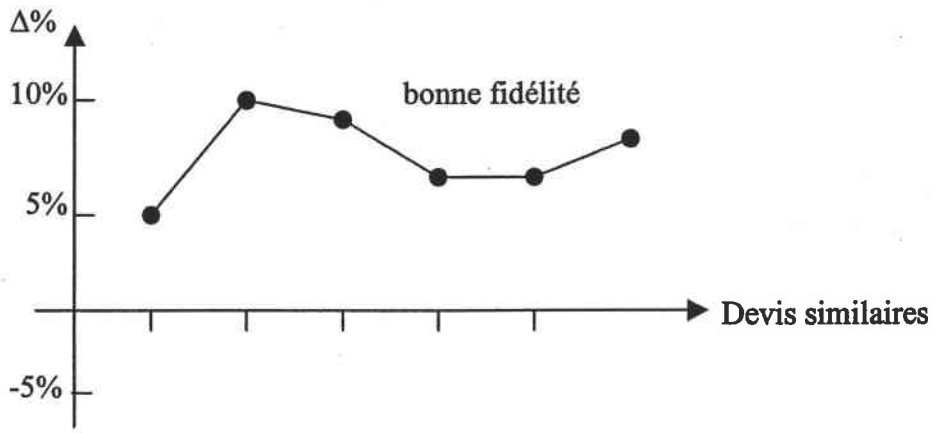


Figure 12. Courbe de fidélité

- Justesse

Une méthode sera reconnue comme "juste" si le chiffrage de ces devis est approximativement centré sur des résultats exacts (figure 13). Plus l'erreur possible d'estimation sera faible, plus l'outil ou la méthode sera juste.

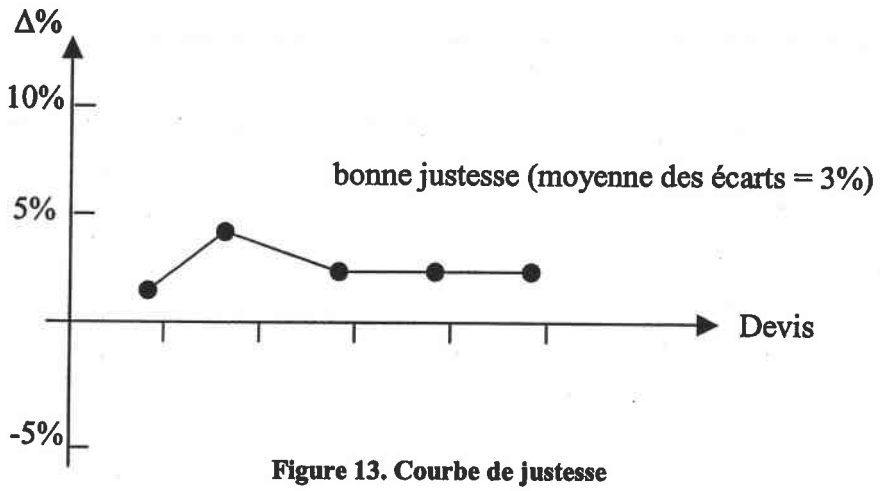


Figure 13. Courbe de justesse

- Précision

La précision (ou sensibilité) d'une méthode de chiffrage peut s'exprimer par la plus petite fraction de temps capable d'être estimée. Lorsqu'une méthode manque de sensibilité, les chiffreurs disent qu'elle n'est pas fine ou qu'elle est grossière. C'est le cas de la plupart des méthodes de chiffrage rapide. En effet, pour obtenir une précision élevée, il faut prendre en considération beaucoup de paramètres, aussi bien au niveau de la saisie des données qu'au niveau de leur traitement, ce qui ne va pas dans le sens de la rapidité.

- Rapidité

C'est la vitesse d'exécution du devis.

1.3 La mesure des coûts dans l'approche traditionnelle

Dans l'approche traditionnelle, de manière générale et classique, le passage entre la définition d'un besoin nouveau et la réalisation physique d'un produit passe successivement par trois fonctions :

la conception / la préparation à la fabrication / la fabrication

Le temps consacré à la phase de conception varie considérablement suivant la complexité du problème et le degré d'innovation qu'il représente pour l'entreprise. La conception passe par des étapes qui font évoluer une idée, un concept ou un besoin vers un produit aux caractéristiques complètement définies par une suite de choix. La préparation à la fabrication (Gamme) est très largement dépendante de la complexité du produit conçu. L'intégralité des spécifications nécessaires à la préparation et à la fabrication est présente sur le document résultant de l'activité de conception qu'est le dessin de définition. Ces spécifications peuvent être considérées comme les entrées de la préparation, dont l'objectif est de traduire la proposition globale de conception (le modèle de conception) en une possibilité de fabrication (gamme). Toutes les décisions concernant la fabrication du produit doivent être prises avant que celle-ci ne débute.

Dans cette approche traditionnelle et séquentielle, l'estimation de coût fait appel à des méthodes très variées en fonction de la connaissance progressive des caractéristiques du produit **puis** du process.

Quelle que soit la méthode, l'estimation des coûts reprend le principe de base décrit par la figure 14 :

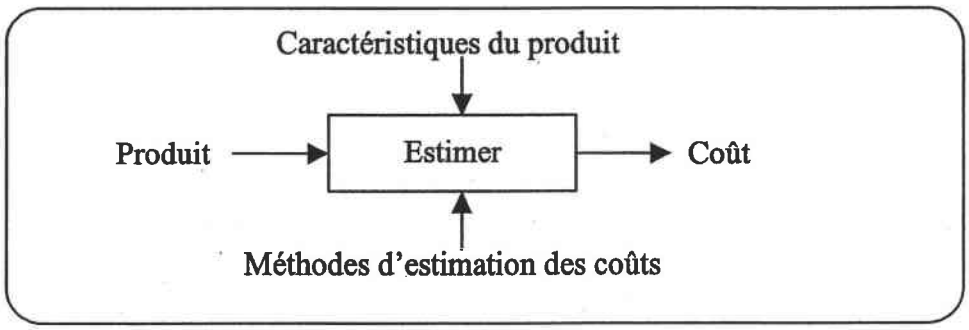


Figure 14. Principe d'estimation des coûts d'un produit

1.3.1 L'estimation de coûts en conception

Une définition de la conception est donnée par Gero [1989] : « La conception est la réalisation d'une description d'un artéfact qui doit contenir un ensemble d'attributs nécessaires pour satisfaire une fonction donnée. La conception est le processus permettant d'aboutir à une forme à partir d'une description sans forme ». Ce processus peut être décomposé en trois

phases : conceptuelle, préliminaire et détaillée. Dans la phase conceptuelle, les besoins fonctionnels sont transformés en configuration physique. La fonctionnalité du produit est le souci principal. Dans la phase de conception préliminaire, le concept physique se voit affecter un ensemble d'attributs, qui ne prennent aucune valeur précise. C'est dans la phase détaillée que la conception est complétée avec toutes les définitions et les spécifications.

Les méthodes (modèles) d'estimation de coûts utilisées par le concepteur varient de l'intuitivité aux méthodes mathématiques rigoureuses. Nous présentons une revue de ces méthodes classées suivant les trois phases de conception.

1.3.1.1 En phase conceptuelle

Dans cette phase, les géométries et les matériaux sont inconnus et le concepteur est incapable de spécifier les outils, les machines et les processus de fabrication qui pourraient être nécessaires. Cela rend la tâche d'estimation de coûts plutôt difficile, ce qui explique la large incertitude (-30 à +50 %) [Creese et Moore, 1990] associée aux estimations durant cette phase. Wierda [1988] et Venkateswara et Park [1995] ont présenté un résumé des recherches les plus étendues sur l'estimation du coût durant la phase conceptuelle.

Les méthodes les plus utilisées durant cette phase sont : la méthode intuitive, la méthode de conférence, la méthode de comparaison, la méthode du coût relatif, la méthode du poids, la méthode du coût matière et la méthode de la fonction coût.

L'expérience et l'opinion personnelle ainsi que le jugement sont les facteurs principaux de la méthode intuitive. La méthode de conférence consiste à mettre autour d'une table une équipe composée de personnes expérimentées issues des départements de production et de conception [Ostwald, 1992]. Pour la méthode de comparaison, la nouvelle conception est comparée avec une conception similaire pour laquelle les coûts sont connus. La subjectivité de ces méthodes les caractérise par une large incertitude inévitable.

La méthode du coût relatif compare les différentes alternatives et les présente sous forme de ratio [Ehrlenspie, 1987]. Dans la méthode du poids, l'estimation est obtenue à partir de la relation linéaire supposée entre les coûts de production et le poids, par exemple 10 € / Kg. Cette méthode est donc applicable seulement pour une certaine classe de produits qui ont une conception et des étapes de fabrication similaires. Dans la méthode du coût matière, le pourcentage du coût matière relativement au coût total du produit est déterminé à partir d'études statistiques, et utilisé pour faire une estimation [Wierda, 1988]. Si par exemple la part déterminée du coût matière est de 80 % du coût total produit, et le coût matière de la nouvelle conception est de 80 € alors le coût total produit est de 100 €. Cette méthode peut être utilisée seulement si la nouvelle conception satisfait les deux conditions suivantes : similitude dans la conception et la fabrication entre le nouveau produit et la classe des produits pour lesquels l'étude statistique a été faite et un coût matière prédominant

relativement au coût total du produit. Dans la méthode de la fonction coût, les variables potentielles ou les paramètres influents sont identifiés pour un groupe de produits (exemple : volume, formes générales, poids, procédé...), l'influence potentielle de ces paramètres est vérifiée par une analyse de régression.

Les modèles présentés dans cette section sont soit des modèles basés sur la subjectivité soit sur la comparaison et donc de fiabilité assez limitée. Bien que la méthode de la fonction coût considère des variables technico-économiques, elle pêche par l'aspect précision.

1.3.1.2 En phase préliminaire

Durant cette phase, les matériaux sont sélectionnés et les dimensions du produit sont spécifiées. Les décisions prises lors de cette phase ont un impact important sur le coût du produit. La précision se trouve entre – 15 et + 30 % [Creese et Moore, 1990]. Cette large incertitude peut être attribuée au manque d'informations concernant le process. L'estimation paramétrique ou analogique des coûts sont les méthodes généralement utilisées. Comme étant un développement de la méthode analogique, le raisonnement à base de cas (case-based reasoning CBR) peut aussi être employé.

A – La méthode paramétrique

La méthode paramétrique peut être considérée comme une variante de la méthode *fonction coût*, néanmoins, elle est plus détaillée et inclus plus de variables et d'expressions mathématiques dans ses analyses. Des Formules d'Estimation de Coût FEC (Cost Estimating Relationships CER's) lient des paramètres de coût (Euros ou Taux horaire), des paramètres physique ou de performance (volume, qualité, complexité, maturité de conception...) aux méthodes de production [Daschbach et Apgar, 1988].

Elle est basée sur l'utilisation de relations mathématiques établies à partir de données historiques et actuelles de l'entreprise. Supposons qu'un produit puisse être décrit par deux paramètres *P1* et *P2*. La relation peut être modélisée par une surface (figure 15). Lorsqu'on a fixé la valeur des paramètres *P1* et *P2* (x et y), on obtient un point A de la surface qui nous permet de trouver la valeur du coût A.

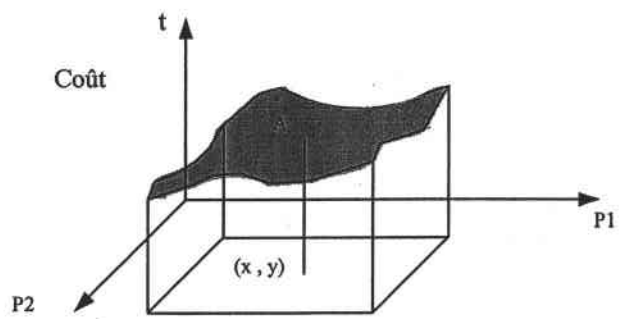


Figure 15. Schématisation de la méthode paramétrique

Les relations qui décrivent les surfaces sont construites par l'analyse statistique. Elles sont généralement de modèle polynomial, logarithmique, exponentiel, etc. Leurs coefficients doivent être étalonnés pour chaque contexte particulier de l'entreprise. Par exemple, une relation de type linéaire prendra la forme suivante :

$$T = K0 + K1.P1 + K2.P2$$

Ces relations sont fondées sur la collecte d'informations semblables en quantité suffisante de façon à être capable de déterminer s'il existe des corrélations entre une évolution du coût et les paramètres(figure 16).

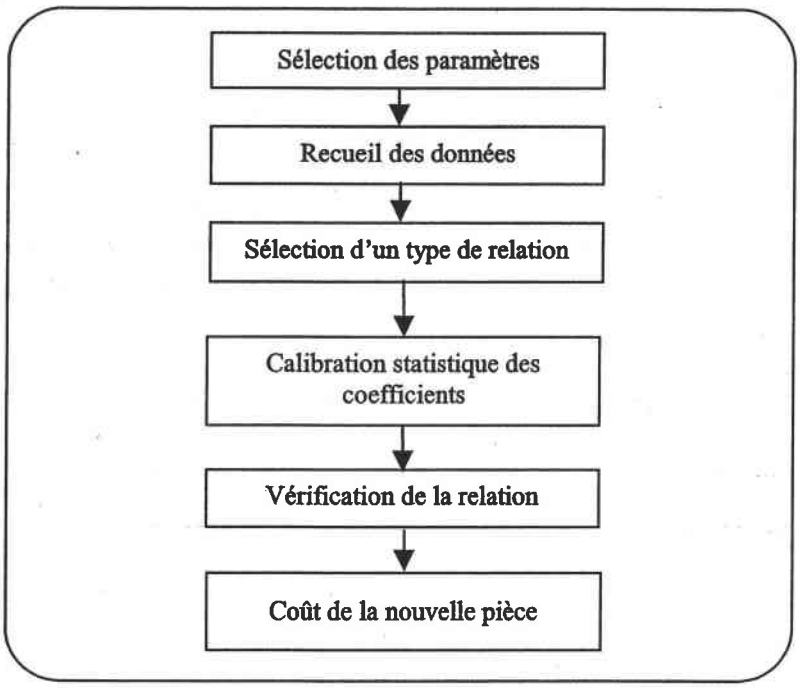


Figure 16. La méthode paramétrique

Le modèle d'implantation est le suivant (figure 17) :

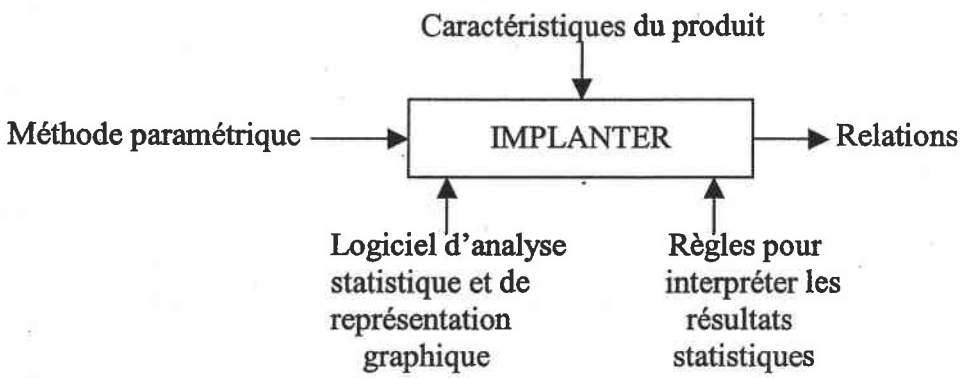


Figure 17. Implantation de la méthode paramétrique

Cette méthode peut s'appliquer à presque tous les domaines. Les éléments d'échantillon doivent être homogènes et ne diverger que par quelques variantes. Il faut déterminer une, voire plusieurs relations, par famille de pièces. La précision de cette méthode dépend de plusieurs facteurs qui sont la fiabilité des données historiques et actuelles, le bon choix des paramètres, le bon calibrage des relations.

Un intérêt « pratique » des méthodes paramétriques est qu'il existe un certain nombre de logiciels commercialisés permettant de les mettre en œuvre. Parmi ceux-ci, nous citerons le logiciel PRICE commercialisé par la société Price Systems et ses applications PRICE M pour les microcircuits, PRICE H pour la production mécanique, ou encore le logiciel COST + de la société 3f. Pour les travaux de recherche, nous citons la thèse de Thibaut Farineau [Farineau, 2001]

B – La méthode analogique

La méthode analogique peut être considérée comme une variante de la méthode de comparaison. Pour un nouveau produit, la méthode se base sur des données historiques et actuelles de l'entreprise. Elle permet de rechercher les anciens produits qui présentent le plus de similitudes avec le nouveau produit et permet de déterminer un coût ou un intervalle de coût. Cette méthode est basée sur une classification rationnelle et sur un codage des produits déjà réalisés dans l'entreprise. Le principe est que le coût des pièces évolue sensiblement en fonction de critères morpho-dimentionnels et de certains critères de la pièce tels que la qualité désirée.

Le système de classification est basé sur les concepts de la Technologie de Groupe (TG) [Burbidge, 1975], [Ham, 1982]. Les pièces sont groupées en familles sur les bases d'un classement en fonction des formes, des dimensions, des matériaux, des tolérances, des finitions, des quantités, etc. L'établissement d'une codification qui prenne en compte les paramètres par ordre décroissant d'influence sur le coût est donc fondamentale lors de la mise en œuvre de ce type d'estimation. Le concept de technologie de groupe a été développé par MITROFANOV en 1965, puis généralisé par H. OPITZ [Ham, 1982]. Dans les années 70, le CETIM a joué un rôle actif pour sensibiliser l'industrie française aux possibilités de la technologie de groupe, ce qui l'a amené à développer son propre code CETIM PMG [Vacossin & Padilla, 94].

Le principe est simple, il consiste en premier lieu à coder rapidement une pièce ou un ensemble de pièces (un code est une suite de digits, entre 9 et 32, dans laquelle chaque valeur de digit a une signification précise donnée par la méthode de codification). En deuxième lieu, on recherche parmi les pièces ou les ensembles existants déjà traités, ceux qui présentent des analogies. Le chiffrage s'effectue ensuite par comparaison et par interpolation (figure 18).

Dans le cas où aucune pièce similaire n'est trouvée, cette méthode n'apporte pas de réponse. Il est alors nécessaire d'utiliser une autre méthode.

Le code se compose de deux types d'informations : qualitatives et quantitatives. Les informations qualitatives sont des informations de type binaire (tout ou rien).

Exemple : pièce de révolution ou prismatique, pièce pleine ou pièce creuse, etc.
Les informations quantitatives sont des informations de type numérique, codées par plage.
Exemple : longueur de la pièce comprise entre 0 et 20 mm, entre 20 et 40 mm, etc.

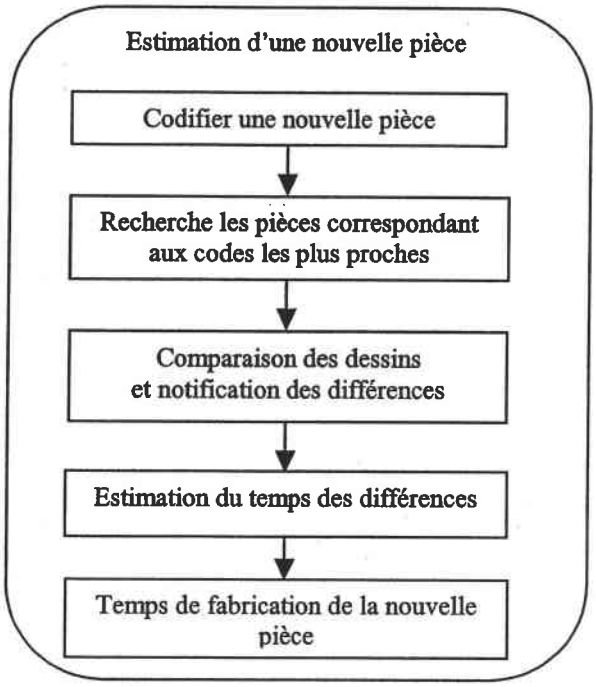


Figure 18. La méthode analogique

Une application de cette méthode est le logiciel DEVICODE commercialisé par le CETIM. Il fournit des chiffrages rapides des coûts des outillages de découpage-emboutissage. DEVICODE est d'abord un outil de recherche des affaires analogues avec une mémoire ou base de données propre à chaque entreprise. On peut citer encore le logiciel FERORG commercialisé par Hoffmann & Partner (Deutch) et le logiciel TDQ de MiCAPP (USA). Pour les travaux de recherche, nous citons le logiciel CA^{2}DI [Talbi *et al.*, 1999].

C – Le raisonnement à base de cas (case-based reasoning CBR)

Le raisonnement à base de cas (RàBC) est souvent considéré comme une formalisation et une évolution de la méthode analogique, rendue possible grâce à l'évolution des moyens informatiques. En effet le CBR est une technologie issue de l'Intelligence Artificielle offrant une nouvelle approche de la résolution de problème en se basant sur des situations passées. Ramarapu *et al.* [1997] définissent le cycle de base du CBR par « entrer un problème, trouver une situation passée similaire, l'adapter ».

Des études menées en psychologie cognitive permettent de justifier l'intérêt de cette méthode. En effet, on constate que la plupart des personnes améliorent leur capacité à résoudre des problèmes par leur expérience. Le raisonnement à base de cas suit les étapes élémentaires suivantes proposées par Slade [1991] (figure 19) :

- extraire les cas candidats pertinents (cas sources) à partir des caractéristiques du nouveau cas (cas cible),
- 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 en mettant à jour l'indexation des cas.

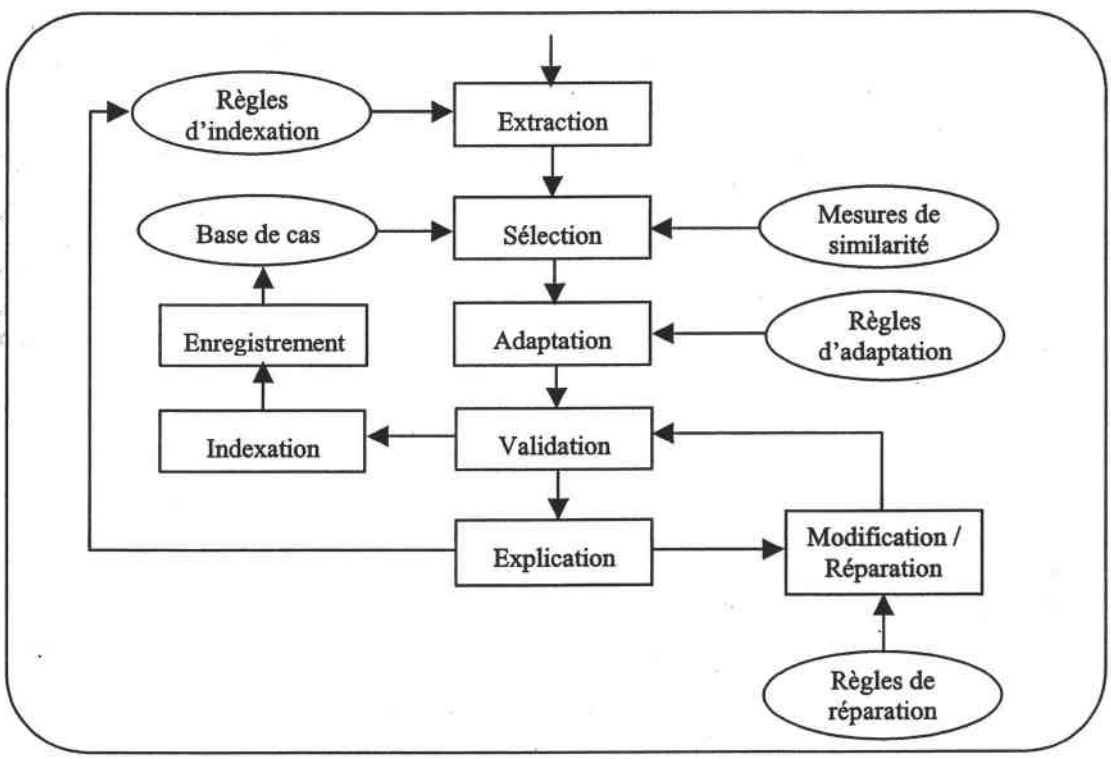


Figure 19. Processus du raisonnement à base de cas

Comme application de cette méthode, on notera l'existence du logiciel RECALL de la société Isoft, CASECRAFT et KATE Tools de la société Acknosoft. Pour les travaux de recherche, nous citons la thèse de Pascal Duverlie [Duverlie, 1996].

Les modèles paramétriques, analogiques et raisonnement à base de cas présentés dans cette section sont plus détaillés et logiques que ceux abordés dans la phase de conception précédente, par conséquent l'estimation est plus fine.

1.3.1.3 En phase détaillée

L'information disponible dans cette phase permet de faire une estimation de coûts plus détaillée que pour les deux phases précédentes. La conception est complétée avec toutes les définitions et les spécifications. La précision se trouve entre – 5 et + 15 % [Creese et Moore, 1990].

L'estimation analytique est la méthode généralement utilisée. Vu le temps et la compétence à mettre en œuvre pour cette estimation détaillée et précise, cette tâche est habituellement faite par une équipe dédiée, en l'occurrence le département d'estimation des coûts (un service d'estimation des coûts existe le plus souvent dans les grandes entreprises, voir ''les grosses PME'' de sous-traitance).

A – La méthode analytique

L'estimation analytique décompose le processus de production en un ensemble de tâches. Ces tâches sont elles-même décomposées jusqu'au plus bas niveau. Cette structure hiérarchisée des travaux est connue sous le nom WBS (Work breakdown Structure). Les coûts sont alors calculés pour les éléments les plus bas de l'arbre WBS puis additionnés au fur et à mesure qu'on remonte dans l'arbre, jusqu'à atteindre l'élément du plus haut niveau correspondant au coût total du produit. En d'autres termes, la méthode analytique consiste à décrire et à valoriser l'ensemble des opérations nécessaires à la réalisation du produit :

Coût de l'opération = EBOT * EGP

Avec EBOT = Elément de base d'ordre technique (ex : Kg de matière approvisionnée, temps de l'opération, etc)
EGP = Eléments généraux de prix applicables à l'opération (l'activité) considérée (coefficient, taux horaire, etc)

Pour ce faire, la méthode analytique utilise des données (EGP) issues des systèmes d'information comptable de l'entreprise. Les EBOT proviennent en grande partie du dossier de fabrication ou doivent être évalués, essentiellement pour les heures de machines ou ouvriers correspondant aux différentes étapes de réalisation du produit [Bellut, 1990] [Senechal, 1996]. Elle permet d'obtenir des résultats d'estimation très précis mais pas forcément justes. Ceci s'explique par le fait que les temps sont précis contrairement aux taux

de valorisation utilisés qui peuvent être faussés [Farineau, 2001]. L'utilisation de cette méthode demande un temps de calcul relativement lent.

On notera l'existence de divers outils utilisant la méthode analytique, parmi lesquels MAP-H de la société 3f, ICEQUOT de CRIF (France), COSTIMATOR de MT Manufactures Technologies (USA), On-Target de Viehmann Inc (USA) et CETIM Devis de CETIM. Pour les travaux de recherche, nous citons la thèse de Amar Seddiki [Seddiki, 1995].

1.3.1.4 Conclusion

Mise à part l'adéquation entre la phase du développement du produit et la méthode d'estimation choisie (figure 20), les performances des trois méthodes essentielles d'estimation de coûts (analytique, paramétrique et analogique)[4] sont difficilement comparables dans l'absolu. Elles ne peuvent être appréciées que dans un contexte industriel donné pour un type de produit défini. Une autre approche défendue par Hervé Lallemand consiste à combiner les méthodes entre elles en fonction du problème à traiter : « *il ne faudrait pas considérer les méthodes comme concurrentes mais bien complémentaires* » [Lallemand, 1998].

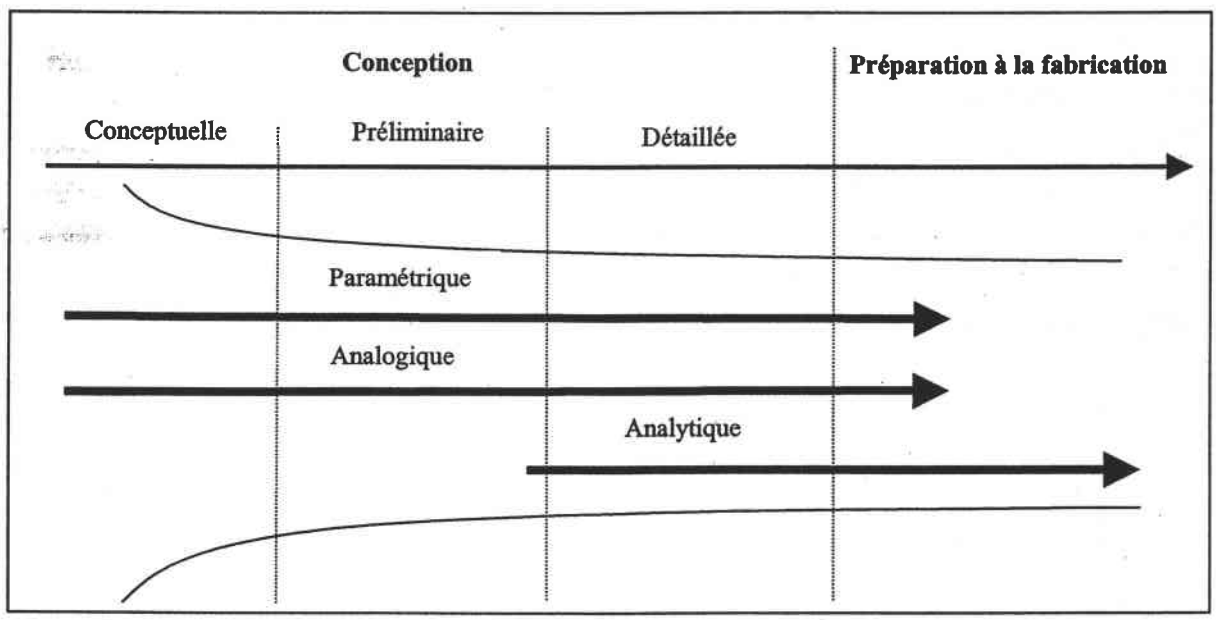


Figure 20. Adéquation entre la phase de développement du produit et la méthode d'estimation

Il est cependant possible de proposer des premiers éléments généraux de choix basés sur les critères suivants [METACOST, 1995] [Vacossin, 94] :

- Critère N°1 : temps nécessaire pour implanter la méthode dans une entreprise.

[4] Nous laissons de côté la méthode de raisonnement à base de cas qui n'a pas encore percé dans le domaine industriel

- Critère N°2 : rapidité de l'estimation.
- Critère N°3 : précision de l'estimation.
- Critère N°4 : flexibilité (robustesse aux changements)

Performance	Analytique	Analogique	Paramétrique
Implantation	+	-	-
Rapidité	-	+	++
Précision	++	+	+
Flexibilité	++	-	-

Tableau 2. Analyse comparative des méthodes d'estimation de coût

A la lecture du tableau 2, nous constatons que la méthode analytique est la plus polyvalente. Seule sa rapidité l'handicape et ne permet pas de la rendre universelle. Lorsqu'une base de données est suffisamment étoffée et que la réponse des estimations doit être rapide, il est préférable d'utiliser une méthode analogique ou paramétrique. Ces méthodes sont rapides et précises à condition d'estimer le coût d'une pièce dont les caractéristiques sont proches d'une pièce déjà réalisée.

On peut reprocher aux méthodes paramétriques et analogiques utilisées habituellement en phase de conception, le fait de fonctionner comme une boîte noire. C'est à dire qu'à partir de certaines caractéristiques du produit, on obtient seulement, en résultat, le coût total. On ne connaît pas l'origine de ce coût et cela a tendance à rebuter l'utilisateur. Elles souffrent d'un manque d'information sur la structure du coût, ce qui n'aide pas le concepteur pour des modifications éventuelles afin de réduire le coût.

1.3.2 L'estimation de coûts en devis

Dans le cas où le délai imposé ne permettrait pas d'établir un devis détaillé et que les propositions de prix doivent être remises très rapidement, l'entreprise applique les méthodes paramétriques ou analogiques.

Si les délais le permettent, le traitement est clairement séquentiel et analytique. Les bureaux d'études établissent un plan de conception. De ce plan, découle une nomenclature détaillée de toutes les matières et les pièces constituantes de la commande à exécuter. Chaque pièce porte un numéro de référence et il est indiqué si celle-ci doit être achetée à l'extérieur, fabriquée dans l'atelier ou donnée à un sous-traitant. Le bureau des méthodes émet ensuite, pour chaque pièce, une gamme de fabrication.

La gamme consiste à définir le processus et les spécifications de fabrication qui garantissent l'obtention des spécifications de conception. L'estimation de coûts se fait par application de la méthode analytique.

Coût de matière première = tarifs fournisseurs.
Coût de la main d'œuvre = temps alloué * taux horaire ouvrier.
Frais de fabrication = temps d'utilisation * taux horaire du poste de travail.

Ensuite, le commercial majore le coût de revient obtenu du bureau des méthodes pour tenir compte :

- de la couverture des frais de structure et des frais commerciaux (coûts indirects),
- du bénéfice escompté,
- des taxes sur le chiffre d'affaires (taux par rapport au chiffre d'affaires).

Si les fabrications sont suffisamment homogènes, un pourcentage global et unique peut être appliqué qui tient compte à la fois des frais de fabrication, des frais de structure et des frais commerciaux. D'une manière schématique, l'établissement d'un devis se présente dans ce cas de la façon suivante :

Coût Matière première.....	=	.....
Coût Main d'œuvre	=	.....
Taux de frais généraux (par rapport au Coût direct total).....	=	.....
Bénéfice escompté et incidence taxes	=	.....
Prix Total.....	=	.....

Dans ce cas de fabrication « homogène », le problème est simple. On prend comme base les frais « généraux », c'est à dire l'ensemble des coûts indirects ne pouvant pas s'imputer directement à une commande, d'une période de référence (l'exercice précédent). On détermine ensuite le pourcentage de ces frais par rapport aux coûts directs, c'est la méthode des coefficients (figure 21).

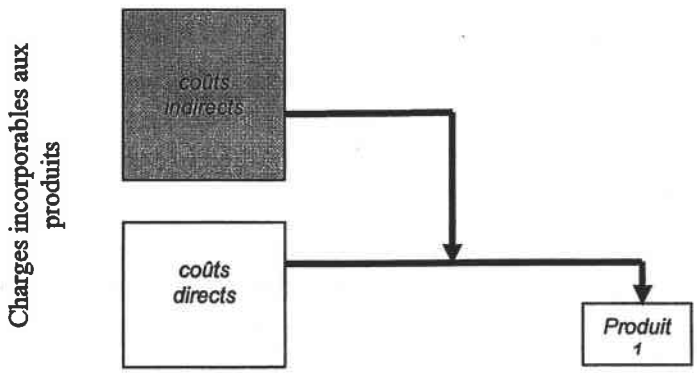


Figure 21. Ventilation des coûts indirects dans le cas d'une entreprise à produit unique

Par contre, dans le cas d'une entreprise aux fabrications différenciées « hétérogènes », ce qui est le cas de la majorité des entreprises actuelles, la difficulté consiste naturellement à déterminer les taux de frais. Faute de traçabilité des coûts indirects, les devis seront calculés en fonction des opérations directes valorisées aux taux standards des sections principales, les frais « généraux de structure » (sections auxiliaires) étant répartis au moyen de taux d'absorption aux sections principales, c'est la méthode des centres d'analyse (figure 22).

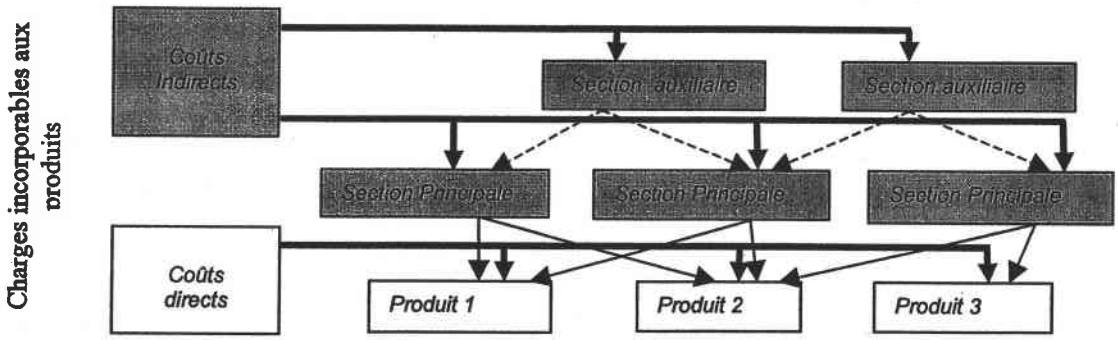


Figure 22. Ventilation des coûts indirects dans le cas d'une entreprise à produits variés

1.3.3. Conclusion

Indépendamment de la méthode d'estimation de coûts employée[5], en conception ou en devis, la mise en place d'un système de coûts dans l'entreprise doit tenir compte de deux classes de problèmes :

- La part des temps opératoires ou directement productifs, et donc directement évaluables et affectables au produit, a tendance à diminuer de manière importante (figure 23) au profit d'activités connexes (qualité, maintenance, logistique, préparation de la fabrication par exemple), que les entreprises n'ont pas fréquemment la possibilité de suivre avec autant de précision que les opérations de fabrication [Kieffer et Iarozinsky, 1994].

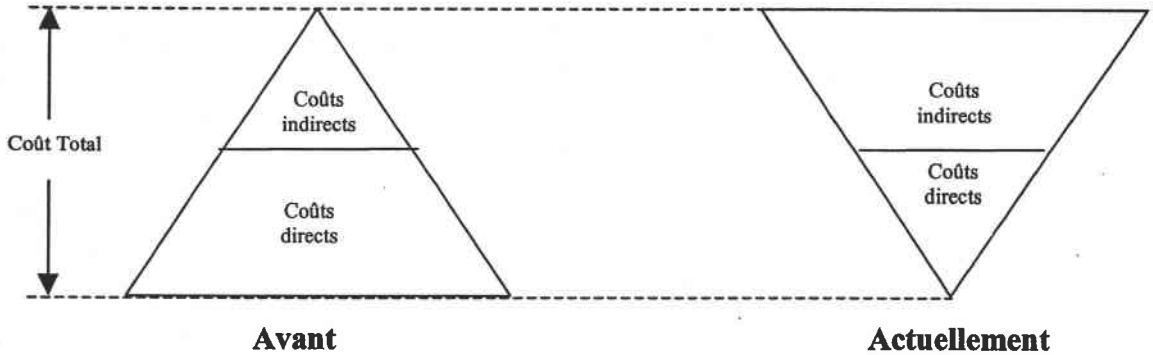


Figure 23. Inversion de prépondérance entre coûts directs et coûts indirects [H'mida *et al.*, 2001a].

[5] L'implantation de la méthode paramétrique ou analogique est basé sur un historique de coûts estimés analytiquement.

- La détermination des taux horaires des ressources est directement dépendante des clés de répartition des frais fixes et généraux issus généralement de calculs de comptabilité analytique dont les limites ont été analysées par de nombreux auteurs [Lorino, 1991] [Bouquin, 1997]. On peut ainsi, par exemple, discuter le caractère arbitraire, figé, et quelquefois artificiel des coefficients de ventilation des coûts des sections auxiliaires sur les sections principales, ou encore, dans le cas du ''Direct-Costing'' de la faible part des coûts directs dans le prix de revient des produits. « La comptabilité, théorique et pratique, traverse aujourd'hui une sérieuse crise d'identité. On s'interroge sur l'évolution qu'il faut faire subir aux standards comptables pour les rendre plus adaptés aux conditions économiques actuelles et à la mondialisation de l'économie » indiquent J.P.Helfer (Professeur à l'IAE de Paris) et J.P.Milot (Secrétaire Général du Conseil National de la Comptabilité) [Helfer et Milot, 1996].

L'évolution du couple Entreprise / Environnement et l'adaptation du système de coûts est le sujet de section suivante.

1.4 Impact de l'évolution Produit / Production / Environnement sur les systèmes de coûts

Dans le premier quart du siècle, l'arrivée des sociétés multi-produits, l'innovation dans les transports, dans les transmissions et les investissements massifs de la grande industrie, en générant d'importants coûts fixes, rendaient explicite le concept d'économie d'échelle et stimulaient par conséquent la formalisation du calcul des coûts. Durant ce premier quart de siècle, l'innovation en calcul de coûts la plus significative était le développement de la méthode des sections homogènes ainsi que la mesure du « retour sur investissement » (ROI ou RSI).

De 1925 à 1980, et mise à part l'approche Direct Costing (1957), il n'y a pas eu d'innovations majeures. Les avancées technologiques, la variété des produits et l'instabilité de l'environnement (figure 24), auxquelles on assiste depuis les années 1980, forcent les entreprises à repenser l'étendue des systèmes de coûts pour s'ouvrir à d'autres fonctions (conception–fabrication–production…), et à repenser le calcul des coûts indirects.

Les années 1980 et celles qui ont suivi ont été marquées par la stigmatisation des insuffisances, des limites, voire de l'absence de pertinence des approches traditionnelles de calcul de coûts issues de la comptabilité analytique.

Aux USA, certains auteurs, tels Johnson et Kaplan [1987] estiment que la décennie 1980 est celle de « l'obsolescence des systèmes de comptabilité de gestion ». Cooper [1990] juge que « le contrôle de gestion ne répond plus ». En France également, les systèmes existants essuient le feu de la critique. Ainsi, Evraert et Mevellec [1990] estiment que les méthodes traditionnelles ne satisfont plus les besoins de l'entreprise moderne et qu'en conséquence elles

doivent être sérieusement remises en cause. Ces critiques débouchent sur des propositions en faveur de méthodes alternatives. La méthode UVA (Unité de Valeur Ajoutée, Voir Annexe) [Fievez *et al.*, 1999], la méthode VAD (Valeur Ajoutée Directe) [Brodier, 1994] et la méthode ABC (Activity Based Costing) [Jonhson et Kaplan, 1987] se posent en remplaçant de la méthode du coût complet héritée des sections homogènes.

Le système de coûts véhicule un modèle implicite de l'entreprise et on devrait constater une cohérence entre les caractéristiques de l'entreprise (technologie, stratégie, structure, organisation) et la structure du système de coûts. A contrario, on peut imaginer que la crise actuelle des systèmes de coûts trouve sa source dans cette perte de cohérence.

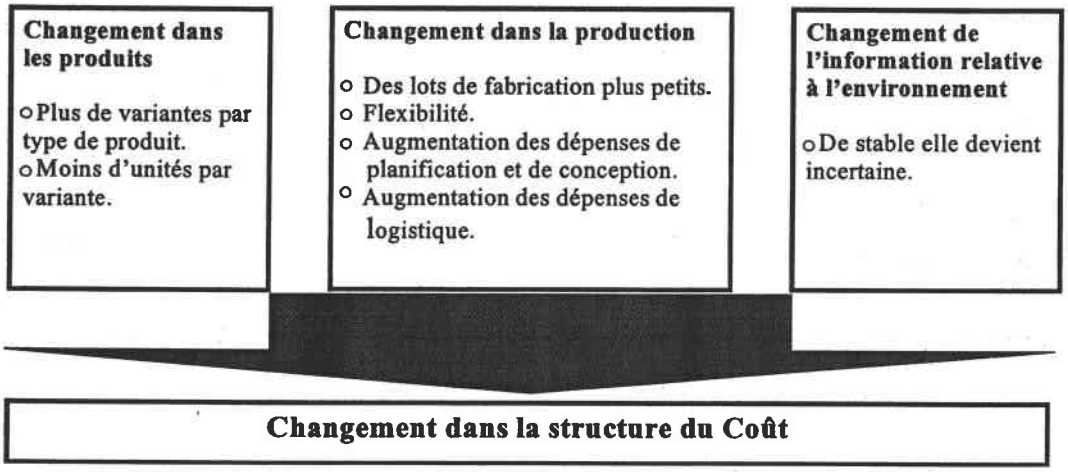


Figure 24. Les changements dans l'entreprise [H'mida *et al.*, 2001c]

C'est sous cet angle, celui de la cohérence entre l'entreprise et son système de coûts, qu'on examinera chacune des réponses apportées à l'évolution de l'entreprise et de son environnement. Notre thèse est qu'on peut distinguer quatre réponses importantes : l'homogénéité, l'activité, l'inducteur et le processus (figure25).

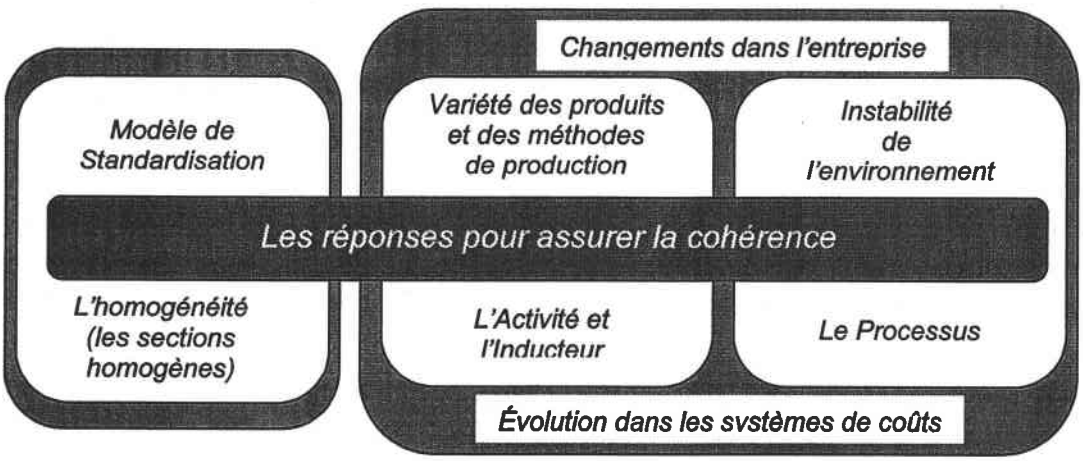


Figure 25. Les changements dans l'entreprise et les réponses correspondantes [H'mida *et al.*, 2001c]

1.4.1 Une réponse au modèle de standardisation : les sections homogènes

Initié sous le nom de taylorisme et mûri sous le nom de fordisme, le modèle de la standardisation se caractérise par une production de masse et en grandes séries. Celles-ci sont réalisées sur la base d'un processus de production séquentiel. Chaque séquence est faite en un lieu unique, par des moyens, matériels et humains, homogènes. L'articulation entre séquence est facilitée par des stocks tampons. La séparation est très nette entre le travail opérationnel, qui transforme la matière pour en faire des produits, et le travail fonctionnel qui prépare, coordonne et contrôle.

La méthode de calcul de coûts, adaptée à un tel contexte, consiste à imputer les coûts des sections auxiliaires (travail fonctionnel) aux sections principales (travail opérationnel) qui reçoivent leurs prestations (le coût de la maintenance est imputé par exemple aux ateliers ou aux machines et installation qui s'y trouvent) au prorata des unités d'œuvre consommées par ces autres sections, puis à distribuer entre les produits le total des coûts ainsi réunis. Le produit standardisé final est le réceptacle naturel de l'ensemble de ces coûts.

Un tel système de coût a été mis au point au tournant des années trente et largement diffusé au lendemain de la seconde guerre mondiale en France sous le nom de « méthode des sections homogènes ». Ce système, daté dans le temps et l'espace, s'est très rapidement heurté à deux problèmes majeurs :

- La structure budgétaire a pris le pas sur l'architecture de calcul de coûts, l'assimilation générale des centres d'analyse aux centres de responsabilité ne favorise pas la traçabilité des charges vers les produits. On conserve la mécanique héritée des sections homogènes mais on l'applique dans des centres de responsabilité qui n'ont que très rarement les caractéristiques de l'homogénéité. L'hétérogénéité des sections, combinée à la diversité des modes de consommation de celles-ci par les produits, conduit à de multiples subventionnements croisés entre produits.
- Les unités d'œuvre que l'on rencontre dans la pratique sont en nombre très limité. heures de MOD, heures de machines et Euros de chiffre d'affaires sont, avec la somme des charges directes, les bases les plus répandues d'allocation des charges indirectes. Outre la médiocre transcription qu'un choix aussi réduit peut donner du fonctionnement de l'entreprise, ces unités d'œuvre font des systèmes de calcul de coûts un système volumique. Dans la mesure où toutes les unités d'œuvre sont issues de la zone des charges directes, cela signifie que les charges indirectes sont allouées aux produits sur une base qui ne varie qu'avec le volume fabriqué ou vendu. Un produit fabriqué et distribué en grande quantité mais dont les spécificités sont stables, se verra attribué une part importante des charges indirectes tandis qu'un autre, dont la quantité est moindre, mais qui nécessite des manipulations et une logistique plus importante, consomme finalement plus de ressources.

1.4.2 Une réponse à la variété des produits et des méthodes de production : l'activité et l'inducteur

La recherche constante d'optimisation des systèmes de production par les entreprises, nourrie elle-même par l'hétérogénéité croissante de la demande, marque le passage du modèle de standardisation à un modèle où la variété (produit et production) est le mot d'ordre.

Le produit caractérisé par son contenu physique devient mixte en incorporant une part importante de services. Il se décline également en de multiples options. L'existence de ces options casse la logique volumique du modèle de la standardisation. Il n'y a plus d'égalité entre le volume de produits finis et le volume des différents sous-ensembles. On sort du modèle volumique de l'entreprise. Ceci ne pose pas de problèmes nouveaux pour ce qui concerne la consommation des ressources directes. Pour les autres consommations, le lien de causalité avec les produits devient complexe et la traçabilité devient de plus en plus difficile à assurer [Mévellec, 1994].

Les activités de support apparaissent de plus en plus déterminantes dans le mécanisme de production. La logistique et la gestion de production assurent la mise à disposition des produits, juste à temps. La qualité se gère et se maîtrise.

La construction d'un système de coûts dans un tel contexte mène à l'analyse *des activités*. Mais au lieu de distinguer clairement les activités sur la base de leur nature, (fonctionnelle et opérationnelle comme précédemment), la distinction s'opère sur la base de la nature du lien de causalité. On trouve les activités dans lesquelles la consommation de ressources est toujours expliquée par le volume de production des produits, et aussi les activités pour lesquelles le lien de causalité est à rechercher au sein des facteurs qui déterminent le niveau de consommation (*l'inducteur*). Ces activités disséminées dans toute l'entreprise assure la gestion de la complexité née de l'augmentation de la variété. En effet, beaucoup de coûts indirects sont générés par la complexité de la production et d'ailleurs, les petites séries peuvent en nécessiter relativement plus (changements d'outils et réglages de machines, coûts d'ingénierie, ordres de commande, ordres de réception, ordres d'emballage…).

La notion d'activité apporte une aide à l'identification des coûts, et la notion d'inducteur une réponse à leur affectation aux produits. L'introduction de ces deux notions marque la naissance de la méthode ABC *Activity Based Costing*. La technique de l'ABC, proprement dite, n'est apparue qu'en 1987 dans le chapitre 10 du livre de Johnson et Kaplan « Relevance Lost » [Jonhson et Kaplan, 1987]. Toutes les réflexions d'estimation de coûts menées actuellement autour du concept d'activité sont fondées sur un axiome de base, qui est « les produits consomment des activités, et les activités consomment des ressources ». Cette méthode peut logiquement s'interpréter comme une amélioration de la connaissance du coût des produits, un progrès vers l'exactitude.

1.4.3 Une réponse à l'instabilité de l'environnement de l'entreprise : le Processus

L'importance grandissante de la réactivité d'une entreprise est liée au changement dans la nature de l'information relative à l'environnement. De stable elle devient incertaine. Dans ces conditions, le temps devient une dimension fondamentale du mode de compétition. Il s'agit désormais de ré-envisager la gestion de l'ensemble des activités de l'entreprise de manière à les réorganiser constamment pour qu'elles soient à même de délivrer aux clients un couple produit-service doté du bouquet d'attributs auquel ces clients accordent une valeur.

L'incertitude de l'environnement conduit les organisations à un changement de logique de fonctionnement. Au lieu de reconfigurer les produits, à partir d'une organisation optimisée, en augmentant leurs variétés, les entreprises sont amenées à reconfigurer simultanément leur organisation et leur offre. Ce n'est qu'à cette condition qu'elles restent capables de faire face efficacement aux changements rapides des attentes des consommateurs et de l'environnement.

Cette réorganisation fréquente des activités conduit à ériger comme support au calcul économique les grands processus transversaux au sein de l'entreprise. Les processus, regroupant des activités dispersées au sein des différentes fonctions, sont le lieu d'élaboration de la valeur au sein de l'organisation. Face aux turbulences de l'environnement, ce sont eux qui vont réagir pour maintenir la capacité à produire de la valeur au sein de l'entreprise. En cas d'incapacité à faire face à la concurrence, l'entreprise peut être amenée à se séparer de certains de ses processus en sous-traitant à un partenaire plus efficace un élément de la chaîne de valeur qu'elle ne peut réaliser dans des conditions satisfaisantes. Citons deux illustrations de cette nouvelle logique. Hewlett Packard s'est séparé de son processus de montage en surface en faveur de l'un de ses sous-traitants pour des raisons de coûts. A l'inverse, Océ-Graphics a réintégré l'impression de ses notices techniques, jusqu'alors sous-traitées, pour des raisons de coûts et de flexibilité [Mévellec, 1994].

La compétitivité de l'entreprise se gagne et se maintient au niveau des processus majeurs, et pas seulement au niveau du produit. On peut dès lors imaginer un parallèle entre l'étude comparative (benchmarking) sur les processus en appliquant l'ABM Activity Based Management et l'étude des coûts de revient des produits.

Conclusion

L'évolution Produit / Production / Environnement montre qu'il n'existe pas de « meilleur système de coûts » en soi. La supériorité d'une architecture de calcul de coûts sur une autre ne peut être déterminée sur le plan technique. L'appréciation d'un système de coûts repose sur l'analyse de la cohérence entre le modèle implicite de l'entreprise qu'il véhicule et le modèle réel de fonctionnement de celle-ci. Structure, stratégie, environnement concurrentiel sont les facteurs qui configurent les systèmes de coûts pertinents.

1.5 Le management des coûts dans l'approche concourante

En matière d'organisation des activités de développement de produits nouveaux, une tendance majeure est le recours au parallélisme et aux approches d'ingénierie concourante. C'est une approche méthodologique qui intègre le développement simultané des produits et des processus associés, incluant la fabrication et le soutien logistique. L'ingénierie concourante remet en cause l'organisation séquentielle classique des activités de développement. Ce type d'organisation conduit à l'intervention des fonctions en aval dès les phases avancées du processus de conception, ce qui permet de mieux cerner les alternatives techniques globalement les plus performantes pour l'ensemble des parties concernées et donc de mieux gérer l'irréversibilité du projet.

1.5.1 Méthodologies d'estimation des coûts en conception

L'aspect estimation de coûts en approche concourante (figure 26) a reçue peu d'attention. Dans l'industrie comme dans la recherche universitaire, et jusqu'à récemment, « le coût a été traité historiquement comme une conséquence inévitable de la conception plutôt qu'une variable qui peut être managée pour contrôler la conception » [Asiedu et Gu, 1998].

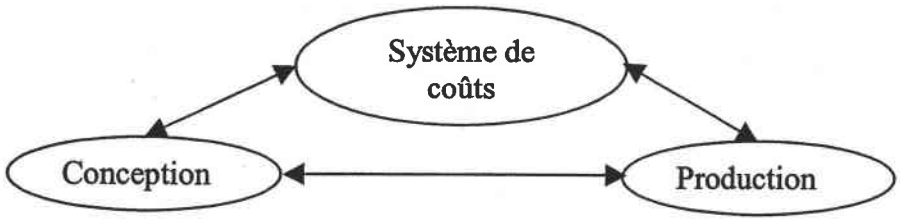


Figure 26. Flux d'informations pour le management des coûts

Les processus récents d'estimation et de management de coûts en phase de conception peuvent être classés en deux catégories : l'estimation de coûts orientée processus (process driven design) et l'estimation de coûts orientée client (market-driven-design). Dans ces deux processus, la conception est vue comme un processus itératif.

Les différentes méthodes d'estimation des coûts (analytique, paramétrique et analogique) vues précédemment se retrouvent insérées dans des dispositifs plus larges d'aide à la décision de conception, qui se traduisent par la mise en œuvre des méthodologies d'ingénierie de la valeur, QFD (Quality Function Deployment) dans le cas *d'estimation de coûts orientée client*, et du DFM (Design For Manufacturing) ou méthodologies classiques de gestion des projets (ordonnancement, contrôle des coûts...) dans le cas *d'estimation de coûts orientée process*. En matière d'évaluation économique, ces méthodes vont permettre de réduire le nombre de scénarios à envisager (arbitrages entre spécifications, délais et ressources) et de préciser progressivement les paramètres des scénarios retenus. Sans entrer dans les détails de chacune de ces méthodes, nous présentons rapidement les objectifs et les apports de l'analyse de la valeur, du QFD et du DFM en matière d'évaluation économique des choix de conception.

1.5.1.1 Processus d'estimation des coûts orientée processus (process driven design)

Une approche d'estimation orientée processus a été proposée par Ulrich et Fine [1990]. Elle consiste à répéter itérativement cinq étapes générales jusqu'au développement d'une conception à bas coût. La figure 27 illustre ce processus itératif : (1), le concepteur spécifie les attributs du produit. (2), la gamme de fabrication est développée en spécifiant les opérations nécessaires. (3), les ressources de fabrication nécessaires sont identifiées. (4), le coût de chaque opération est calculé en se basant sur les ressources nécessaires . (5), le concepteur utilise alors cette information sur les coûts soit pour modifier le produit, soit pour approuver la conception. Dans le cas d'une modification, le processus itératif est repris à partir de la première étape.

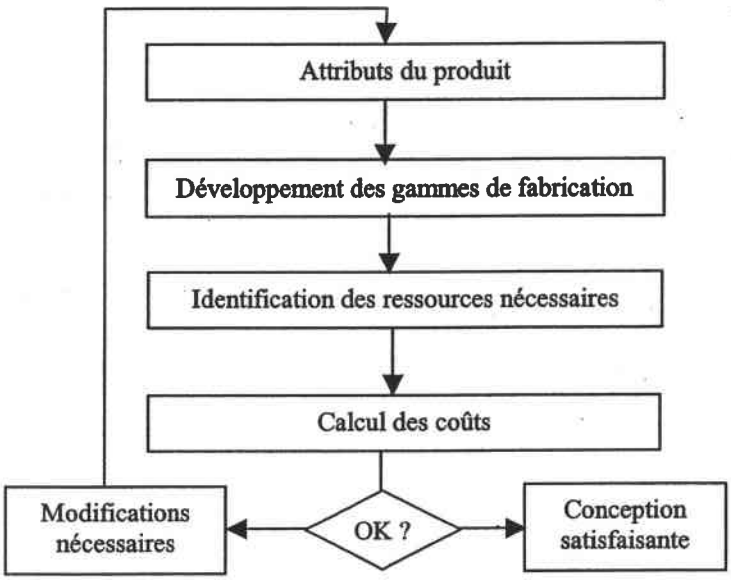


Figure 27. Approche itérative d'estimation de coûts orientée processus

DFM Design For Manufacturing

Dans l'organisation séquentielle de la conception et du développement de produits nouveaux, les problèmes de production ne sont soulevés qu'après que les ingénieurs aient conçu les pièces et testés les fonctionnalités des prototypes. Le *Design For Manufacturing* vise à prendre en compte des paramètres de production plus tôt dans les décisions de conception. Le DFM inclut en fait une grande variété de méthodes. De ce point de vue, le DFM peut s'analyser comme une des instrumentations mobilisables par l'ingénierie concourante.

Les solutions de conception doivent tenir compte des contraintes et capacités du processus de fabrication. Ces règles expriment des limites dans lesquelles opèrent les processus de fabrication, ces limites sont fixées par les contraintes de fabrication. Elles sont de différents types. Feng et Kusiak [1995] proposent la classification suivante (figure 28) :

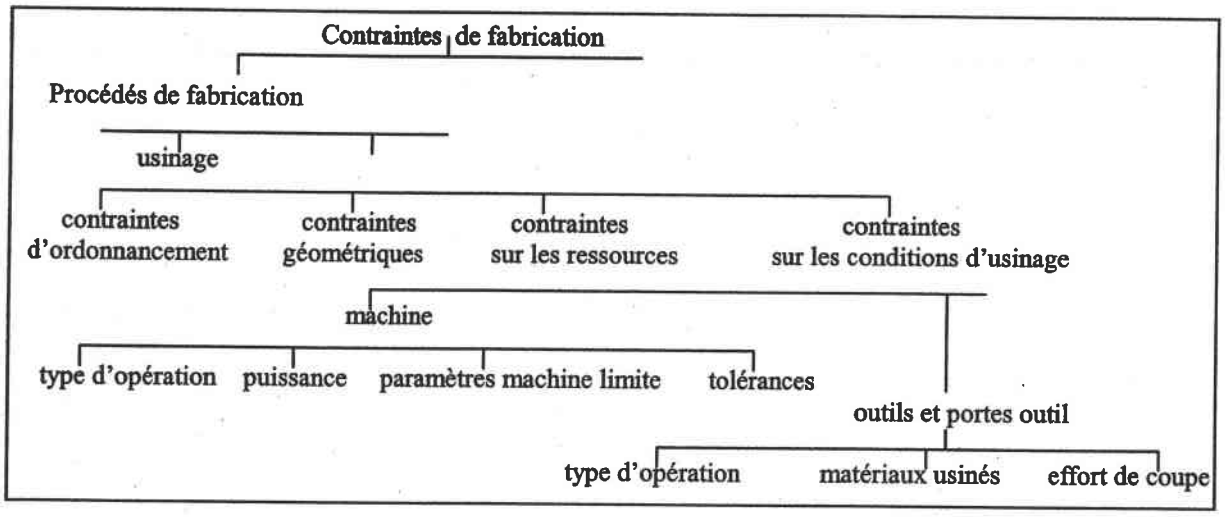


Figure 28. Classification des contraintes de fabrication [Feng et Kusiak, 1995]

L'analyse des contraintes dues aux machines-outils proposée par Feng et Kusiak permet de cibler différentes catégories de données pouvant influer la conception des pièces. Quelques exemples sont présentés ci-après :

- Contraintes de type opération : chaque machine a ses propres capacités d'opérations. Par exemple une fraiseuse ne pourra pas exécuter certains types d'opérations de tournage ou de rectification. La présence sur la pièce conçue de surface nécessitant des opérations de natures différentes impliquera nécessairement plusieurs posages et donc un coût plus important.
- Contraintes de paramètres machine limite : un de ces paramètres est la taille maximale de la pièce réalisable sur la machine. Ce facteur peut être une limite dans le dimensionnement de la pièce conçue. La prise en compte de cette contrainte est délicate car elle ne peut se limiter, dans la plupart des cas, à une simple information sur la taille limite des pièces admissibles. Pour envisager correctement l'adéquation dimensionnelle entre la machine et la pièce à usiner, il faut disposer d'une modélisation cinématique fine de la machine (du type de celles employées en robotique) et analyser l'adéquation entre un espace constitué de l'ensemble des entités à usiner et un espace attaché à l'outil utilisé pour chaque opération d'usinage.
- Contraintes de tolérances : chaque machine-outil a ses limites en termes de tolérances réalisables (capabilité machine). Généralement, le concepteur répartit les tolérances sur les pièces à partir d'une condition fonctionnelle. Il en découle certains degrés de liberté sur le choix des tolérances qui devraient permettre de prendre en compte les capacités des machines-outils envisagées pour la réalisation de la pièce. Elles permettent aussi par la suite d'ordonnancer les opérations pour obtenir une gamme complète.

Ces règles de conception permettent d'établir une enveloppe dans laquelle le processus de fabrication est capable d'atteindre les exigences de conception.

La méthodologie DFM (figure 29) n'est pas seulement centrée sur la réduction du coût des éléments individuels mais peut s'élargir pour prendre en compte la réduction du coût des assemblages, *Design For Manufacturing and Assembly ou DFMA* [Boothroyd, 1982]. Cette dernière repose sur des principes de réduction du nombre de pièces et des principes d'orientation et d'insertion des différentes pièces pour faciliter les opérations d'assemblage.

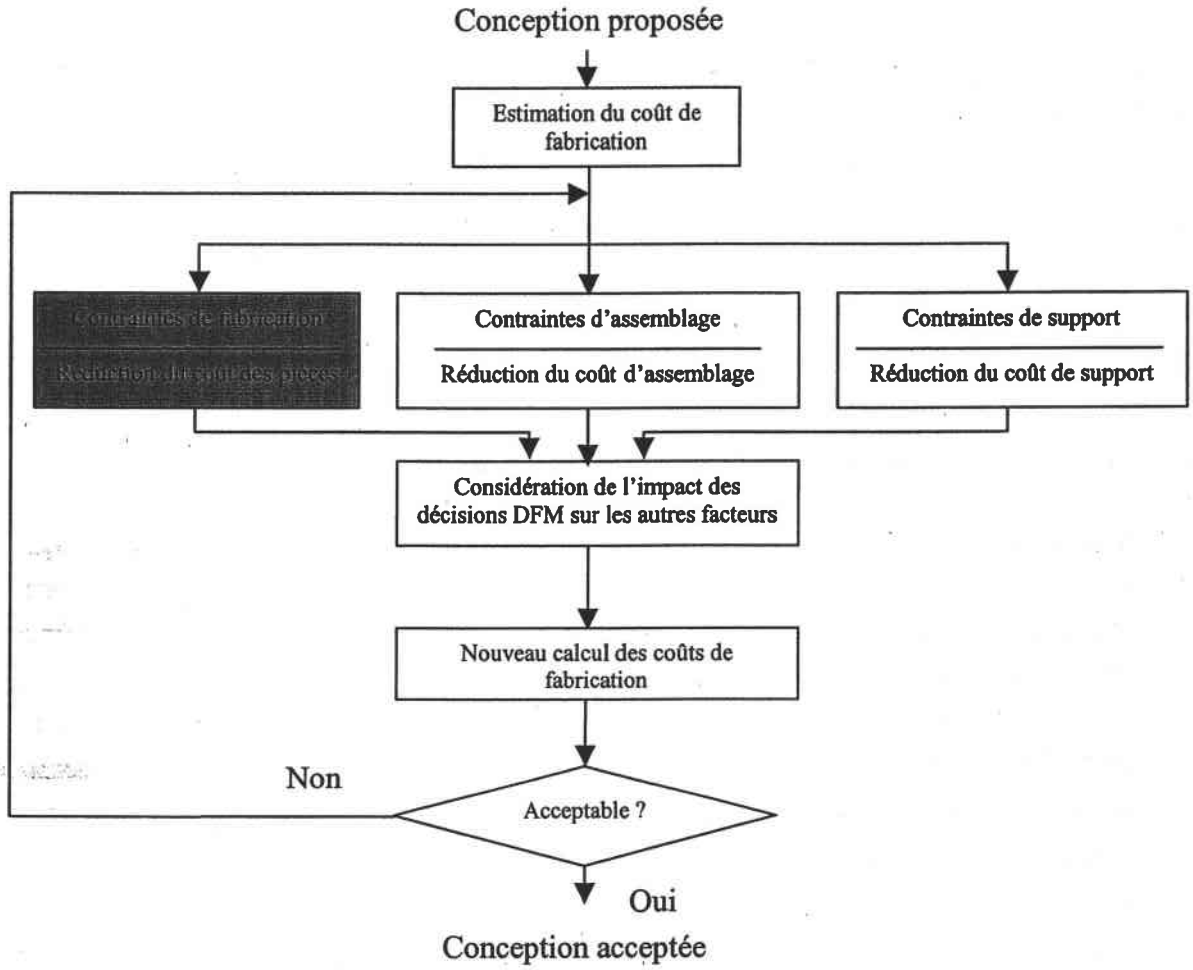


Figure 29. Design For Manufacturing and Assembly (DFMA)

1.5.1.2 Processus d'estimation des coûts orientée client (market driven design)

Contrairement au processus d'estimation des coûts orientée processus, Hiromoto [1988] propose que le processus de conception inclus des mesures issues du marché (conception à coût objectif). Suivant cette approche, c'est le marché qui détermine le prix que le client est prêt à mettre. Le coût cible, « the target cost », est calculé en dégageant la marge bénéficiaire désirée du prix fixé par le client. Cooper et Slagmulder [1997] définissent le *target costing* comme « une approche structurée pour déterminer le coût auquel un produit donné, comportant des fonctionnalités et un niveau de qualité spécifiée, doit être fabriqué pour générer un niveau de profitabilité défini lorsqu'il est vendu à un certain prix de vente anticipé ». En phase de conception, l'ingénieur estime les coûts et les compare avec le coût cible. Si une différence existe, le concepteur discute avec les responsables des fonctions en

amont pour améliorer soit le processus de fabrication, soit la conception pour réduire cette différence de coût. Le cycle continue jusqu'à atteindre le coût cible, proposition de conception, estimation des coûts, calcul de différence, analyse de la valeur, et re-conception. Cette approche d'estimation de coûts orientée client est présentée par la figure 30. Notons que le *target costing* s'insère dans un dispositif plus large de réduction des coûts qui se traduit par la mise en œuvre du *Kaizen costing*[6].

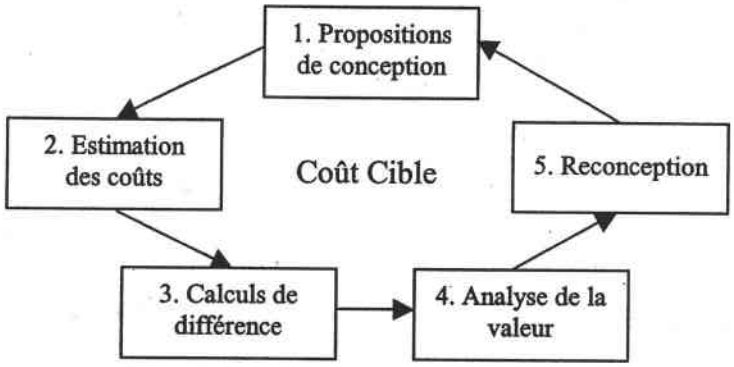


Figure 30. Approche d'estimation de coûts itérative orientée client

Analyse de la valeur

L'AFNOR (Association Française de Normalisation) définit l'analyse de la valeur comme « une méthode de compétitivité, organisée et créative, visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur par une démarche spécifique de conception, à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire » (Tableau 3).

Besoin	Exigence fondamentale qui nécessite la création du produit. C'est l'expression du juste nécessaire.
Fonction	Est définie comme le rôle caractéristique d'un produit ou les services qu'il rend. Peut s'exprimer par l'ensemble des services que le produit rend à son utilisateur en répondant à son besoin.
Coût	Le coût d'un produit est l'ensemble des dépenses engendrées pour l'obtenir (production) et pour le vendre (distribution). L'Analyse de la Valeur s'intéresse essentiellement aux premières.
Valeur	La notion de valeur ne répond pas uniquement à la valeur d'échange que possède l'argent. Par exemple, pour un utilisateur, elle est déterminée par : - son degré d'utilité (valeur d'usage) ; - sa qualité en fonction de l'utilisation (valeur utile).

Tableau 3. Analyse de la valeur

[6] *Kaizen* (Costing) : Méthode de penser dite du «progrès continu» basée sur le refus de l'état actuel des choses et la recherche permanente d'améliorations (réduction de coûts).

Le point clé de la méthode est l'analyse fonctionnelle de l'objet. Celle-ci débouche sur la rédaction du cahier des charges fonctionnel qui exprime les fonctions de service que doit remplir le produit pour répondre aux besoins de l'utilisateur et respecter les contraintes liées à l'utilisation du produit. Après la détermination des fonctions, l'objectif est d'estimer le coût des différentes fonctions déterminées pour orienter la recherche ultérieure d'économies. Les différentes solutions envisageables font l'objet d'une évaluation à partir de critères techniques (fiabilité, maintenance, interchangeabilité, délais d'introduction...) et de critères économiques (coûts d'études, coût des outillages et investissement de production spécifiques, coût de production unitaire...), l'objectif final étant la rentabilité du produit.

La méthodologie permet ainsi d'expliciter le coût de solutions de conception envisagées et de lier aux fonctionnalités et donc, de manière indirecte, aux prix de vente du produit nouveau. L'ingénierie de la valeur (méthodologie de l'analyse de la valeur en phase de conception et développement d'un produit nouveau) apparaît comme un des outils qui peut être employé dans une approche de *target costing*, permettant de faire le lien entre le prix de vente du produit nouveau et son coût. Comme le soulignent Kato *et al.* [1995], les analyses issues de l'ingénierie de la valeur permettent de rapprocher progressivement le coût estimé du produit nouveau de son coût-cible, déterminé par les conditions du marché.

La méthodologie de l'analyse de la valeur connaît cependant deux limites [Gautier & Giard, 2000] :

- Tout d'abord, elle retient une vision particulière du temps (estimation du coût et de la « valeur » d'une fonction à un instant donné) qui n'est pas celle du cycle de vie du produit ;
- Ensuite, dans le cadre de la conception modulaire[7], les concepteurs peuvent doter un module de surcapacités fonctionnelles pour optimiser le nombre de cas d'emploi du module. Ce type d'hypothèse rentre difficilement dans le cadre d'une analyse de la valeur.

QFD Quality Function Deployment

Le Quality Function Deployment vise à être une méthodologie globale et systématique de planification de la conception pour comprendre et intégrer le point de vue du consommateur. Elle fournit une aide à la décision structurée et graduelle pour traduire la « voix du consommateur » (sous formes d'attributs critiques) en cible de conception (sous formes de spécifications) et points clés de maîtrise associés aux caractéristiques du produit ou de vérification associés aux procédés de fabrication. La méthode utilise un ensemble de matrices

[7] Une stratégie modulaire tire parti des avantages de l'architecture modulaire des produits. Un produit modulaire est un produit complexe, dont les différents éléments ont été conçus indépendamment, mais fonctionnent ensemble comme un tout homogène.

pour organiser l'information (figure 31). L'outil central de la méthodologie du *QFD* est la matrice de la qualité ou « maison de la qualité » [Hauser et Clausing, 1988] :

- La première étape consiste à répertorier les « Quoi » ou les attributs critiques des consommateurs : on peut définir des attributs individuels ou des catégories d'attributs homogènes (coût, forme, fiabilité...). Chaque attribut est pondéré en fonction de son importance pour le consommateur (appel à l'analyse de la valeur pour pondérer les fonctions) ;
- La deuxième étape permet d'établir les « Comment » ou les caractéristiques critiques qui induisent la performance du système. Ces caractéristiques décrivent une pièce ou le produit dans des termes mesurables et doivent être directement reliés aux attributs critiques pour le consommateur (les quoi). Les caractéristiques critiques figurent en colonne.
- La troisième étape consiste à remplir les différentes intersections de la matrice : chaque cellule représente le lien potentiel entre un attribut critique (un quoi) et un caractéristique critique (un comment). Ce lien est spécifié par la relation entre l'attribut et le paramètre et la force du lien. Suivant les connaissances de l'équipe, des valeurs spécifiques peuvent être affectées à la relation.

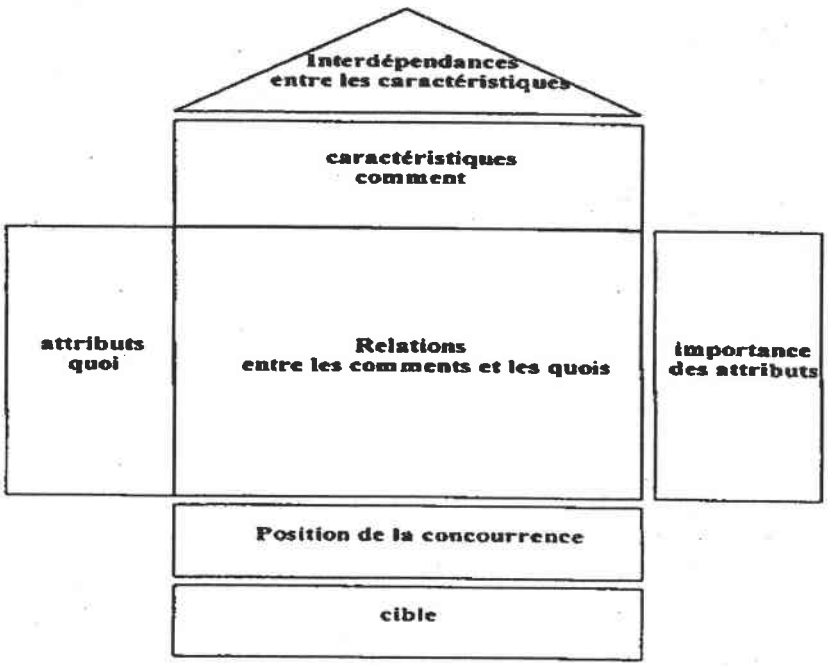


Figure 31. La maison de la qualité selon QFD

L'objectif est de mettre en place des efforts permettant d'établir des relations claires entre les processus de production et la satisfaction du consommateur. Il est en effet possible de construire de nouvelles matrices faisant le lien entre les paramètres techniques et les opérations physiques de production. Cette approche conduit à un ensemble de matrices :

- la matrice de la qualité qui fait le lien entre les attributs des consommateurs et les caractéristiques techniques de conception ;
- la matrice des déploiement des composants, qui fait le lien entre les caractéristiques techniques et les caractéristiques des composants ;
- la matrice de planification des processus qui établit le lien entre les caractéristiques techniques des composants et les caractéristiques des processus clés ;
- la matrice de planification de la production faisant le lien entre les processus clés de la production et les exigences de la production.

Ces quatre matrices reliées permettent de traduire progressivement les attributs souhaités par les clients en paramètres de conception puis en opérations de production. La mise en œuvre des différentes matrices de la méthodologie joue un rôle d'explicitation de l'information qui nourrit les modèles d'évaluation économique. Les modèles d'évaluation économique permettent alors de simuler les conséquences du choix des paramètres techniques sur le niveau de performance économique du projet.

1.5.2 L'évolution de la fonction Devis

Dans la gestion de chaîne logistique (supply chain), le jeu de négociation structuré par les échanges de propositions s'appuie sur le devis (délai, coût) qui constitue un indicateur opérationnel majeur de la performance de la relation inter-entreprise ou fournisseur-donneur d'ordres [Monteiro, 2001].

Quand un client (ou donneur d'ordres) demande un devis à une entreprise (ou fournisseur) pour un produit non-standard, il est intéressé principalement par les réponses aux trois questions suivantes :

- C1. Pouvez-vous fabriquer ce produit ?
- C2. Quel sera le prix ?
- C3. Quand la commande pourra-t-elle être livrée ?

Du point de vue de l'entreprise, les questions ci-dessus doivent se transformer aux trois questions associées suivantes :

- E1. Est ce que l'entreprise peut fabriquer le produit économiquement et efficacement ?
- E2. Quel sera le coût de production ?
- E3. Quel sera l'impact de la commande sur l'organisation et le planning du système de production ?

Donc, avant de répondre à un devis, l'entreprise doit chercher à trouver des réponses aux questions E1, E2 et E3. La fiabilité du devis dépendra de ces trois réponses.

Spécifiquement, pour répondre à E1, des méthodologies pour évaluer la fabricabilité du produit sont nécessaires ; pour répondre à E2, des méthodes d'estimation de coûts rapides et précises sont indispensables ; pour répondre à E3, une connaissance du processus de fabrication du produit et du planning du système de production est obligatoire. Ces trois réponses sont interdépendantes, l'application de méthodologies capables de faciliter leurs interactions sera une avancée vers la fiabilité des devis.

L'émergence des nouvelles technologies de communication (internet, intranet) et des technologies sectorielles intégrées (CFAO, GPAO, PDM...) offre des opportunités pour le développement de nouvelles méthodes de traitement de devis qui permettent non seulement une réponse rapide mais aussi une évaluation intégrée de la fabricabilité, des coûts et de l'impact d'une commande sur la production.

Dans un système intégré, le premier module assure l'évaluation des données d'entrées du client pour les valider et le cas échéant demander des compléments d'information, ainsi que pour vérifier la fabricabilité du produit. Le deuxième module estime le coût. Le troisième module fait appel aux informations concernant le planning de la production, la disponibilité des machines et les processus de fabrication alternatifs du produit pour évaluer l'impact potentiel du lancement du produit sur le système de production [Halevi, 1999]. Une telle analyse permettra de déterminer le délai réaliste de livraison de chaque processus alternatif de fabrication du produit, ainsi qu'une base de comparaison et de négociation du rapport Coût / Délai. L'entreprise peut considérer des options multiples, par exemple la gamme N°1 coûtera moins chère que la gamme N°2, mais le produit sera livré plus tard à cause de l'utilisation d'une machine goulet.

Veeramani et Joshi, [1996] proposent le système intégré de traitement de devis présenté dans la figure 32. Le système comporte les modules : interface de communication, évaluation des entrées utilisateur, estimation rapide des coûts, estimation de la date de livraison, établissement du devis et entrée de la commande ferme. Le système est aussi intégré avec les modules associés aux fonctions de planification et de fabrication de sorte que les informations concernant la flexibilité du système de production et l'état actuel des ordres de fabrication peuvent être utilisées au niveau stratégique pour la détermination du meilleur prix et date de livraison, et au niveau tactique pour la détermination dynamique du meilleur processus de production. Les auteurs préconisent ce cadre intégré de traitement de devis permettant au commercial d'examiner l'état actuel des ordres de fabrication et de négocier avec le client le meilleur rapport coût/délai, plutôt que les systèmes basés sur les temps et les coûts standard.

Wong *et al.* [1996] proposent à travers une application sur l'industrie de fabrication de mobilier de bureau, un système intégré de traitement de devis nommé QUESTER ouvert aux clients et accessible par internet. Un modèle CAO permet aux clients de modifier les

dimensions du produit choisi suivant leurs besoins. Une fois les modifications validées, le système génère le prix correspondant et la date de livraison.

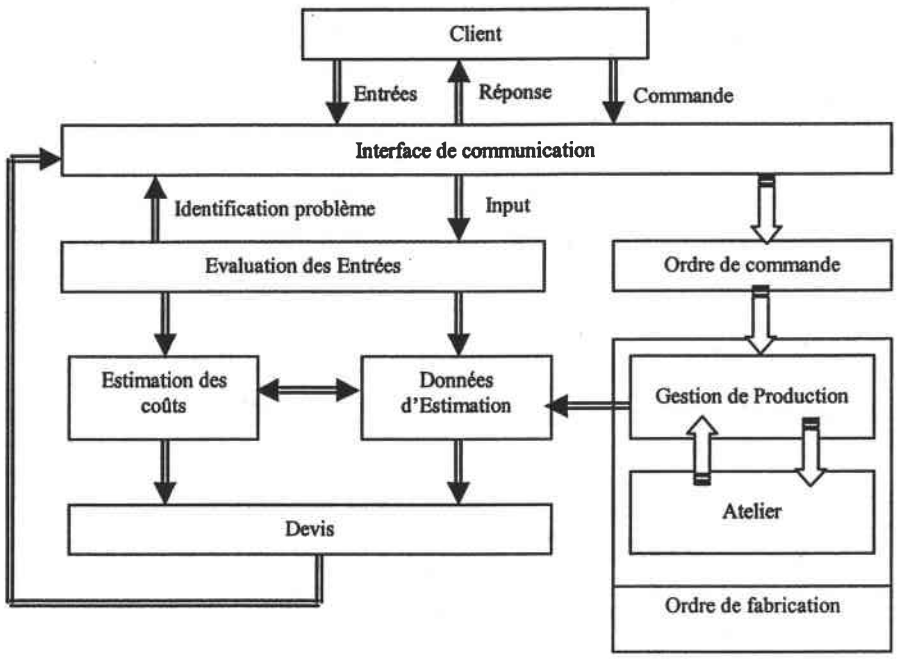


Figure 32. Un cadre intégré de traitement de devis [Veeramani et Joshi, 1996]

Aujourd'hui, les systèmes d'information intégrés permettent d'alléger l'organisation liée à la préparation et à la négociation des devis pour gagner en efficacité et en temps, grâce à une bonne maîtrise des données techniques tenant compte des options et variantes.

1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons rappelé la définition d'un système de coûts. Son étendue et sa fiabilité se mesure par sa capacité à assurer la traçabilité des ressources, à identifier les causalités des consommations et à cerner les responsabilités. Nous avons présenté les deux fonctions stratégiques de performance économique : la Conception et le Devis. Ensuite, nous avons décrit les différentes méthodes employées, par ces deux fonctions, pour mesurer les coûts.

La deuxième partie du chapitre a porté sur l'impact de l'évolution du triplet produit / production / environnement sur les systèmes de coût. Nous avons distingué quatre éléments de réponses : l'homogénéité, l'activité, l'inducteur et le processus. En matière d'organisation des activités de développement de produits nouveaux, nous avons souligné le recours au parallélisme et aux approches d'ingénierie concourante, offrant le passage de la mesure au management des coûts. Il apparaît donc une émergence de nouveaux besoins en terme de modèles et outils pour l'estimation des coûts dans un contexte d'ingénierie intégré marqué par la croissance des coûts indirects.

Dans le chapitre suivant, nous exposons les objectifs du cadre d'estimation des coûts proposé. Nous définissons le concept Entité Coût et le principe du modèle d'estimation des coûts permettant d'associer étroitement les variables techniques (entités de fabrication) et les variables économiques (Entités Coût).

Chapitre 2

Le cadre d'estimation des coûts : Objectifs, Concepts et Principes de base

2.1 Introduction

Les entreprises évoluent dans un monde de compétition où elles cherchent à se positionner sur des marchés prometteurs. Face à cette concurrence technico-économique, la maîtrise et la connaissance des coûts d'un produit n'est pas seulement un atout mais une obligation. Il y va de la survie des entreprises.

Les limites des méthodes actuelles d'estimation des coûts abordées au chapitre précédent montrent le besoin d'imaginer de nouvelles approches, capables de répondre au contexte et aux impératifs industriels actuels de manière plus fine et plus précise.

Dans ce chapitre, nous exposons les concepts et les principes de base de la méthode proposée. Nous commençons par présenter les objectifs de l'approche dans un cadre d'ingénierie intégrée et dans le contexte actuel de croissance des coûts indirects. Ensuite, nous détaillons la définition du concept d'*Entité Coût*. Ce dernier, pivot de notre approche, encapsule l'expertise d'estimation de coût relatif à une activité ou une opération bien déterminée indépendamment de sa nature (directe ou indirecte). Enfin, nous expliquons notre principe pour établir un modèle d'estimation des coûts associant les variables techniques (entités de fabrication) et les variables économiques (entités coûts) relativement au produit à estimer.

2.2 Objectifs de l'approche

L'objectif du cadre d'estimation de coût proposé est de fournir une assistance à l'élaboration de devis en production mécanique et une aide à la décision au niveau de la conception. Ce cadre doit être en adéquation avec la nouvelle organisation de l'entreprise, dite d'ingénierie intégrée, toute en prenant en compte l'importance grandissante des activités indirectes.

2.2.1 L'intégration de l'estimation des coûts

L'estimation des coûts est un vecteur peu exploité dans les objectifs d'intégration dans les entreprises, d'autant plus que les avancées réalisées en ingénierie intégrée offrent un cadre d'application de partage de cette connaissance.

Grâce aux progrès de l'informatique, l'accès aux données techniques s'élargit. Cela permet d'avoir à disposition des informations quantifiées qui peuvent être utilisées pour l'estimation des coûts. L'idée est d'obtenir les coûts en cernant au plus près les caractéristiques techniques de la production.

D'une estimation centralisée des coûts et réalisée par des spécialistes (vision taylorienne), l'objectif est de passer, pour augmenter la réactivité, à l'idée d'une estimation des coûts décentralisée. Pour ce faire, il faut fournir à l'ensemble des intervenants dans le cycle de développement d'un produit des signaux et des informations suffisamment clairs et puissants pour que chacun puisse agir de manière pertinente sur les coûts locaux tout en ayant conscience des effets transversaux de son action. C'est le rôle d'un dispositif visant l'organisation et le traitement de l'information économique et physique propre à l'organisation.

Dans cet esprit, notre objectif est d'associer étroitement des variables techniques (les entités de fabrication) à des variables économiques (entités de coût). L'ensemble de l'information se présente alors comme un outil d'aide à la décision économique pour des intervenants aussi variés que le concepteur, le deviseur ou le gammiste, leur permettant ainsi d'orienter leurs décisions et d'évaluer leurs choix.

2.2.2 Capitalisation des connaissances relatives à l'estimation des coûts

L'estimation des coûts est une activité fortement cognitive qui repose sur un vaste ensemble de connaissances (sciences de gestion et sciences d'ingénierie) et un profond savoir faire.

La capitalisation des connaissances dans une organisation a pour objectif de favoriser la croissance, la transmission et la conservation des connaissances de cette organisation [Steels, 1993]. Elle nécessite la gestion des ressources de connaissances de l'entreprise afin de faciliter leur accès et leur réutilisation [O'Learny 1998].

Barthès *et al.* [1999] définissent la *« mémoire d'entreprise »* comme la *« représentation explicite, persistante, et désincarnée, des connaissances et des informations dans une organisation »*. Elle peut inclure par exemple, les connaissances sur les produits, les procédés de production, les clients, etc. Comme l'illustre la figure 33, le but est de *« localiser et rendre visible les connaissances de l'entreprise, être capable de les conserver, y accéder et les actualiser, savoir comment les diffuser et mieux les utiliser, les mettre en synergie et les valoriser »*.

Aujourd'hui, dans la diversité des activités d'une entreprise, l'expertise d'estimation des coûts est, en réalité, émiettée entre tous les acteurs. Les connaissances détenues par les employés sur leur activité constituent un capital « immatériel » qu'il convient de gérer pour des fins d'estimation des coûts. L'intérêt pour une entreprise de capitaliser ce savoir-faire du domaine est de le rendre accessible à tous les intervenants du cycle de vie du produit, du concepteur au deviseur. Les motivations de la capitalisation de cette connaissance peuvent être diverses :

- éviter la perte du savoir faire après retraite ou mutation,
- exploiter la cartographie des connaissances de l'entreprise à des fins stratégiques,
- améliorer la circulation de l'information et la communication dans l'entreprise,
- intégrer cette expertise avec les différents savoir-faire de l'entreprise.

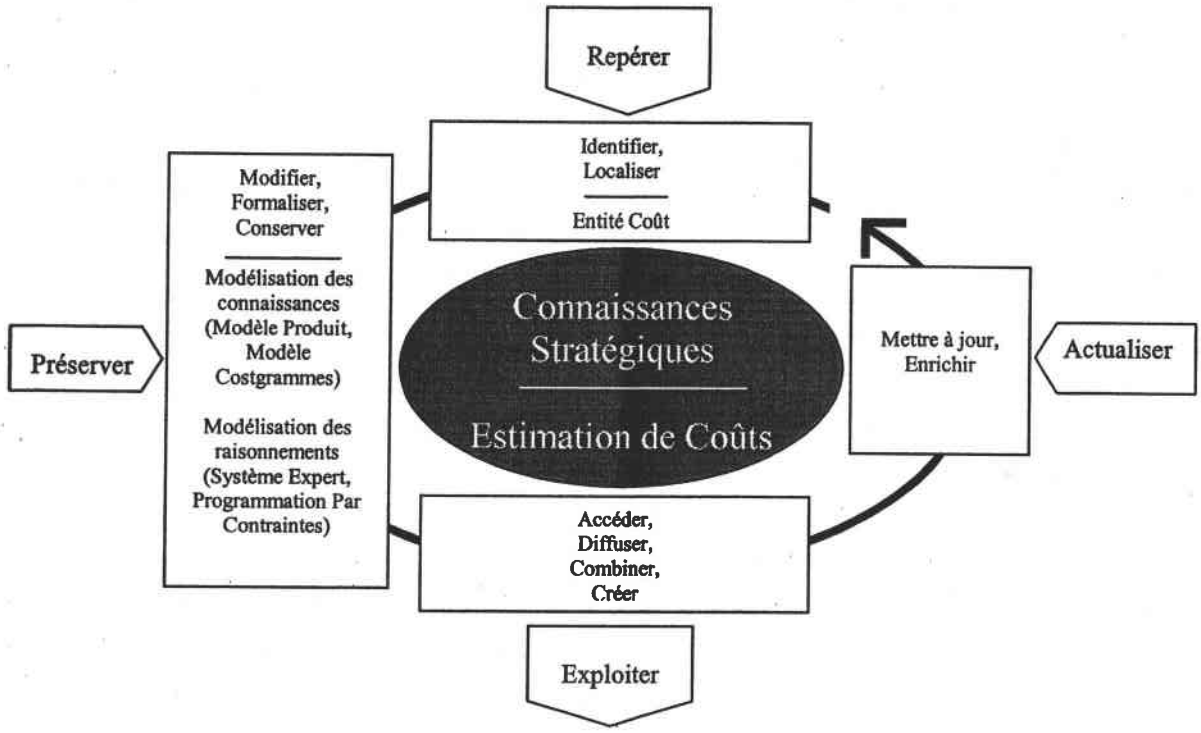


Figure 33. Mécanisme de capitalisation de connaissances d'estimation de coûts

Dans la figure 33, nous présentons les étapes nécessaires à la capitalisation des connaissances connues sous le nom de cycle 3AI [Barthès *et al.*, 1995]. Les concepts et les outils employés dans le cadre de notre thèse (estimation des coûts) sont précisés dans la deuxième partie des noms des boîtes apparaissant dans la figure.

2.2.3 La diversité des objets de coût

La pertinence que peut apporter une réflexion sur les coûts dans l'entreprise ne doit pas se limiter à améliorer les modalités de calcul des coûts de revient des produits. Elle doit englober aussi d'autres objets de coût pour lesquels des responsables de l'entreprise souhaitent une information économique. Il peut s'agir du coût :

- des activités spécifiques à un type de clientèle,
- des activités consommées par un client spécifique,
- d'une activité prise individuellement (exemple : la qualité),
- des activités spécifiques à un type d'entités de fabrication,
- etc.

Le deviseur cherche à connaître le coût total du produit tandis que le concepteur est plutôt intéressé par le coût spécifique de certains choix techniques.

2.2.4 Minimiser la répartition des coûts indirects

Les entreprises manufacturières actuelles sont caractérisées par un gonflement des coûts indirects (figure 34). Ceux-ci présentent, désormais, une part importante du coût total du produit et ils doivent, par conséquent, être pris en considération au même titre que les coûts directs.

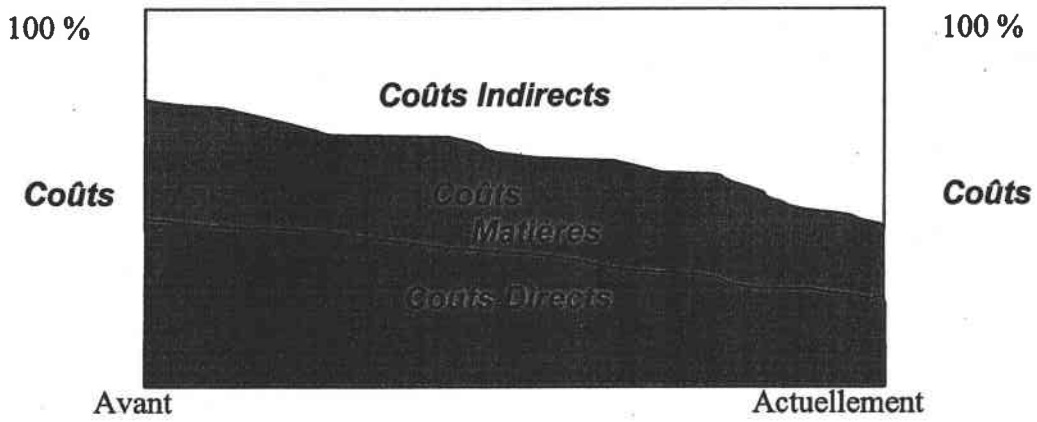


Figure 34. Croissance des coûts indirects

Ce changement dans la structure des coûts fausse les méthodes traditionnelles d'estimation. Celles-ci évaluent le coût de production d'un produit sur la base de la main d'œuvre et des matières premières (c'est à dire des coûts directs). Les coûts indirects, liés aux activités en amont, en aval et de support à la production, ne sont imputés qu'ensuite à chaque produit en fonction de clés de répartition issues de la comptabilité analytique très peu pertinentes.

Minimiser l'estimation des coûts indirects avec les méthodes traditionnelles est un des objectifs fixés dans notre thèse. Nous pensons que certains coûts considérés jusqu'alors comme indirects peuvent être estimés de la même façon et avec une méthode analogue que celle utilisée pour les coûts directs. Ils deviennent par la suite directement affectables aux produits, sans passer par les méthodes de répartition. On peut seulement réduire les estimations des coûts indirects mais on ne peut pas les éliminer ou les ignorer (coûts indirects réels) (figure 35).

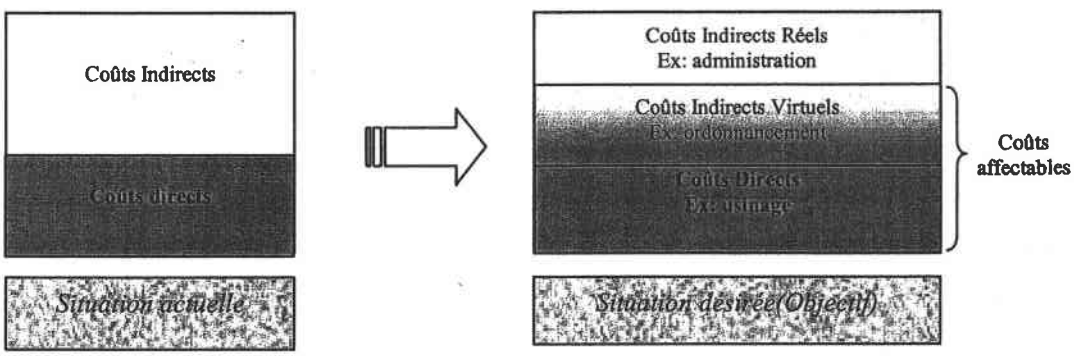


Figure 35. Coûts affectables [H'mida *et al.*, 2001e]

Les coûts non pris en considération (coûts indirects réels) par notre étude représentent les coûts liés au fonctionnement de l'entreprise. Ce sont ceux qui ne sont imputables ni aux produits ni aux clients, c'est à dire ceux liés à la direction générale, à la comptabilité financière, au conseil d'administration, aux études à long terme, etc. N'étant pas imputables et affectables par nature, ils seront répartis.

Le critère retenu pour la classification des coûts indépendamment de leur type (direct/indirect, fixe/variable) est la *traçabilité*. Pour nous, la traçabilité s'apparente à la propriété d'un coût d'être affectable au produit. Tout coût ayant cette propriété est intégré dans notre système d'estimation ; le reste, réduit au minimum, est laissé aux méthodes conventionnelles et au système de comptabilité analytique propre à l'entreprise (figure 36).

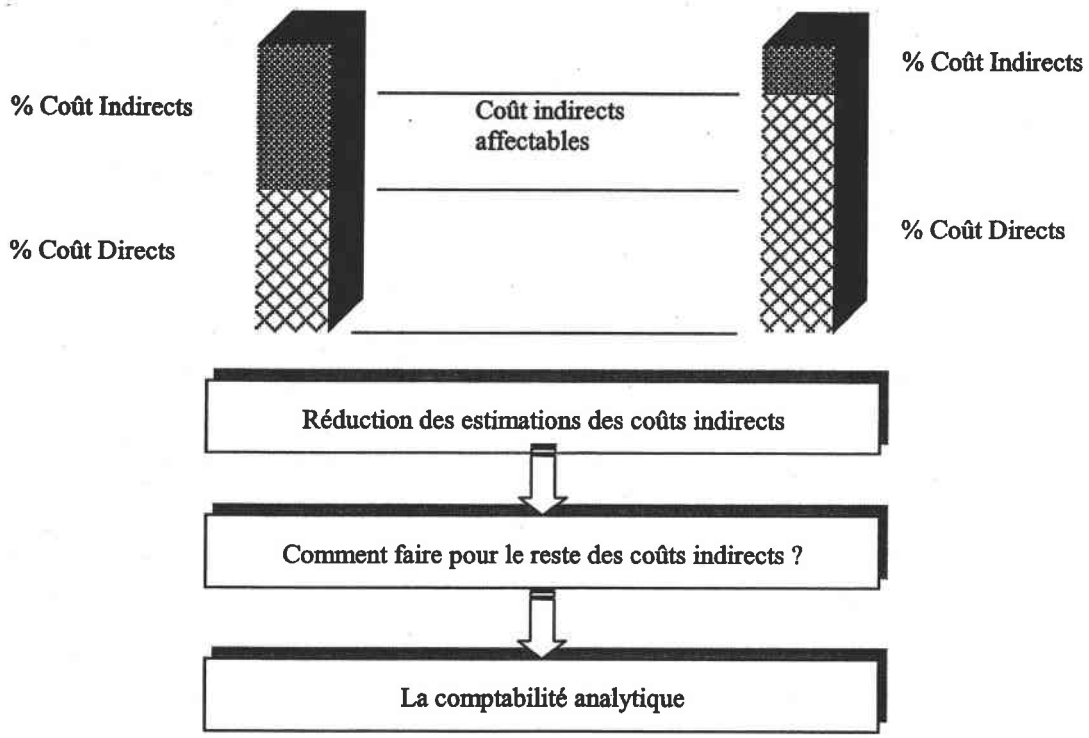


Figure 36. Réduction des estimations des coûts indirects

Une analyse minutieuse des charges de l'entreprise, analyse dont le but est de rendre directe la quasi-totalité de ces charges est nécessaire. Par exemple, la main d'œuvre est une ressource directe. L'analyse lui imputera non seulement les salaires du personnel concerné, mais également toutes les charges dont le personnel est à l'origine, qu'elles soient sociales (médicine préventive), fiscales (quote-part de la taxe professionnelle) ou organisationnelles (coût du service du personnel). Cette minutie doit être étendue à toute imputation possible des charges de l'entreprise.

2.3 Concept de base de l'approche : L'Entité Coût (EC)

En s'inspirant des méthodes ABC (*Activity Based Costing*) et des Centres d'Analyse (Comptabilité analytique), nous proposons le concept « Entité Coût ». Précisons d'emblée la condition de validité de ce concept que nous allons illustrer par un exemple.

Définition : *Une « Entité Coût » est un groupement de coûts associés aux ressources consommées par une activité. La condition fondamentale de cohérence du concept repose sur l'homogénéité des ressources consommées par l'Entité Coût, ce qui permet de leur associer un inducteur.*

L'Entité Coût est traversée par deux flux d'information (figure 37). Le premier, d'ordre physique, est relatif aux objets d'entrée et de sortie. Le deuxième est d'ordre économique (inducteur-coût). Ces deux flux sont supportés par une activité et par l'ensemble des ressources qu'elle consomme.

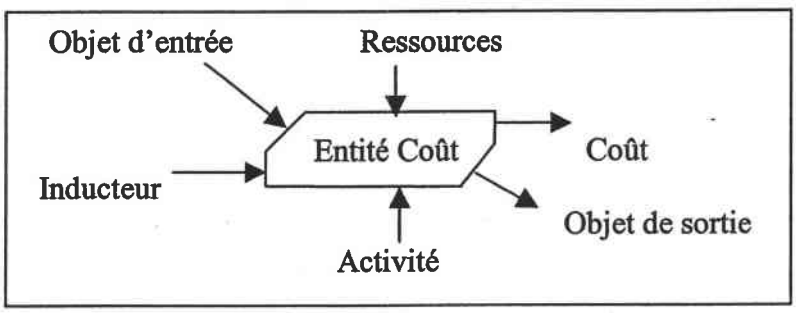


Figure 37. Représentation de l'Entité Coût

La définition de l'Entité Coût est à rapprocher de celle de *l'entité* au sens du génie mécanique du groupe PRIMECA [Tollenaere, 1998]. La distinction réside essentiellement dans le fait que notre point de vue est centré sur l'aspect économique et organisationnel.

Pour PRIMECA, une entité est définie comme : *« Un groupement sémantique (atome de modélisation) caractérisé par un ensemble de paramètres, utilisés pour décrire un objet indécomposable manipulé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et l'utilisation des produits et des systèmes de production »* [Tollenaere, 1998].

Les ressources : Des ressources homogènes sont des ressources stables et solidaires. Stables si le taux d'imputation euro/X (euro/mn, euro/Kg,...) de chaque ressource ne change pas selon le produit traité. Solidaires si elles sont consommées dans la même proportion les unes que les autres quel que soit le produit qui les déclenche.

Exemple : L'activité A consomme les ressources *R1, R2* et *R3*. Deux produits *X* et *Y* passent par l'Entité Coût *EC1* avec deux cas de données de ressources (homogènes et non homogènes) par unité de produit et suivant les données du Tableau 4.

Ressources Homogènes

	Main-d'œuvre R1 (mn)	Fournitures R2 (Kg)	Machine R3 (mn)	Coût total
X	30	8	60	
Y	45	12	90	

	Main-d'œuvre (mn) 3 €/min	Fournitures (Kg) 5 €/Kg	Machine (mn) 2 €/min	Coût total
X	30*3 = 90	8*5 = 40	60*2 = 120	
Y	45*3 = 135	12*5 = 60	90*2 = 180	

	Main-d'œuvre (mn) Inducteur : minute machine	Fournitures (Kg)	Machine (mn)	Coût total
X	30	8	60	
Y	45	12	90	

Ressources non Homogènes

	Main-d'œuvre R1 (mn)	Fournitures R2 (Kg)	Machine R3 (mn)	Coût total
X	10	8	60	
Y	45	12	90	

	Main-d'œuvre (mn) 3 €/min	Fournitures (Kg) 5 €/Kg	Machine (mn) 2 €/min	Coût total
X	10*3=30	8*5= 40	60*2=120	
Y	45*3 = 135	12*5 = 60	90*2 = 180	

	Main-d'œuvre (mn) Inducteur : minute machine	Fournitures (Kg)	Machine (mn)	Coût total
X	10	8	60	
Y	45	12	90	

Tableau 4. Exemple de ressources homogènes et non homogènes

Dans le Tableau 4, on voit que considérer les trois éléments de coût en bloc (c.à.d associer un même inducteur) dans le cas des ressources non homogènes conduirait à « subventionner » *Y* au détriment de *X*, c'est-à-dire à sous-estimer le coût de *Y* au détriment de celui de *X* et ce, dans une proportion qui dépend de celle des produits *X* et *Y* dans l'entité coût *EC1*.

L'activité : C'est un concept utilisé dans beaucoup de méthodes d'analyse et de modélisation aussi bien en génie industriel qu'en sociologie ou en économie. De nombreuses définitions de l'activité ont été proposées dans la littérature, en privilégiant souvent un ou plusieurs points de vue particulier.

Porter fait d'une activité une entité fonctionnelle. Concevoir, fabriquer, commercialiser, distribuer et maintenir un produit s'effectuent à l'aide de ces activités [Porter, 1986]. Chaque activité, indépendamment de son importance apparente, concourt à la création de valeur et peut créer un avantage ou un désavantage par rapport à la concurrence. Cette décomposition que l'entreprise fait de l'ensemble de ses activités est matérialisée par la « chaîne de la valeur ». Pour Cooper et Kaplan, la sélection est simple. Toutes les activités de l'entreprise interviennent de la fabrication à la livraison des produits et des services. Elle doivent être toutes prises en compte dans les coûts [Cooper et Kaplan, 1989]. Lorino définit une activité comme un ensemble de tâches et d'actions réalisées par un individu ou une équipe et ayant un comportement cohérent du point de vue des coûts et des performances [Lorino, 1991]. Pour Vernadat, une activité est l'accomplissement d'une tâche. Il s'agit en général d'une séquence d'opérations devant être exécutée en totalité par une ou plusieurs ressources et ceci dans un temps donné pour réaliser la tâche spécifiée [Vernadat, 1999].

Le concept d'activité présente un intérêt certain dans une démarche d'analyse de coûts et de construction d'indicateurs de performance. Pour ce qui nous concerne, nous nous reconnaissons dans toutes ces définitions sous réserve de l'homogénéité des ressources consommées par l'activité.

L'inducteur : le terme inducteur résulte de la terminologie associée à la méthode ABC. De nombreux auteurs utilisent le terme « inducteur de coût » au lieu d'inducteur d'activité. Il existe cependant une différence fondamentale entre les significations de ces deux termes, et un sens particulier est également donné au terme d'inducteur de ressource. Précisons la signification de ces différents termes.

Bescos et Mendoza [1994] donnent une définition précise de chacun de ces termes :

- Un *inducteur d'activité* (Activity Driver) est une unité d'œuvre permettant de répartir les coûts des activités entre les productions d'une entreprise (exemple : heures de main d'œuvre directe, nombre de séries fabriquées, nombre de commandes, type de clientèle servie, etc.).
- Un *inducteur de coût* (Cost Driver) est un facteur influençant le niveau de performance d'une activité et sa consommation de ressources (exemple : la qualité des matières premières reçues par un atelier de fabrication, formation et expérience d'une équipe de consultants, etc.).
- Un *inducteur de ressource* (Resource Driver) est une clé de répartition utilisée pour ventiler les coûts des ressources entre les activités (exemples : nombre d'heures consacrées à chaque activité pour la répartition des salaires).

Les inducteurs d'activités et de ressources sont utilisés pour le management des activités et par la suite des coûts (figure 38).

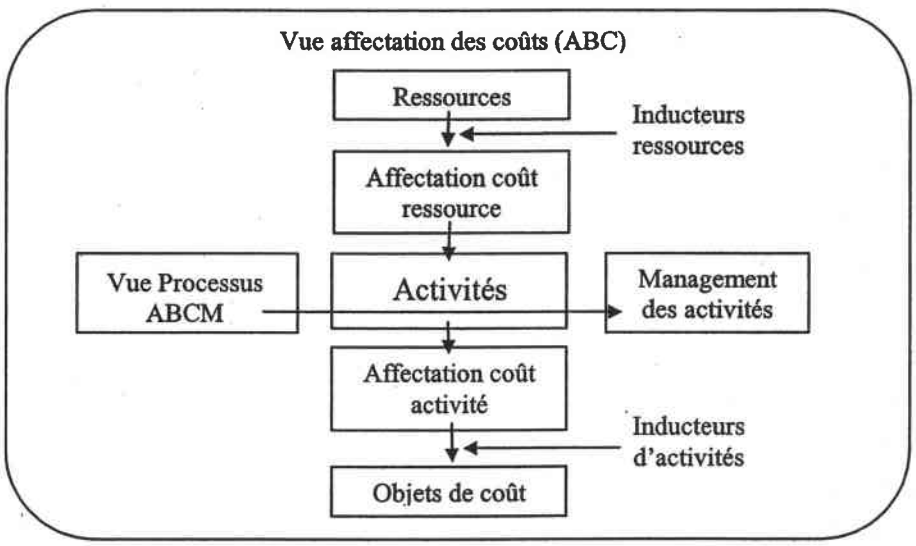


Figure 38. Rôle des inducteurs d'activité et de ressources (Méthode ABC/M)

Les inducteurs de coût permettent d'évaluer les différentes conditions de mise en œuvre des activités, il sont donc utilisés pour le management des performances.

Le concept d'inducteur d'activité, qui est présenté comme le facteur de causalité de l'activité, est souvent désigné comme un des apports originaux de la méthode ABC. Il est exact que la recherche des liens de causalité marque la spécificité de cette méthode, sa base conceptuelle est de justifier les événements par leurs causes originelles, et non de constater simplement les effets. Cependant, il reste proche de la notion d'unité d'œuvre (comptabilité analytique) en ce sens qu'il est utilisé aussi comme clé de répartition du coût de l'activité entre les objets de coût (produits, service...). Il existe, dans la littérature de gestion, un certain flou qui introduit la confusion entre ces deux mesures. Certaines situations concrètes permettent de choisir comme une unité d'œuvre de l'activité ce qui est également l'inducteur d'activité. Il est clair que dans ce cas précis, il n'y a que des avantages à choisir cette mesure unique. Il n'en va pas de même pour toutes les situations. Bouquin [1997] précise qu' une unité d'œuvre peut être un inducteur d'activité s'elle déclenche l'activité, mais une unité d'œuvre, en tant que telle, n'a aucune prétention à la causalité, elle n'est qu'une variable en corrélation avec les coûts (figure 39).

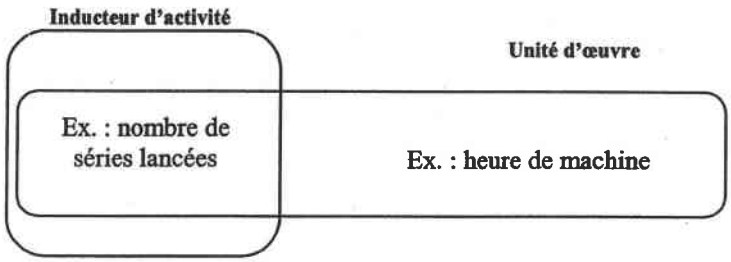


Figure 39. Inducteur et unité d'œuvre [Bouquin, 1997]

De notre point de vue, distinguer l'inducteur d'activité et l'unité d'œuvre ne veut pas dire qu'il ne peuvent pas co-exister dans le même système de coûts. Pour une activité indirecte, l'inducteur paraît plus pertinent pour répartir le coût de l'activité entre les objets de coût. Il facilite la gestion de l'architecture des activités et, par voie de conséquence, d'intervenir sur les causes des coûts. Par contre, pour une activité directe, l'emploi de l'unité d'œuvre peut suffire pour mesurer le coût déjà affecté, mais rien n'empêche l'utilisation du concept d'inducteur au niveau de ces activités directes. Cela permettra de fournir des informations d'aide à la décision en phase de conception, c'est la raison pour laquelle nous adaptons le terme *inducteur*. Employer des inducteurs ou des unités d'œuvre ne s'agit en fait que d'un choix sur le niveau de causalité recherché.

Le Coût : Si $Ri = \{k : k \in K\}$ représente l'ensemble des ressources consommées dans l'Entité Coût i (*Eci*) pour la réalisation de l'activité i (*Ai*). Si $y_k^i(x)$ équivaut à la quantité de ressource k consommée pour la réalisation de l'activité i d'inducteur égal à x et si C_k correspond au coût d'utilisation de y unités de k, l'équation de base du modèle sera :

$$\text{Coût} = \sum_{k \in Ri} C_k(y_k^i(x_i))$$

Exemple : Coût d'une ressource = Inducteur(nbre) * α_k (h/nbre) * Taux d'imputation(€/h)

$$= \underbrace{x_i * \alpha_k} * \text{Taux d'imputation}$$

$$= \underbrace{y_k^i(x_i) * \text{Taux d'imputation}}$$

$$= C_k(y_k^i(x_i))$$

Avec α_k le coefficient de consommation de la ressource *k*.

De ce qui précède, on établit facilement qu'une Entité Coût est une activité consommée dans des conditions technico-économiques parfaitement définies.

> La machine n°X, lorsqu'elle est :
> - en réglage, consomme la main d'œuvre d'un régleur hautement qualifié, mais pas d'énergie.
> - en opération de fabrication, consomme la main d'œuvre d'un opérateur peu qualifié et de l'énergie.
>
> Dans cette double hypothèse, on dira que le poste « machine n°X » comporte deux Entités Coût :
> - Entité Coût réglage sur machine n°X,
> - Entité Coût opération de fabrication sur machine n°X.

L'approche par Entité Coût est fondée sur une analyse détaillée de la façon de travailler dans toutes les fonctions de l'entreprise. Autant la manière de procéder de cette analyse est connue pour les activités directes, autant elle peut être délicate pour les activités indirectes ou dans des domaines comme le commercial. La figure 40 présente un exemple de ces deux types d'activités directes et indirectes avec la modélisation par Entités Coût correspondantes.

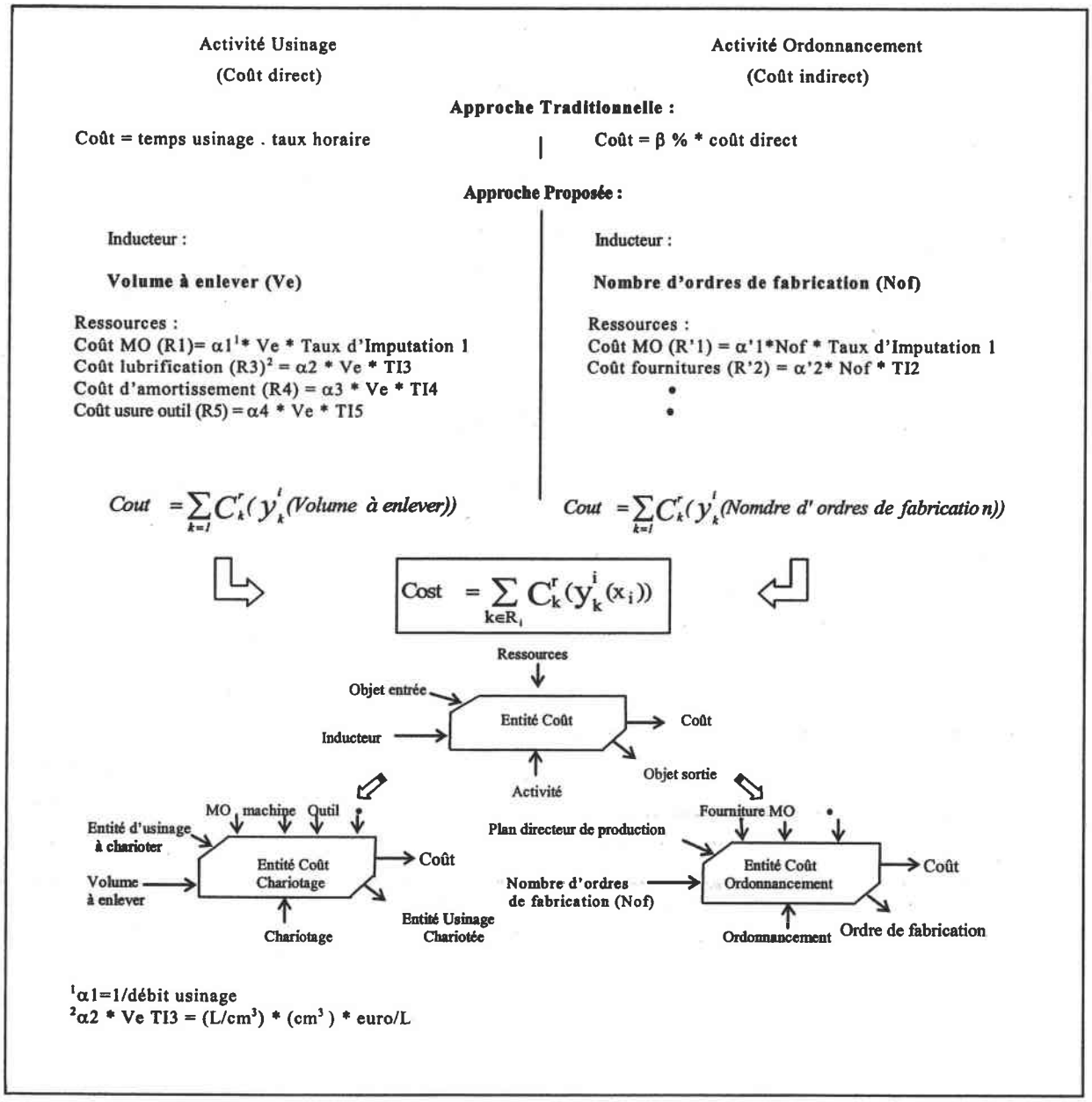


Figure 40. Exemple de modélisation par Entités Coût

Entité Coût Mère

En l'absence d'homogénéité des ressources, l'Entité Coût sera considérée comme Entité Coût mère, c'est à dire composite. Sa décomposition en Entités Coût respectant la condition d'homogénéité (Entités Coût filles) est obligatoire. Les paramètres (ressources, activité, objets d'entrée-sortie) et le coût de l'Entité Coût mère sont respectivement l'union des paramètres et la somme des coûts des Entités Coût qui la composent.

$$Coût = \sum_{i \in N} \sum_{k \in Ri} C_k(y_k^i(x_i))$$

N est le nombre d'Entités Coût filles composant l'Entité Coût mère.

Pour une analyse ascendante de l'entreprise, l'Entité Coût mère permettra de rattacher un ensemble de coûts à un responsable, et d'éviter l'absence de signification comptable de résultats obtenus avec certaines des Entités Coût filles avec des écarts de budget portant sur des sommes trop petites en valeur absolue.

C'est dans le cadre de ce découpage que se confirme l'idée déjà exprimée qu'en matière d'estimation des coûts il faut faire du « sur mesure ». Si dans les limites d'un même secteur d'activité, des problèmes communs peuvent se rencontrer, chaque entreprise n'en conserve pas moins son individualité en raison en particulier, de sa dimension et son organisation.

2.4 Limitation du concept d'Entité Coût

La condition d'homogénéité relative à l'Entité Coût nécessite une décomposition détaillée de l'entreprise. Cela requiert une implantation lourde de la démarche tendant vers « l'usine à gaz » que tous les utilisateurs redoutent. A cet effet, nous limitons la décomposition par une analyse PARETO. La décomposition des Entités Coût de classe A est obligatoire. Celles de classe B et C peuvent être décomposé ou non en fonction des objectifs de l'entreprise. A défaut, elles seront considérées comme des Entités Coût mères avec des formules d'estimation de coûts spécifiques. Ce que l'on perdrait en finesse, on le gagnerait en simplicité de calcul et réciproquement. Mais on doit convenir aussi que ce sont les entreprises qui se sont complexifiées et que leur système d'information de gestion est resté trop simple et est devenu inadapté. Aussi, le passage d'une approche traditionnelle à une approche détaillée telle que la nôtre ne se situe pas sur le terrain du choix entre simple ou compliqué, mais celui du choix entre une vision simpliste ou un système adapté à la réalité. L'objectif est de fournir une grille pertinente d'analyse de coûts facilitant les prises de décision.

2.5 Notre approche relativement aux méthodes actuelles

Dans cette section, nous proposons le positionnement du concept Entité Coût relativement aux deux méthodes les plus répandues actuellement. Elles sont la source des données exploitées pour une estimation des coûts.

2.5.1 Relativement à la méthode des centres d'analyse

Pour rappel, la méthode des centres d'analyse impute les coûts des sections auxiliaires aux sections principales qui reçoivent leurs prestations au prorata des unités d'œuvre consommées par ces autres sections, puis les somme et distribue entre les produits le total des coûts ainsi réunis.

Cette méthode est en apparence logique mais, en fait, elle ne respecte que rarement le principe d'homogénéité des coûts imputés aux produits.

- D'abord, au niveau des sections (centres d'analyse), où on peut remarquer qu'une entité de l'organigramme, un centre de responsabilité budgétaire est rarement une section homogène sauf dans une organisation très taylorienne ou de process. En 1928, Rimailho, promoteur de la méthode des sections homogènes ou centres d'analyse, expliquait que l'atelier n'est pas une section et qu'il faut le découper, chaque machine pouvant être, à la limite, une section [Bouquin, 1997].

- On constate aussi que la méthode d'imputation « en cascade » des coûts des sections auxiliaires aux sections principales ne donne un coût significatif que si les coûts des sections (ou activités) principales sont homogènes avec ceux des sections (ou activités) auxiliaires.

Comme ces deux conditions ne peuvent pas être vérifiées de manière générale, cette méthode conduit à des calculs à coup sûr erronés.

2.5.2 Relativement à la méthode de comptabilité par activités (ABC)

La méthode ABC est basée sur un concept simple : « les produits consomment des activités, et les activités consomment des ressources ». Elle s'appuie sur l'idée que tout résultat est la conséquence d'un processus, c'est-à-dire d'un enchaînement d'activités. Celles-ci sont déclenchées par leur *inducteurs* qui les causent et déclenchent ainsi leurs coûts [Bescos *et al.*, 2000].

La condition d'homogénéité, négligée par la méthode ABC, reste fondamentale pour la modélisation des coûts. Cette remarque est d'autant plus importante dans le cas de fabrication à la commande, où chaque produit lui correspond un nouvel assemblage d'activités. Il faut donc situer l'homogénéité au niveau des activités élémentaires ainsi assemblées.

- Associer un inducteur à une activité, c'est admettre que ses ressources sont homogènes par rapport à cet inducteur.

- En ABC, il est conseillé de regrouper les activités relevant du même inducteur. Si on utilise cette globalisation pour procéder à des imputations de coûts, la fiabilité du calcul tombe sous les mêmes contraintes d'homogénéité que celles qui ont été énoncées ci-dessus.

L'homogénéité des ressources au niveau de l'activité et au niveau du regroupement ou du processus a une valeur importante, elle évite le subventionnement croisé des coûts des produits.

Si chacune de ces méthodes prise séparément présente les inconvénients cités ci-dessus, leur intégration autour du concept d'Entité Coût permet d'exploiter les avancées réalisées par chacune d'elles.

Les deux idées clés sur lesquelles repose la modélisation par « Entité Coût » sont donc :

- l'homogénéité pour avoir des estimations des coûts plus exactes,
- l'inducteur pour avoir une représentation causale des consommations de ressources.

De tels éléments sont très importants. Ils déterminent la qualité et la portée significative de l'estimation des coûts, et notamment de celles des informations qu'ils produisent sur les coûts unitaires.

2.6 La démarche de la méthode d'estimation des coûts

Le principe est d'établir un système d'estimation des coûts qui ne soit pas complexe et qui associe étroitement les variables techniques (entités de fabrication), les variables économiques (entités coût) et les produits (figure 41). Ce système doit permettre de simuler les scénarios économiques et techniques possibles.

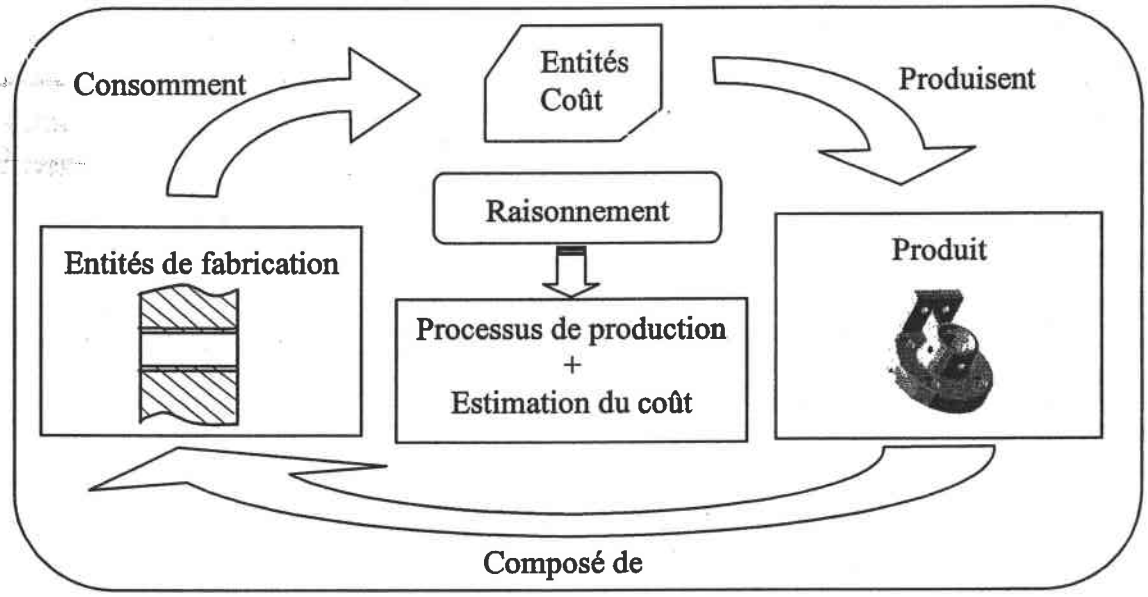


Figure 41. Association Produit / Entités de fabrication / Entités Coût

Les étapes de la démarche :

- Etablir l'inventaire de toutes les Entités Coût présentes dans l'entreprise (mères et filles).
- Etablir l'inventaire de toutes les entités de fabrication maîtrisées et réalisées dans l'entreprise.

- Considérer que l'analyse d'estimation du coût d'un produit résulte de la confrontation entre le produit, les entités de fabrication et les Entités Coût.

Cette séparation entre produit, entités de fabrication et Entités Coût se fonde sur la triple observation suivante :

- Les *Entités Coût* présentes dans une entreprise sont beaucoup moins nombreuses que les *entités de fabrication* réalisées par cette entreprise : une centaine d'entités de fabrication distinctes et plus peut être identifiées à partir d'une dizaine de métiers maîtrisés ;
- Tout évolue, *Entités Coût* comme *produits*, mais les produits, soumis aux effets de mode, au marketing et à la logique du remplacement, évoluent plus rapidement que ne changent les Entités Coût ;
- Tout *produit* n'est qu'une sélection ou/et une permutation *d'entités de fabrication.*

Dans notre approche, on accole l'adjectif « automatique » au mot « raisonnement » de la figure 41. Cette automatisation passe par la consignation de règles constitutives d'une technologie et des contraintes à satisfaire.

Cette expression des raisonnements porte sur :

- Le choix d'appliquer telles opérations de fabrication à telle entité de fabrication en fonction de son type et de ses spécifications.
- Les contraintes à satisfaire pour assurer un processus de production du produit solution.

Pour capitaliser l'expertise du domaine d'estimation des coûts, notre thèse distingue les savoirs et les savoir-faire :

- les savoirs : ce sont les connaissances nécessaires à la description des données du problème,
- les savoir-faire : ce sont les raisonnements nécessaires aux traitements de ces données.

A chacun correspond une modélisation particulière. Les savoirs feront l'objet du chapitre suivant relatif à la modélisation des connaissances. Ils constituent la base de faits disponibles avant tout raisonnement les exploitant. Le chapitre quatre portera sur la mise en œuvre des raisonnements.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les concepts et principes de base propres à notre démarche d'estimation des coûts. Nous avons commencé par identifier un certain nombre d'objectifs liés au contexte actuel de l'organisation d'entreprise et à la nouvelle donne de la structure des coûts. Ensuite, la définition détaillée du concept Entité Coût a été présentée,

ainsi que les limites de son application et son positionnement relativement aux principes de méthodes comme les centres d'analyse et ABC. Une autre section importante de ce chapitre est la présentation du constat observé sur le triplet Produit / entité de fabrication / Entité Coût. Ce dernier nous a conduit à décomposer l'expertise du domaine d'estimation des coûts en deux domaines fortement liés : connaissances et raisonnements.

Le chapitre suivant aborde la modélisation des connaissances nécessaires et utilisées en support aux raisonnements mis en œuvre pour l'estimation du coût d'une entité de fabrication et d'un produit. Le Modèle Produit et le Modèle Costgrammes, propres à notre démarche, seront présentés.

Chapitre 3

Estimation des coûts : Modélisation des connaissances

3.1 Introduction

Un produit est perçu, connu ou qualifié au travers d'*un ensemble d'attributs*. Lors de sa production, il traverse sous sa forme informationnelle ou matérielle *des Entités Coûts* présentes dans l'entreprise. Ces différentes connaissances (savoirs) constituent le support nécessaire à toute démarche d'estimation des coûts.

Nous avons déjà distingué précédemment les savoirs des savoir-faire. Dans le même ordre d'idée, Fouet [1997] distingue deux classes de connaissances :

- la connaissance déclarative (savoir) : cette connaissance est indépendante des actions susceptibles de la mettre en jeu. Elle est statique et a le mérite d'être décontextualisée.

- la connaissance procédurale (savoir-faire) : cette connaissance constitue la partie opérationnelle, c'est ce que nous appellerons par la suite le raisonnement. Elle se construit autour de la connaissance déclarative.

Nous appelons connaissance, toute connaissance déclarative. Ainsi, notre vision de la connaissance rejoint celle de Fouet [1997] qui l'explique comme étant l'ensemble des informations nécessaires à un être humain, ou à un groupe, pour que celui-ci puisse accomplir une tâche.

Dans ce chapitre, nous représentons les connaissances nécessaires à l'estimation des coûts sous la forme d'un Modèle Produit et d'un Modèle Costgrammes. Le Modèle Produit est construit sur la base des entités de fabrication. Pour la conception, la fabrication et l'estimation des coûts, cette notion présente un aspect fédérateur. Ce point sera détaillé. Ensuite, nous affirmons qu'à chaque entité de fabrication, il lui correspond un ensemble d'opérations nécessaires potentiellement à sa réalisation. La définition des entités de fabrication et des opérations sera détaillée ainsi que la structuration des données de chacune d'elles. Les relations géométriques et topologiques entre les entités de fabrication seront abordées. Puis, nous achevons la présentation du Modèle Produit par la définition des variables nécessaires au raisonnement d'estimation des coûts développée au chapitre suivant.

Concernant le Modèle Costgrammes, nous commençons par définir les niveaux constituant le modèle. Dans un deuxième temps, nous détaillons la démarche d'identification des Entités Coût ainsi que la structuration des données associées. Ceci sera suivi par l'identification des inducteurs des Entités Coût.

Enfin, nous concluons ce chapitre en remarquant que l'opération de fabrication est commune aux deux modèles et nous expliquons la possibilité du passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes à condition de connaître les opérations effectives (processus de fabrication) de chaque entité de fabrication et le processus de production du produit.

L'outil informatique employé pour la structuration des données est un générateur de systèmes experts orienté objet nommé CostAdvantage [Cognition, 2000]. Dans la suite, ce logiciel sera le support de la modélisation des connaissances et aussi d'une partie des raisonnements.

CostAdvantage définit un contexte sous forme d'un triplet *Procédé / Matière / Entité* (figure 42).

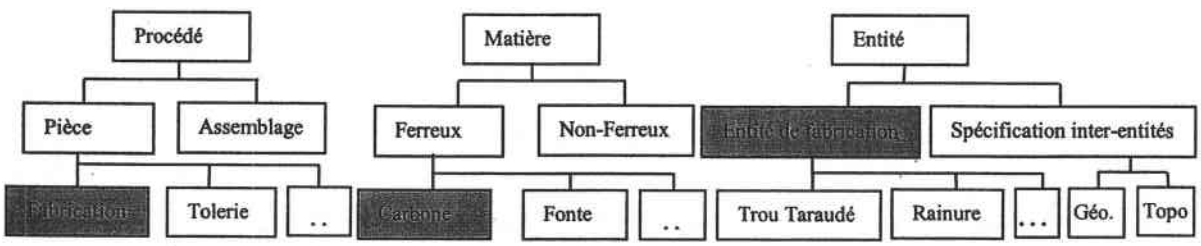


Figure 42. L'architecture CostAdvantage

Une fenêtre est associée à chaque contexte pour exprimer les caractéristiques correspondantes :

- *Caractéristiques Procédé.*
- *Caractéristiques Matière.*
- *Caractéristiques Entité.*

Ces caractéristiques peuvent être numériques, textuelles ou logiques, avec une propriété statique ou fonctionnelle :

- Caractéristiques statiques : elle définissent et caractérisent les valeurs stockées au niveau des instances.
- Caractéristiques fonctionnelles : elles définissent les méthodes applicables aux instances.

Une fonction de restriction sur les valeurs prises par ces caractéristiques est aussi disponible au niveau de chaque contexte. Dans un contexte donné, un sous-contexte est une particularisation du contexte père. Un contexte fils doit donc respecter les domaines des valeurs imposées par son père.

3.2 Le Modèle Produit

L'objectif de ce modèle est de fournir un modèle informationnel qui intègre les informations nécessaires à la définition du produit et de son processus de fabrication, de manière à assurer une estimation des coûts.

Un modèle uniquement géométrique ne permet pas d'intégrer l'ensemble des informations nécessaires. Il est donc important d'élever le niveau de sémantique.

Ainsi, le Modèle Produit proposé manipule trois notions clés : *le produit, l'entité de fabrication et l'opération*. Le modèle a été étendu à la prise en compte des solutions de fabrication satisfaisant les entités définies. Nous proposons ainsi deux niveaux dans ce modèle. Le premier est celui d'une description géométrique et spécifique du produit en entités de fabrication. Le deuxième niveau exprime de quelle façon sont réalisées ces entités de fabrication, c'est à dire quelles sont les solutions proposées du point de vue de la fabrication.

La figure 43 décrit les différents composants du modèle (produit, entités de fabrication, opérations de fabrication et les machines pour chaque opération), ainsi que les liens entre les différents composants. Ces liens sont soit obligatoires soit optionnels. En traits continus, sont indiqués les liens obligatoires Produit / Entités de fabrication / Opérations et en traits pointillés ceux qui sont optionnels. Ces derniers représentent l'ensemble des machines capables de réaliser une opération bien déterminée.

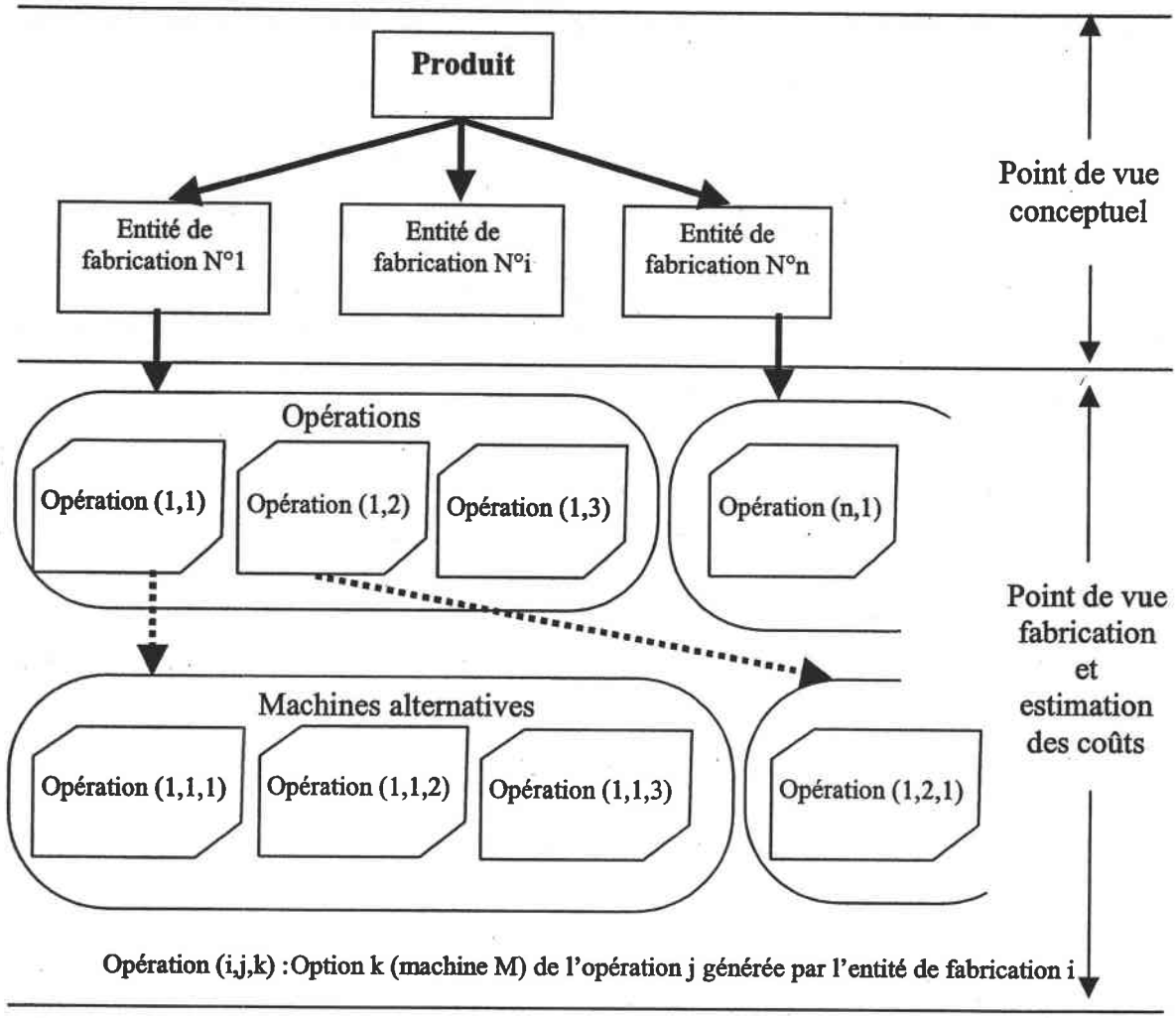


Figure 43. Le Modèle Produit

3.2.1 L'intégration autour des entités

Dans le cadre de la mise en œuvre de la conception intégrée, l'*entité* apparaît comme un concept fédérateur. Néanmoins, la sémantique associée à un Modèle Produit basé sur ce concept n'est pas la même suivant les différents intervenants du cycle d'élaboration du produit. Ainsi, le modèle du produit vu par le concepteur n'a pas forcément la même représentation s'il est vu par le fabricant. D'un point de vue méthodologique, il existe deux approches principales dans la manière de manipuler le concept entité : *la reconnaissance d'entités et la conception par entités.*

La reconnaissance d'entités

La première solution, apparue pour la construction d'un Modèle Produit, et appelée *reconnaissance et extraction d'entités*, consiste à retrouver dans une description géométrique (fichier CAO) diverses formes géométriques correspondant à des connaissances métiers particulières. Cette approche d'extraction et de reconnaissance d'entités permet, à partir d'un

modèle géométrique conventionnel de type B-Rep ou CSG, de structurer le modèle de manière automatique sous formes d'entités.

Utilisée essentiellement pour extraire les entités d'usinage d'un modèle géométrique, la formalisation du savoir-faire et les algorithmes nécessaires à l'extraction restent complexes et ne permettent pas de lever certaines ambiguïtés de reconnaissance (figure 44). L'utilisation d'un modèle initial purement géométrique et l'absence d'informations fonctionnelles et technologiques rendent ces ambiguïtés incontournables [Sabourin, 1995]. L'état de l'art qu'en font Subrahmanyam et Wozny [1995] est assez exhaustif pour appréhender les travaux du domaine.

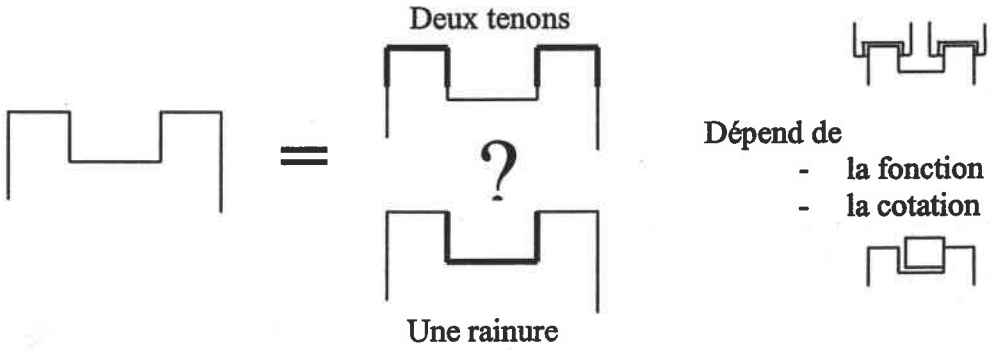


Figure 44. Ambiguïté dans la reconnaissance d'entité [Mony, 1992]

La conception par entités

Dans la conception par entités, le concepteur crée le modèle de la pièce à partir d'une bibliothèque d'entités et doit préciser la valeur des différents paramètres de chaque entité. La conception par entités revient à concevoir dans un langage métier en associant la sémantique de ce métier au modèle géométrique de la pièce.

Devant les problèmes liés à l'extraction et la reconnaissance des entités de fabrication dans un modèle géométrique, nous nous sommes orientés vers la conception du modèle de la pièce à partir « d'entités de conception guidées par le fabricant » [Brissaud, 1992] [Sabourin, 1995], que nous nommons « entités de fabrication ».

Du point de vue de la conception :

Le premier intervenant étant le concepteur, il participe à la définition du premier niveau :

- Le concepteur dispose d'une bibliothèque d'entités de fabrication. Cette bibliothèque d'entités a été préalablement définie conjointement par les Etudes et les Méthodes. Ceci permet la prise en compte des contraintes liées au métier du concepteur et l'intégration de la sémantique relative à la fabrication. L'utilisation de ces entités permet une homogénéité des formes géométriques associées à un ensemble de

fonctions et ainsi la standardisation des opérations de fabrication associées à ces entités.

- Ces entités sont ensuite positionnées entre elles par l'expression de la cotation fonctionnelle définie au travers des tolérances géométriques de position et d'orientation.

Le concepteur est responsable du choix des entités de fabrication et des spécifications associées. Ceci conditionnera bien évidemment le coût final du produit.

Du point de vue de la fabrication :

L'ensemble des spécifications associées à la forme géométrique caractérise l'entité de fabrication et permet de définir le processus de fabrication associé et par la suite la définition du deuxième niveau de la figure 43:

- A chaque entité de fabrication correspond une séquence d'opérations de fabrication connue. L'exécution successive de ces opérations permet la réalisation de la forme géométrique conformément aux spécifications prédéfinies.
- A chaque opération correspond un ensemble de machines capables (options de fabrication).

La connaissance du métier de fabricant relative à chaque entité présente dans la bibliothèque sera capitalisée. Nous insistons sur le fait que notre objectif, à ce niveau, n'est pas de construire une génération automatique de gamme, mais plutôt une génération automatique du processus de fabrication de chaque entité et des machines capables pour chaque opération. L'objectif recherché à ce niveau est de fournir l'ensemble des opérations pour préparer une estimation des coûts de production.

Du point de vue de l'estimation des coûts :

Chaque opération de fabrication est aussi une Entité Coût élémentaire. Au raisonnement proprement technologique, au niveau deux, se superpose alors une connaissance de nature économique, dont l'objectif consiste à transformer en Euros les « efforts » et les « heures » présents dans chaque opération :

- La connaissance d'estimation de coût relative à chaque opération sera capitalisée et encapsulée dans l'Entité Coût élémentaire correspondante.
- Le choix d'une machine parmi l'ensemble des machines capables de chaque opération se fait sur la base des critères tactiques et économiques (disponibilité de la machine, son coût d'opération et le coût de manutention avec la machine amont).

Au niveau de l'estimation des coûts, la notion d'entité de fabrication est très intéressante : les programmes de calcul des temps (suite très détaillée d'instructions : Temps = f(conditions de coupe)) seront remplacés par une seule instruction « l'Entité Coût Mère » correspondant à « L'Entité de fabrication » dont le processus de fabrication est connu. Le travail de l'estimateur sera donc allégé et le calcul devient plus rapide. De plus, la définition de l'ensemble des Entités Coût élémentaires des opérations de fabrication sera la base du raisonnement pour la détermination des processus de production solutions du produit et de l'analyse ascendante du Modèle Costgrammes.

3.2.2 Définition de l'Entité de fabrication

Le terme « Entité », nommé aussi « caractéristique » en France, correspond au terme anglais « Feature ». Initialement, ce concept apparaît dans les années 1980 comme le point commun de rapprochement entre les modèles de description des pièces (métier de concepteur) et les modèles de préparation à la fabrication (métier de gammiste). Ce concept se révèle alors pertinent pour la structuration des connaissances des différents métiers intervenant dans le processus de la conception, car il est une forme naturelle de communication entre les intervenants « métier » qui interagissent dans un projet de conception intégrée [Derras, 1998].

La diversité des travaux dans le domaine montre qu'il n'y a pas de définition générale du concept d'Entité, tant les interprétations « métier » sont multiples. Néanmoins, nous pouvons retenir la définition que PRIMECA [1998] a proposé. Rappelons la pour mémoire :

« Un groupement sémantique (atome de modélisation) caractérisé par un ensemble de paramètres, utilisés pour décrire un objet indécomposable manipulé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et l'utilisation des produits et des systèmes de production. »

La définition de Mony nous paraît aussi bien adapté à notre approche [Mony, 1992] :

« Une entité est un regroupement d'éléments géométriques paramétrés, manipulés comme un objet et ayant une sémantique par rapport à une ou plusieurs fonctions de l'ingénierie de produit. A ces regroupements peuvent être associés différents attributs et méthodes permettant un enrichissement des données géométriques et la manipulation d'objets de haut niveau sémantique. »

Aujourd'hui, il est communément admis que la génération automatique (ou manuelle) des opérations de fabrication repose sur l'identification préalable des formes types (rainures, gorges, poches...). La démarche généralement suivie est d'associer dans un premier temps un mode opératoire (ensemble d'opérations) à chaque entité, compte tenu de leurs paramètres dimensionnels et technologiques, puis d'organiser tous ces modes entre eux pour déterminer le processus de production du produit. Ces entités peuvent être identifiées à partir d'entités

fonctionnelles du mécanisme et représentent un élément spécifique d'une fonction dont la pièce fait partie. Dans cet esprit, nous adoptons une définition proche à celle proposée par Laurent Sabourin [Sabourin, 1995] :

Entité de fabrication : *C'est un **ensemble de spécifications** associées à une **forme géométrique** ou un ensemble de formes géométriques **paramétrées**, qui combinées entre elles représentent un élément d'une entité fonctionnelle dont la pièce fait partie. Cette forme est associée à un **processus de fabrication** qui exprime l'ensemble des **opérations types** nécessaires à sa réalisation.*

...forme géométrique

est un assemblage de surfaces pouvant être engendrées par le déplacement d'un outil de géométrie adaptée (opération élémentaire).

...paramétrée

par des caractéristiques dimensionnelles telles que :

-longueur,
-largeur,
-hauteur,
-diamètre,
-etc.

les paramètres utilisés lors des appels des entités de fabrication doivent être homogènes, toujours de même type d'une entité de fabrication à une autre de même nature.

...un ensemble de spécifications

englobe toutes les informations nécessaires à la réalisation de l'entité telles que :

-la matière de la pièce,
-les spécifications topologiques (commence sur, débouche dans...) et géométriques (perpendicularité, parallélisme...) inter-entités de fabrication
-la tolérance et l'état de surface relatifs à chaque surface générée de l'entité de fabrication,
-l'aptitude d'appui (figure 45).

L'aptitude d'appui prend en compte les dimensions (longueur, largeur ou diamètre) caractérisant la surface de l'entité comparées aux côtes d'encombrement caractérisant le volume externe dans lequel s'inscrit la pièce.

Un certain nombre de travaux présentent des éléments de formalisation de cette notion pour la génération de gammes [Boerma, 1990] [Hayes & Wright, 1989] [Paris, 1995] [Derras, 1998], etc. Nous retenons celles de Sabourin [sabourin 1995] adaptée à notre contexte :

Pour évaluer l'aptitude d'une entité d'être une entité d'appui lors de la prise de pièce, nous ne considérons que les deux cotes d'encombrement maxi caractérisant le volume parallélépipédique externe dans lequel s'inscrit la pièce, défini par les trois valeurs longueur, largeur et hauteur. Nous identifions ces deux cotes par L_{max} représentant la longueur, et l_{max} représentant le max de (largeur, hauteur). Les prérequis pour qu'une surface devienne surface potentielle d'appui sont tels que :

- la longueur (ou le diamètre) de la surface est supérieure ou égale à 1/3 de la longueur L_{max}.
- la largeur (ou le diamètre) de la surface est supérieure ou égale à 1/2 de la largeur l_{max}.
- pour un cylindre long, la longueur est supérieure ou égale à 1.5 fois le diamètre.

L'aptitude d'appui est définie pour chacune des entités dont une des surfaces caractéristiques peut être considérée comme une face ou un cylindre long. Nous présentons, dans les figures 45.1 et 45.2, le principe de détermination de l'aptitude d'appui d'une entité.

Si
l'entité est une entité de type prisme et
$(l_x / L_{max}) \geq 0.33$ et $(l_y / l_{max}) \geq 0.5$ et
alors
Entité appui

Figure 45.1. Caractérisation de l'aptitude d'appui de type plan.

Si
l'entité est une entité de type trou et
$(l_x / L_{max}) \geq 0.33$ et $(l_x / D) \geq 1.5$
alors
Entité appui

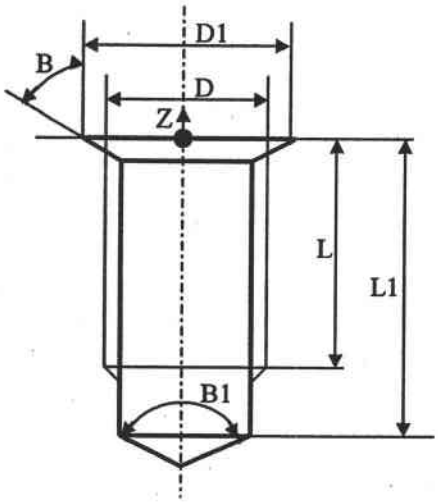
Figure 45.2. Caractérisation de l'aptitude d'appui de type centrage long.

Dans les figures 45.1 et 45.2, les cotes l_x et l_y correspondent à la longueur et à la largeur englobante extérieures de la surface plane considérée, les cotes L_{max} et l_{max} correspondent aux deux côtes d'encombrement maxi du volume extérieur de la pièce et D correspond au diamètre de la surface cylindrique considérée.

Figure 45. Propriété d'appui d'une entité de fabrication

...un processus de fabrication

un processus de fabrication est la description de l'enchaînement des opérations de fabrication (fraisage, chariotage, emboutissage, formage...) permettant d'obtenir une entité de fabrication paramétrée et spécifiée (figure 46).



TROU TARAUDE			
D diamètre taraudage			8
Qualité taraudage			6H
Pas			1.0
L Profondeur taraudage			20
Tolérance sur L			0.5
L1 Profondeur perçage			26
Tolérance sur L1			0. +0.5
D1 diamètre d'entrée			9
Tolérance sur D1			0. +0.5
B angle d'entrée			60°
B1 angle de fond de perçage			120°
RELATIONS GEOMETRIQUES			
Localisation	Ø	0.2	Ref.
RELATIONS TOPOLOGIQUES			
Commence sur			Plan

Figure 46. Les paramètres et les spécifications de l'entité de fabrication Trou Taraudé

...Opération Type

Pour la réalisation d'une surface donnée, il apparaît souvent que certaines opérations ne sont pas exécutables en une seule fois et nécessitent plusieurs passes successives avec :

- le même outil,
- les mêmes conditions de coupe.

Les passes d'une même opération de fabrication sont appelées opérations élémentaires. Une opération type est définie comme étant la réunion de plusieurs opérations élémentaires consécutives, deux opérations élémentaires appartenant à la même opération type peuvent être différentes (profondeurs de passe, largeurs de coupe...).
Chaque opération type est caractérisée par le couple Opération/Machine et définie par un triplet Outil/Matière/Machine donnant un débit :

débit de métal enlevé	Cm^3 / mn	si c'est une opération d'ébauche,
débit de surface produite	Cm^2 / mn	si c'est une opération de finition.

Dans cet exemple (figure 47), le processus est défini par trois opérations types :

- chariotage ébauche,
- chariotage finition,
- dressage finition.

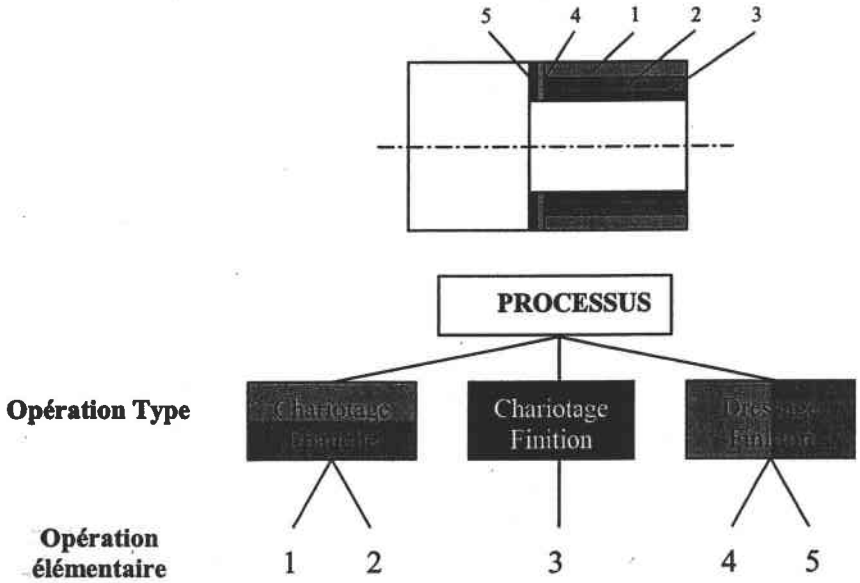


Figure 47. Exemple de processus de fabrication

Dans la suite, et dans l'ensemble d'opérations associé à une entité de fabrication, nous retenons la définition de l'opération type.

3.2.2.1 Structure des données d'une entité de fabrication

Dans le Modèle Produit, chaque entité de fabrication fait appel à des paramètres internes de description (dimensions, tolérances dimensionnelles, état de surfaces, etc.) que nous regroupons sous le terme de données intrinsèques, mais également à des tolérances géométriques de positionnement et d'orientation liant les différentes entités que nous regroupons sous le terme de relations géométriques, et enfin à des informations de voisinage entre entités que nous regroupons sous le terme de relations topologiques.

La transcription retenue de ces trois groupes de données s'appuient sur une représentation en classes d'objets, appelées *contextes* en CostAdvantage. La description d'un contexte détermine la structure de tous les objets qui en sont des instances.

Données intrinsèques

Les surfaces géométriques composant l'entité de fabrication comportent des informations de type distance, tolérance géométrique, état de surface qui vont caractériser précisément celles-

ci. C'est l'ensemble de ces informations que nous définissons sous le terme de données intrinsèques à l'entité de fabrication et qui seront *les caractéristiques Entité* du *contexte* associé au type de l'entité de fabrication en CostAdvantage.

Ainsi, pour un Procédé et une Matière donnés, nous définissons les différents types d'entités de fabrication comme des contextes différents qui, en plus des caractéristiques qui peuvent héritées de leurs contextes mères (exemple : contexte [Fabrication, Carbonne, Entité de fabrication] ,...), possèdent leurs propres caractéristiques[8].

Ces données intrinsèques sont des informations capitales pour l'estimation du coût d'une entité de fabrication et par la suite du produit. Elles décident le type et le nombre des opérations nécessaires à la réalisation de l'entité de fabrication.

Relations géométriques

Les relations géométriques expriment des tolérances géométriques d'orientation et de position liant deux à deux des entités de fabrication différentes (figure 48).

Relation Géométrique	
Entité tolérancée	Face2
Type de relation	Perp.
Valeur de la tolérance	0.25
Entité référence	Face1

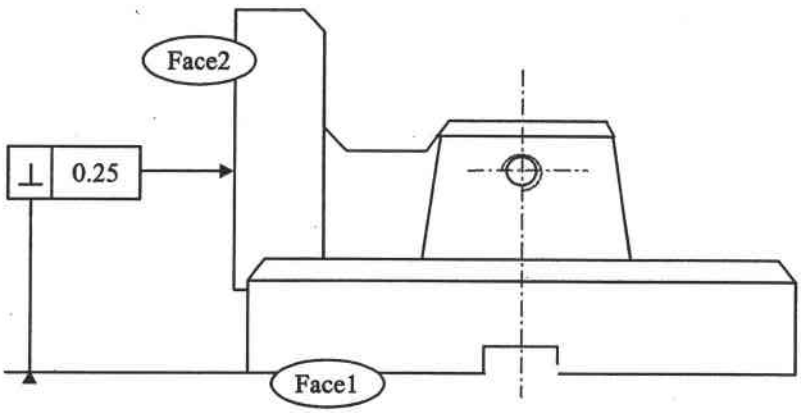


Figure 48. Une relation d'orientation de type perpendicularité entre deux faces

Une tolérance géométrique comporte [NFE 04 552] [NFE 04 553] [ISO 1101] :

- *Des éléments tolérancés* : les éléments tolérancés sont des éléments réels, ponctuels, linéiques ou surfaciques à l'exception de l'application « tolérance projetée » où

[8] Nous remarquons que CostAdvantage peut être utilisé soit en entrant manuellement les caractéristiques d'une entité de fabrication, c.à.d ces données intrinsèques, soit il accepte les informations des fonctions intelligentes générées à partir d'un élément paramétré issu d'une bibliothèque graphique définie dans des modeleurs volumiques CAO comme ProEngineer, CATIA,... [Cognition, 2000]. Ceci permet de créer un objet entité de fabrication, appelé instance de contexte sous CostAdvantage.

l'élément tolérancé est un segment de droite, axe d'un cylindre. La tolérance géométrique peut porter sur un élément unique ou sur un ensemble d'éléments.

- *Des zones de tolérances* : les zones de tolérances sont des domaines de nature volumique ou surfacique limités par un ou plusieurs éléments géométriques idéaux de nature surfacique ou linéique.
- *Des références spécifiées* : la référence spécifiée est formée d'un ou plusieurs éléments idéaux. Ces éléments idéaux sont définis à partir d'un ou plusieurs éléments de référence qui sont des éléments réels. Si la référence spécifiée est formée d'un seul élément idéal, elle est associée selon un critère à l'élément de référence correspondant. Si la référence spécifiée est formée de plusieurs éléments idéaux, il s'agit alors d'un système de référence. Dans ce cas, il existe une hiérarchie entre ces éléments. S'il sont aux nombre de trois, ils sont appelés suivant l'ordre, référence primaire, secondaire et tertiaire. L'association aux éléments de référence se fait dans l'ordre établi.

Ainsi, nous avons défini une structure objet propre à l'expression des tolérances géométriques d'orientation et de position. Chaque type de tolérance géométrique est associé à un contexte objet. *Les caractéristiques Entité* du *contexte,* associées au type de la tolérance géométrique en CostAdvantage, sont les suivantes :

- entité référencée,
- tolérance,
- référence 1, référence 2, référence 3.

Pour chaque tolérance géométrique exprimée, les valeurs associées aux champs « entité référencée » et les « références spécifiées » 1, 2 ou 3 sont des entités nommées et identifiées dans le Modèle Produit en tant qu'entités de fabrication.

Ces relations géométriques seront ensuite transcrites sous forme de contraintes de fabrication intervenant dans la génération des processus de production alternatifs du produit. Elles décident les précédences à respecter entre les opérations de fabrication et influent par conséquent sur les coûts de manutention et de préparation des machines. L'absence de certaines de ces précédences minimise ces derniers coûts. L'expression des contraintes de fabrication sera développée au chapitre 4.

Relations topologiques

Une relation topologique, souvent implicite au niveau de la conception, permet de caractériser une relation de voisinage entre deux entités (figure 49).

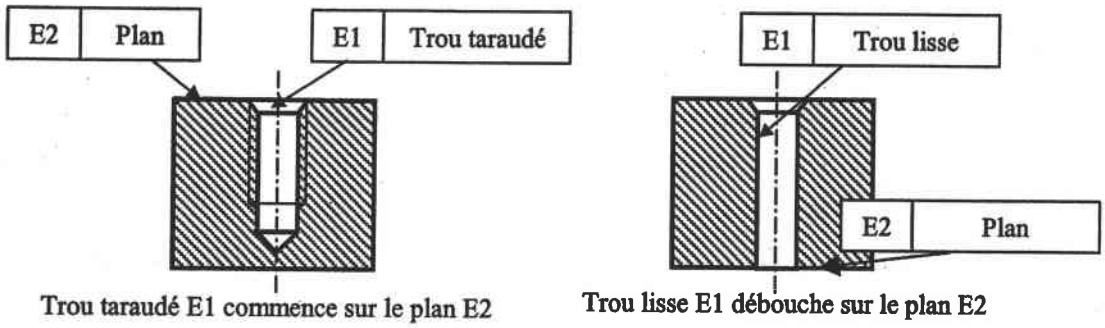


Figure 49. Exemples de relations topologiques

Chaque type de relation topologique est associé à un contexte objet. *Les caractéristiques Entité* du *contexte,* associées au type de la relation géométrique en CostAdvantage, sont les suivantes :

- entité référencée,
- référence spécifiée.

Pour chaque relation topologique exprimée, les valeurs associées aux deux champs « entité référencée » et « référence spécifiée » sont des entités nommées et identifiées dans le Modèle Produit en tant qu'entités de fabrication.

Ces relations topologiques seront ensuite transcrites sous forme de contraintes de fabrication intervenant dans la génération des processus de production alternatifs du produit. Les remarques concernant les coûts de manutention et de préparation des machines formulées pour les relations géométriques restent valables pour les relations topologiques. L'expression de ces contraintes de fabrication sera développée au chapitre 4.

Les aspects relatifs à l'entité de fabrication ont été déjà traités par Leveaux [1992] et Sabourin [1995] dans le cadre de la génération de gammes de contrôle et de fabrication avec des supports informatiques différents.

3.2.3 Définition de l'opération

A chaque type d'entité de fabrication, il lui correspond un ensemble $\mathcal{T}$ d'opérations *potentiellement* nécessaires à sa réalisation. Des critères, essentiellement d'ordre technologique (la qualité à obtenir), conditionnent les décisions permettant d'associer à une entité de fabrication donnée les opérations *effectives* correspondantes, formant ainsi l'ensemble t avec $t \in \mathcal{T}$.

La figure 50 montre un exemple d'ensemble $\mathcal{T}$ d'opérations potentielles relatives à l'entité de fabrication Trou Taraudé. En fonction des données intrinsèques de l'entité (Qualité, Angle β du chanfrein), l'ensemble t du processus de fabrication peut ne pas contenir les opérations Alésage et Chanfreinage.

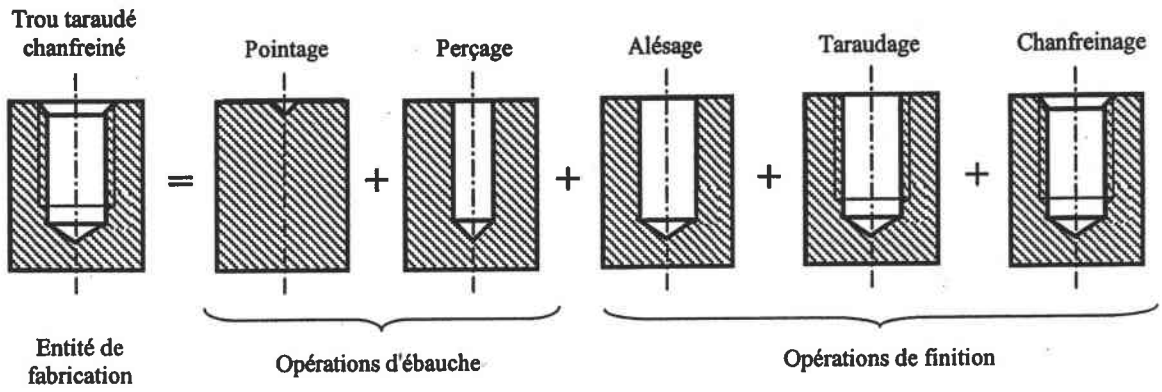


Figure 50. L'ensemble $\mathcal{F}$ des opérations potentielles de l'entité de fabrication Trou Taraudé

Dans la suite, nous nous intéressons à la modélisation des connaissances relatives aux opérations *potentielles*.

Cette connaissance se caractérise par l'association à chaque opération potentielle, d'un ensemble de machines. Cet ensemble constitue les ressources éventuellement capables d'assurer la réalisation de l'opération de l'entité de fabrication en question.

Cette hiérarchisation des connaissances à partir des différents type d'entités de fabrication en passant par les opérations potentielles associées, nous mène à la capitalisation de l'expertise d'estimation de coût propre à chaque couple (opération, machine). Ce couple constitue, en fait, **une Entité Coût** dans laquelle peuvent être appliquées toutes les définitions relatives à ce concept, telles que développées au chapitre 2.

Ainsi, ce pôle d'expertise peut être décomposé en trois tâches :

- La première relative à l'association d'un ensemble $\mathcal{F}$ d'opérations potentielles à chaque type d'entité de fabrication,
- La deuxième relative à l'association d'un ensemble de machines capables pour chaque opération potentielle,
- La troisième relative à la capitalisation de l'expertise d'estimation de coût propre à chaque couple (opération, machine) : les différentes Entités Coût élémentaires.

3.2.3.1 Structure de données d'une opération

Nous avons défini précédemment un contexte pour chaque type d'entité de fabrication. Nous avons vu également qu'à chaque type d'entité de fabrication il lui correspond un ensemble $\mathcal{F}$ d'opérations *potentiellement* nécessaires à sa réalisation.

Ces opérations potentielles formeront les sous-contextes de l'entité de fabrication correspondante (figure 51).

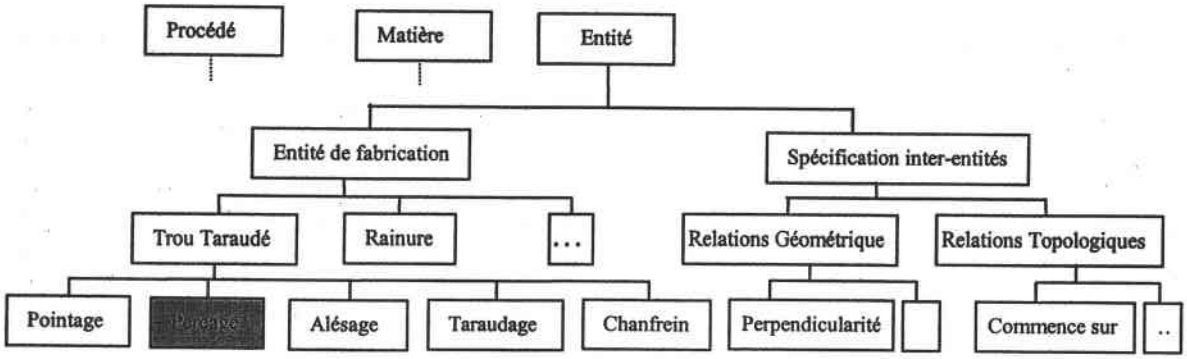


Figure 51. Les sous contextes opérations de fabrication

Cela permet d'hériter les données intrinsèques de chaque entité de fabrication au niveau des contextes opérations. Ces données sont nécessaires à la méthodes d'estimation du coût rattachée au contexte opération.

Ainsi, les *caractéristiques Entité* d'un *contexte* opération sont de deux types :

- Une caractéristique statique : l'ensemble des machines capables.
- Une caractéristique fonctionnelle : la formule d'estimation du coût de l'opération.

Cette modélisation procède par enrichissements successifs en spécialisant les contextes existants : les sous-contextes héritent les caractéristiques déjà présentes sur leurs ancêtres et d'autres plus spécifiques peuvent leur être rattachées.

3.2.4 Définition des variables

Nous considérons le produit comme étant un assemblage d'entités de fabrication. Une entité de fabrication est assujétie à un enchaînement d'opérations de fabrication. Ces entités sont reliées entre elles par des relations topologiques et géométriques. Toute décision de conception porte obligatoirement sur les entités et/ou sur leurs relations et se répercute respectivement sur le processus de fabrication de l'entité et sur le processus de production du produit.

Ainsi, nous caractérisons le processus de fabrication du produit au travers d'un nombre fini de variables qui correspondent à l'état conceptuel du Modèle Produit.

Les variables relatives aux précédences entre les opérations

A une opération effective j de l'entité de fabrication i ($X_{i,j}$) correspond un ensemble de machines capables. L'association de l'opération à une machine bien déterminée définit l'opération j sur la machine k de l'entité de fabrication i ($X_{i,j,k}$).

$X = \{X_{i,j,k,i',j',k'}\}$ constitue le premier ensemble des variables. Elles sont booléennes (0,1) et relatives à la succession des opérations dans le processus de production du produit.

Les variables correspondent à des connaissances du Modèle Produit du point de vue fabrication. Les valeurs de ces variables seront la solution de l'application du mécanisme de raisonnement développé au chapitre suivant.

$X_{ijki'j'k'}$: 1 Si l'option k' de l'opération j' générée par l'entité de fabrication i' suit l'option k de l'opération j générée par l'entité de fabrication i,

0 Sinon.

On ajoute $X_{0,1,0}$ et $X_{n+1,0,0}$ qui représentent respectivement la pièce à l'état brut dans le stock matières premières et la pièce à l'état fini dans le stock produits finis.

Ainsi, pour chaque opération de fabrication $X_{i,j,k}$ du produit, il existe un vecteur d'opérations capables de la suivre :

$$\{X^{(i,j,k)}\} = \begin{Bmatrix} X_{i,j,k,1,1,1} \\ X_{i,j,k,1,1,2} \\ \vdots \\ X_{i,j,k,i'j',k'} \\ \vdots \\ X_{i,j,k,n+1,0,0} \end{Bmatrix}$$

A partir de l'ensemble des vecteurs de toutes les opérations, une matrice par blocs M est construite. Elle décrit l'ensemble des couples d'opérations susceptibles d'être présents dans le processus de production du produit (Tableau 5) :

$$[M] = [\{X^{(1,1,1)}\} | \ldots | \{X^{(i,j,k)}\} | \ldots | \{X^{(n+1,0,0)}\}]$$

[M] =

	$X_{0,1,0}$	$X_{1,1,1}$	$X_{1,1,2}$	$X_{1,2,1}$	$X_{1,2,2}$	$X_{2,1,1}$	...	$X_{n+1,0,0}$
$X_{0,1,0}$								
$X_{1,1,1}$								
$X_{1,1,2}$								
$X_{1,2,1}$		$X_{1,2,1,1,1,1}$						
$X_{1,2,2}$		$X_{1,2,2,1,1,1}$						
$X_{2,1,1}$		$X_{2,1,1,1,1,1}$						
...								
$X_{n+1,0,0}$								

Tableau 5. La matrice M

Cette matrice rassemble toutes les variables $X_{i,j,k,i',j',k'}$.

Si on considère : n le nombre d'entités de fabrication,
N_{ij} le nombre d'opérations d'une entité de fabrication i,
n_{ijk} le nombre d'options d'une opération j d'une entité de fabrication i,
N Nombre total d'opérations possibles.

On aura :

$$N \leq \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_i} n_{ij}$$

Les dimensions de M sont : (N+2) X (N+2). Chaque colonne est représentative de l'ensemble des opérations susceptibles de précéder une opération donnée, et chaque ligne est représentative de l'ensemble des opérations susceptibles de suivre une opération donnée.

L'ensemble de ces variables est émis par une lecture du Modèle Produit.

Les variables relatives au rang de chaque opération

Dans notre approche, nous nous intéressons au processus global de production du produit. L'ordre de chaque opération dans le processus est donc nécessaire. La détermination du rang de chaque opération retenue est fournie par une variable associée.

U = $\{U_{ijk}\}$ constitue l'ensemble de ces variables. Elles prennent des valeurs de nature entière.

Ces variables correspondent à des connaissances du Modèle Produit du point de vue fabrication. Les valeurs de ces variables constitueront la solution de l'application du mécanisme de raisonnement développé au chapitre suivant. Elles caractériseront l'ordonnancement du processus de production solution.

U_{ijk}: m Si l'option k de l'opération j générée par l'entité de fabrication i est exécutée comme la $m^{éme}$ opération dans le processus de production du produit,
0 Sinon.

L'ensemble U rassemble toutes les variables U_{ijk}. Leur nombre est N+2. Elles sont émises par une lecture du Modèle Produit.

3.3 Le Modèle Costgrammes

Pour concevoir, réaliser et livrer un produit, l'entreprise a besoin d'un certain nombre d'activités dispersées dans des départements (ou services) différents. Le coût du produit est le résultat de l'exécution de ces activités. A chacune d'elles correspond une Entité Coût qui capitalise le savoir-faire d'estimation lié à cet élément. Nous avons montré l'importance de cerner la causalité pour une estimation des coûts plus précise et plus transparente. Le Modèle Costgrammes que nous proposons permet d'avoir une vue globale de toutes les Entités Coût présentes dans l'entreprise et concernées par le traitement du produit. L'architecture retenue des ces Entités Coût explicite la notion de causalité existante des coûts générés.

Dans le Modèle Costgrammes, nous distinguons deux niveaux (figure 52) :

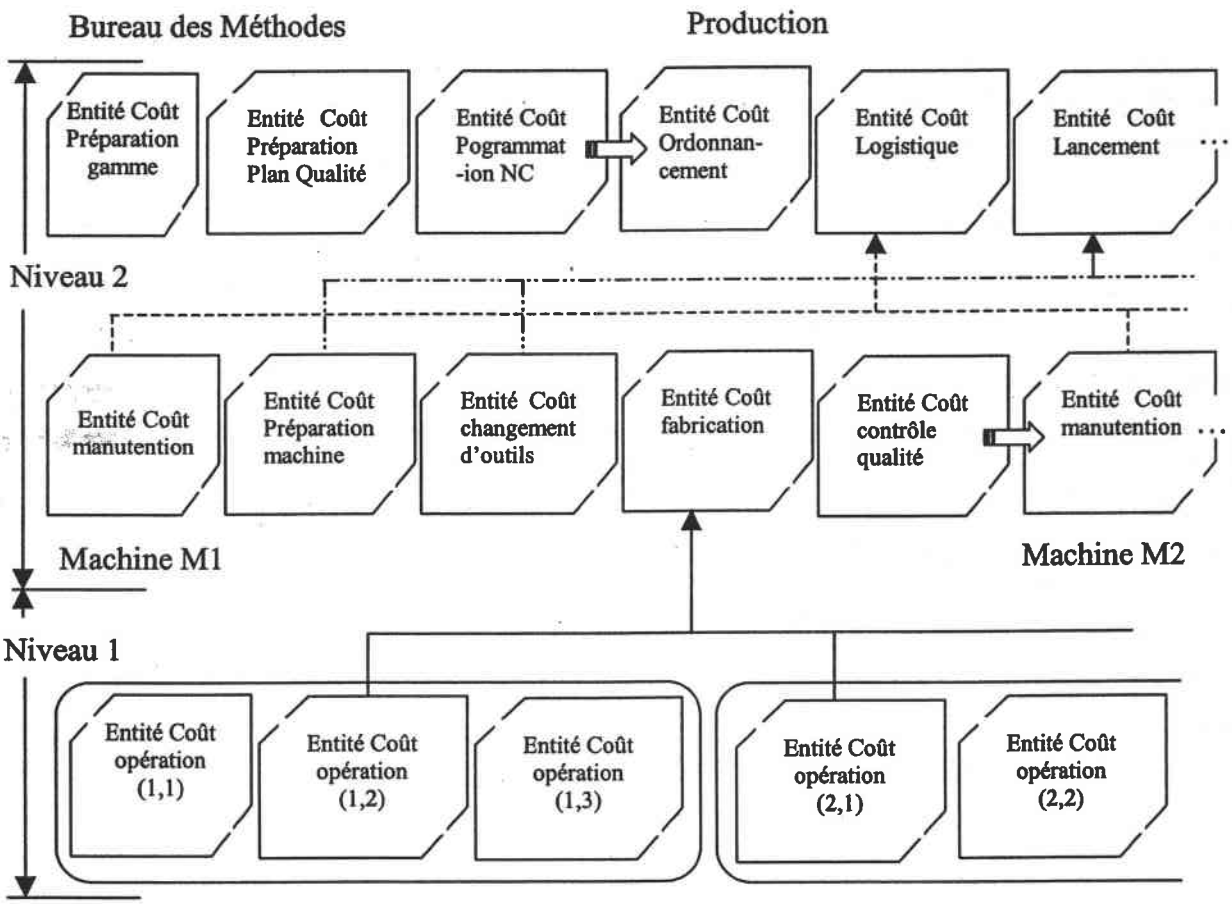


Figure 52. Le Modèle Costgrammes

Le coût total d'un produit est dépendant des entités de fabrication qui le composent et de leurs processus de fabrication et de production. Ainsi, le niveau 1 représente l'ensemble des opérations nécessaires à la réalisation des entités de fabrication constituant le produit. Ceci correspond à leurs processus et coûts directs intrinsèques. Le niveau 2 présente l'engagement ascendant d'un ensemble d'Entités Coût présentes dans l'entreprise (l'étendue du modèle est à déterminer en fonction de l'entreprise). Cet engagement est provoqué par les Entités Coût

directs du niveau 1, il est de type causal. Le niveau 2 comporte des Entités Coût de types direct/indirect et élémentaire/mère. Ainsi, la distinction coût direct/coût indirect perd de sa pertinence, toutes les charges étant directement reliées au produit.

Dans la suite, il est nécessaire d'établir une méthodologie pour identifier les Entités Coût ainsi que les inducteurs influençant le coût d'un produit. La notion de processus, suite chronologique d'un ensemble d'Entités Coûts, sera abordée dans la suite.

3.3.1 Identification des Entités Coût

Pour identifier les EC, il est nécessaire d'établir la hiérarchie des activités dont le coût est affectable aux objets de coût. Une telle hiérarchie doit être construite avec une analyse descendante de l'entreprise. Au niveau le plus élevé, la totalité de l'entreprise peut être considérée comme une Entité Coût mère qui est détaillée ou décomposée en un ensemble d'Entités Coût mères plus spécialisées, par exemple conception, préparation à la fabrication (Bureau des méthodes), etc. Ces EC sont à leur tour décomposées jusqu'à atteindre les Entités Coût élémentaires respectant la condition d'homogénéité et garantes de la précision des calculs. Dans le cas contraire, l'EC sera considérée comme Entité Coût mère et la décision de la décomposer revient aux objectifs de l'entreprise. A cette effet, et pour ne pas tomber dans « l'usine à gaz », une analyse PARETO peut être effectuée afin de prendre la décision convenable pour déterminer la granularité du Modèle Costgrammes. Ce que l'on perdrait en finesse, on le gagnerait en simplicité de calcul et réciproquement.

La décomposition de l'entreprise en Entités Coût résulte des actions suivantes :

- Définir un groupe de projet ;
- Etablir une première liste d'Entités Coût ;
- Identifier tous les attributs de chaque Entité Coût ;
- Valider la décomposition en Entités Coût mères et en Entités Coût élémentaires.

La première étape consiste à constituer un groupe de projet. Mettre en œuvre l'approche avec un seul interlocuteur équivaut à faire définir des coûts par cette personne que celle-ci serait la seule à comprendre. Cela revient à ne pas communiquer aux opérationnels les objectifs fixés, l'état d'avancement de ces objectifs, la structure des coûts. Aussi, la valeur ajoutée de l'approche est importante si le groupe de projet est constitué de tous les responsables de service concernés afin que le chef de projet fasse émerger le découpage en Entités Coût le plus pertinent possible.

Dans la deuxième étape, des entretiens individuels et des réunions collectives avec les membres du groupe sont nécessaires. Ils contribueront à faire comprendre les concepts et les objectifs de l'approche, les membres du groupe peuvent alors participer à l'établissement d'une première liste d'Entités Coût.

La troisième étape porte sur l'identification des attributs de chaque Entité Coût (figure 53) : l'inducteur, les objets d'entré/sortie, les ressources et l'activité support. Ces informations doivent être collectées pour chaque Entité Coût afin d'obtenir les retombées souhaitées dans la mise en œuvre, il est possible de constituer un dictionnaire des Entités Coût.

Nom de l'Entité Coût	
L'activité	Verbe
Objet entrée	L'intrant principal de l'activité (informationnel ou matériel)
Objet sortie	L'extrant principal de l'activité (informationnel ou matériel)
Inducteur (d'activité)	Variable permettant de répartir le coût de l'Entité entre les objets de coût
Ressources	Tous les moyens humains, financiers, commerciaux, technologiques utilisés par l'Entité Coût

Figure 53. Les attributs d'une Entité Coût

Un point important de cette étape est l'identification des ressources de chaque Entité Coût. Les ressources propres à l'Entité ne posent pas de problème (Exemple : la main d'œuvre, les consommables). Pour les ressources qui n'auront pas pu être affectées directement à l'Entité Coût, l'objectif est d'abord de les répartir classiquement par service, puis par Entité Coût en appliquant un *inducteur de ressources,* comme le montre la figure 54. Cela concerne notamment les charges du service.

Soit le service Bureau des Méthodes d'une entreprise ayant les Entités Coût suivantes :

- vérification de la fabricabilité,
- préparation gamme,
- élaboration du plan Contrôle Qualité,
- programmation des MOCN.

Chacune des Entités Coût ci-dessus a ses propres ressources : Main d'œuvre, fournitures, matériels, etc.
Pour la répartition des ressources du service, on procède comme suit :

- on estime avec un comptage sur une période donnée (un mois), le temps passé par le personnel sur chaque Entité Coût,
- ensuite, ces temps seront transformés en pourcentage du temps total du service :

vérification de la fabricabilité,	17 h	10 %
préparation gamme,	67 h	40 %
élaboration du plan Contrôle Qualité,	34 h	20 %
programmation des MOCN.	51 h	30 %
	169 h	100 %

- les ressources communes du service seront réparties sur ces Entités Coût identifiées en fonction des pourcentages

Inducteur Ressource : l'heure.

Figure 54. Répartition des ressources liées au service entre les Entités Coût

Toutes les Entités Coût consomment des ressources (propres et liées au service). La règle à retenir est que les Entités Coût appartenant à un service doivent consommer un certain minimum de ces ressources pour être retenues dans l'analyse. Il convient donc de fixer un plancher au-dessous duquel l'Entité Coût ne sera pas retenue, mais amalgamée à une autre. Ce plancher est un curseur variable selon les entreprises et les Entités Coût. La règle présentée dans le Tableau 6 est une proposition.

$\frac{\text{Ressources d'une Entité Coût}}{\sum \text{ ressources des Entités Coût d'un service}}$	Entité Coût à retenir
Moins de 1 % des ressources	Trop faible, ne pas retenir cette Entité Coût
Entre 1 et 5 % des ressources	A étudier au cas par cas
Au-dessus de 5 % des ressources	A retenir comme Entité Coût, susceptible d'être décomposée

Tableau 6. Critères de consommation de ressources dans le choix des Entités Coût

Une fois que le triplet Entité Coût *i* / ressources *k* / inducteur est connu, nous déterminons le coefficient de consommation de chaque ressource :

- détermination de la valeur (y^i_k) correspondante à la quantité consommée par chaque ressource k sur une période donnée.
- détermination du coefficient de consommation α_k de la ressource k :

$$\alpha^i_k = y^i_k / Inducteur$$

Ce coefficient sera employé dans l'équation de base de l'Entité Coût (voir section 2.3) :

$$Coût = \sum_{k \in Ri} C_k(y^i_k(x_i))$$

La quatrième et dernière étape consiste à valider la décomposition en Entités Coût mères et en Entités Coût élémentaires. Elle a deux objectifs :

- s'assurer que chaque Entité Coût est bien significative et représentative de ce qui est fait, soit parce qu'elle crée de la valeur pour les objets coût, soit du fait qu'elle consomme beaucoup de ressources.
- s'assurer que le nombre d'Entités Coût n'est pas trop important et que le groupe de projet n'est pas en train de créer une « usine à gaz ».

Un exemple de décomposition d'une entreprise fictive en Entités Coût mères est montré par la figure 55. A un niveau relativement élevé, on trouve les Entités Coût Conception, Bureau des Méthodes, Production, etc. Chacune de ces entités coût peut être détaillée.

Dans cet exemple, l'Entité Coût Production est détaillée en Entités Coût Planification, Logistique, Lancement et Fabrication.

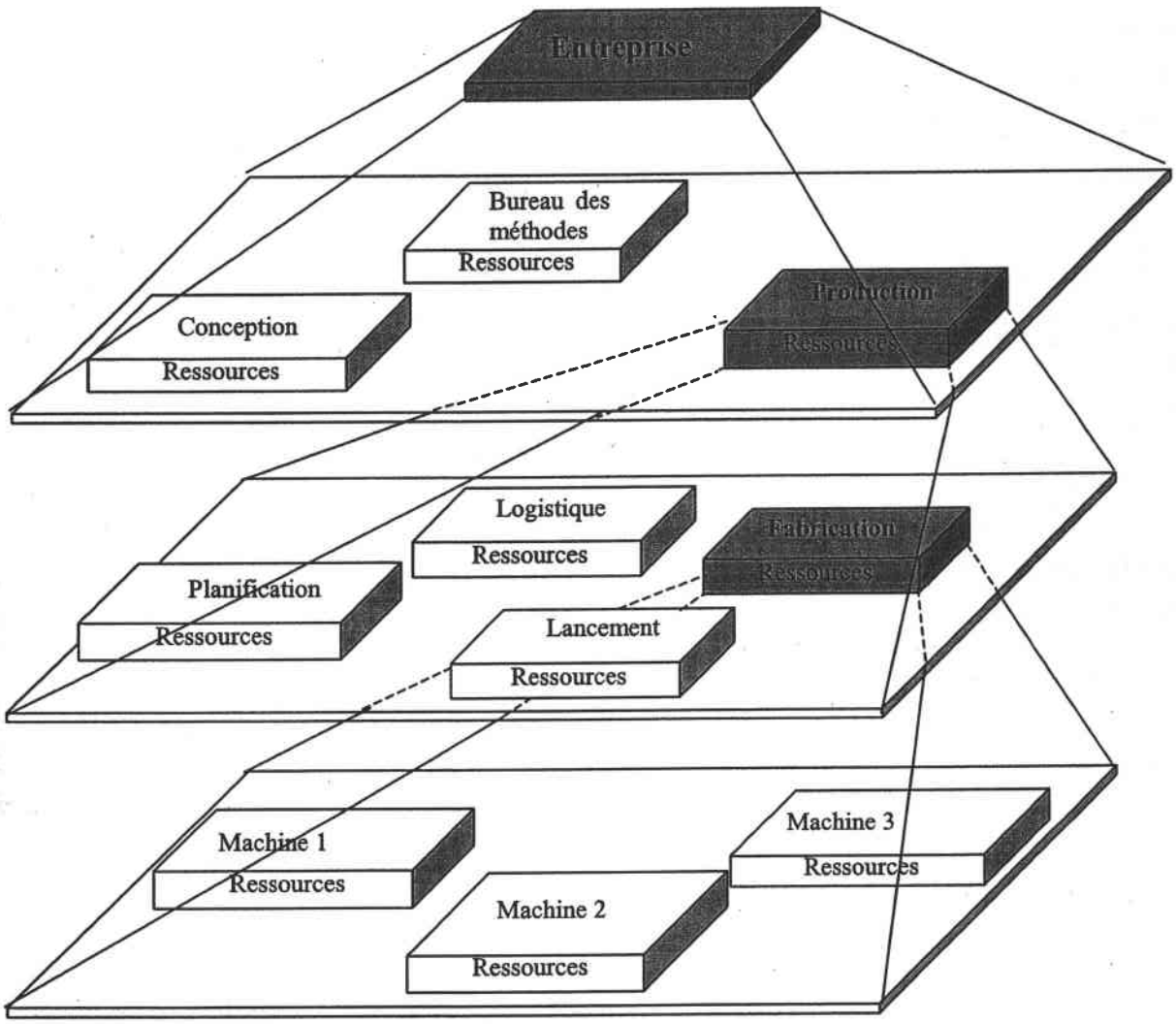


Figure 55. Exemple de décomposition en entités d'une entreprise fictive

Dans les cas où il est paraît nécessaire d'obtenir plus de détail sur une Entité Coût mère, un zoom peut être appliqué pour une définition précise. Quand il n'y a plus de zoom possible, la procédure est considérée comme terminée et l'Entité Coût comme élémentaire.

Pour un produit déterminé, l'analyse ascendante de cette architecture statique de l'entreprise (figure 55) fourni le Modèle Costgrammes associé . La projection de ce Modèle Costgrammes sur une Plate-Forme Entités Coût élémentaires (figure 56) présente l'engagement successif des Entités Coût élémentaires nécessaires à la réalisation du produit. La somme de leurs coûts est égale alors au coût total du produit.

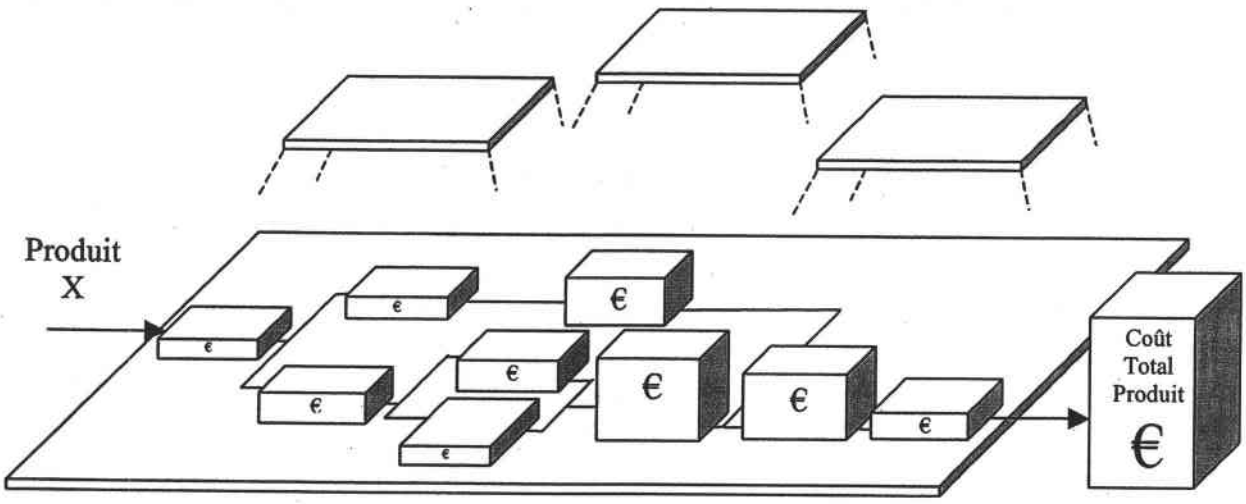


Figure 56. Plate-forme Entités Coût élémentaires

Nous pensons qu'une approche basée sur les Entités Coût permet plus facilement l'analyse des efforts fournis par l'entreprise, et par conséquent, une connaissance plus fine des coûts engendrés par la production du produit.

3.3.1.1 Structure des données d'une Entité Coût

Chaque Entité Coût fait appel à des paramètres internes de description (inducteur, activité, ressources, etc.) que nous avons regroupés sous le terme générique d'attributs, mais également à des informations relatives au processus auquel elle appartient et à l'Entité Coût mère auquel elle est rattachée. Cet ensemble de connaissances permet de discerner l'Entité Coût en question et de lui associer une méthode d'estimation propre.

La transcription retenue de ce groupe de données s'appuient sur une représentation en classes objets, appelées *contextes* dans l'outil CostAdvantage (figure 57).

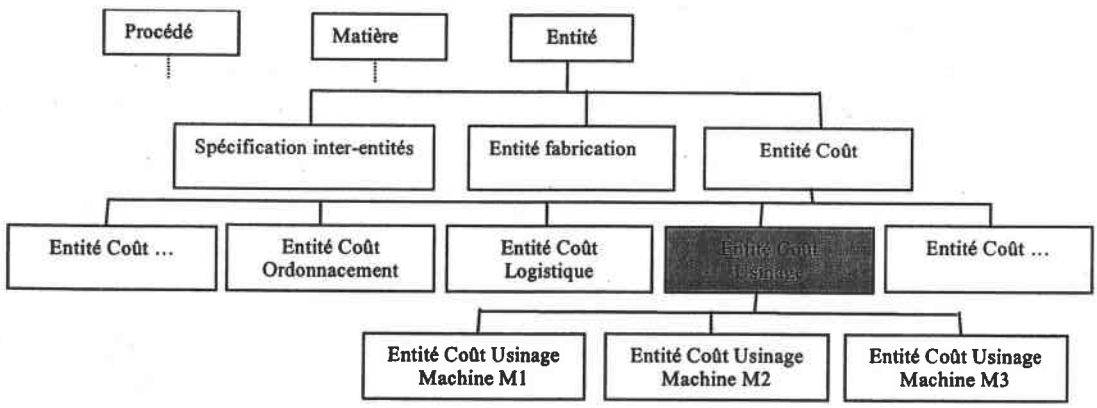


Figure 57. Les contextes et sous contextes de l'Entité Coût

Ainsi, nous avons défini une structure objet propre à l'expression des Entités Coût. Chaque type d'Entité Coût est associé à un contexte objet. *Les caractéristiques Entité* du *contexte* associé au type de l'Entité Coût en CostAdvantage, sont de deux types :

- Caractéristiques statiques : type (mère ou élémentaire), activité, ressources, objet entré, objet sortie, processus, Entité Coût mère (optionnel).
- Caractéristiques fonctionnelles : la formule d'estimation du coût de l'entité.

Cette structure en contextes mères et filles correspond à l'architecture du Modèle Costgrammes en Entités Coût mères et élémentaires, elle permet d'expliciter la notion de traçabilité des coûts dans l'entreprise.

Un autre point important que le Modèle Costgrammes permet d'identifier est le processus (figure 58). En effet, Les entreprises évoluent, aujourd'hui, dans un environnement très incertain, très changeant et dominé par une forte concurrence internationale. Pour rester compétitives, s'adapter toujours plus rapidement, et garantir leur réactivité, il s'agit désormais pour les entreprises de ré-envisager la gestion de l'ensemble de leurs activités de manière à les réorganiser constamment. Cette réorganisation fréquente des activités conduit à ériger comme support au calcul économique les processus transversaux au sein de l'entreprise. Cela lui permet de mieux connaître et d'optimiser ces processus, mais aussi de passer en sous-traitance les processus où des faiblesses, voire des pertes financières, sont détectées.

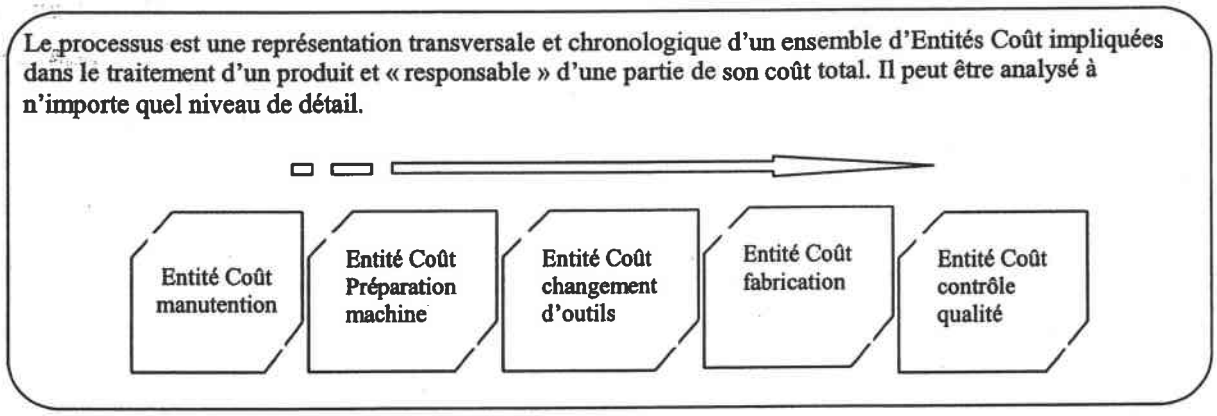


Figure 58. Processus d'Entités Coût

Le processus doit être construit par une équipe interdisciplinaire comportant des membres ayant une connaissance significative de l'architecture de l'entreprise. La construction se fait par une analyse descendante. A chaque niveau, la procédure de développement montrée par la figure 59 doit être appliquée. La première étape consiste à avoir une vue globale verticale de toutes les Entités Coût. Ensuite, une étude chronologique des différentes EC doit être effectuée avec une représentation en processus transversaux clairement définis.

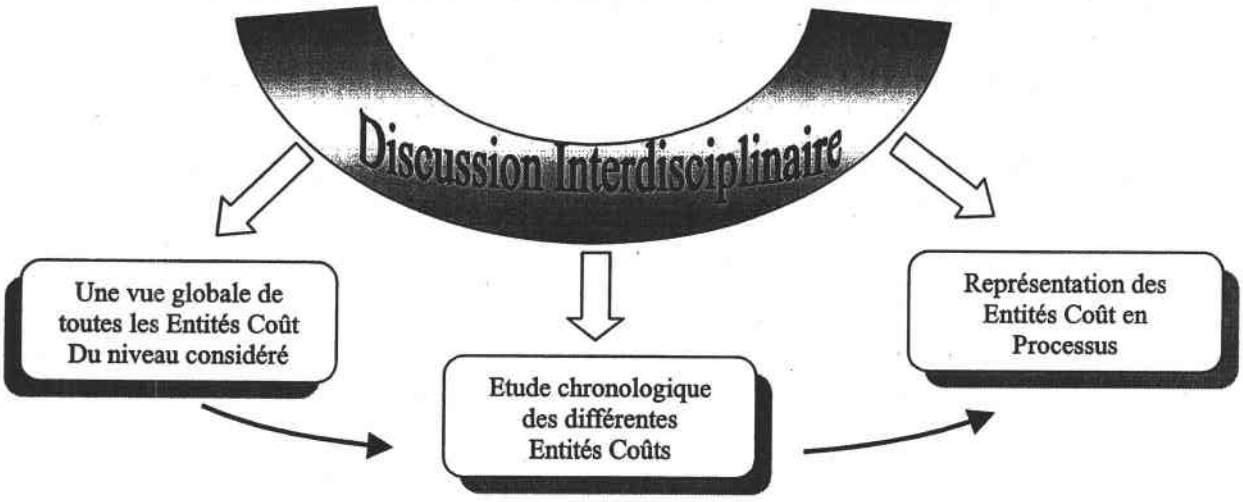


Figure 59. Construction des processus

3.3.2 Identification des inducteurs

L'Entité Coût représente la base du Modèle Costgrammes. Néanmoins, la question qui peut être posée est la suivante : quelles Entités coût seront « activées » par un produit considéré et quel sera le coût de chacune d'elles ? Afin de répondre à cette question, il s'agit d'identifier les inducteurs des Entités Coût qui permettent d'affecter les coûts des activités aux produits, aux entités de fabrication et autres objets de coût.

Comme cela a été évoqué précédemment, les inducteurs sont issus des caractéristiques produit et de son processus de production. Ils chiffrent les Entités Coût et établissent les liens de causalité existants entre ces Entités Coût et le couple produit/process. Donc, il est nécessaire de connaître quel paramètre produit/process influence quelle Entité Coût.

Nous rappelons que les nouvelles méthodes de production augmentent les coûts indirects. Nous ne pouvons plus les négliger ou laisser leur calcul aux méthodes conventionnelles issues de la comptabilité analytique dont les limites ont étés analysées précédemment. Les inducteurs doivent être identifiés pour toutes les entités coûts, qu'elles soit supportée par une activité directe ou indirecte (figure 60).

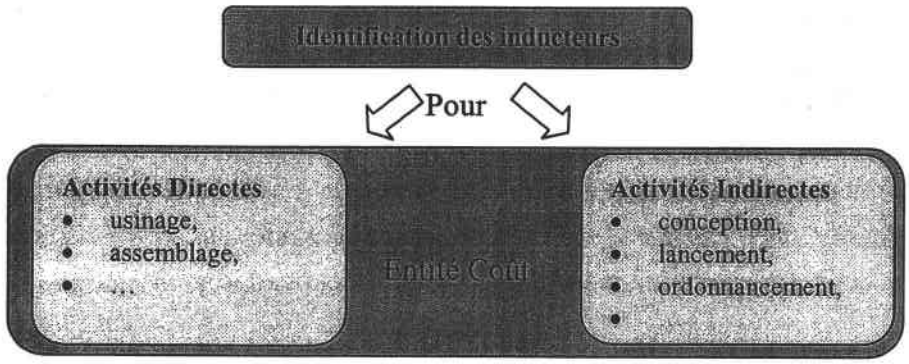


Figure 60. Identification des inducteurs

Pour l'identification des inducteurs, plusieurs méthodes peuvent être employées :

- Des interviews avec les personnes appartenant à l'Entité Coût peuvent être mis en œuvre afin d'avoir des informations concernant les inducteurs les plus influents. Par exemple, le responsable de l'Entité Coût « Lancer la production » sait très bien que certaines familles de produits sont fabriquées en petites séries et nécessitent des lancements fréquents pour éviter des stocks trop importants, alors que d'autres sont lancées en grandes séries. L'interview permettra d'identifier « le nombre d'ordres de fabrication de chaque produit » comme inducteur de cette Entité Coût. La répartition de son coût entre les différents produits sera fait sur la base de cet inducteur. Ainsi, la première catégorie de produits (petites séries) voit donc son coût de revient augmenter, alors que la seconde (grandes séries) est moins pénalisée qu'avant.
- La deuxième méthode qui peut être utilisée est la méthode statistique. En se basant sur un nombre suffisant de données historiques d'un ensemble assez large d'inducteurs et de coûts de l'entité, on sélectionne l'inducteur le plus influant.
- La troisième méthode est appelée la méthode orientée technologie (ou analytique). Elle consiste en une analyse détaillée de l'EC, les variables nécessaires à l'estimation sont mesurées réellement et l'inducteur est déduit à partir de ces mesures.

Les résultats des recherches scientifiques sur les différents types d'opération de fabrication et le lot d'information concernant les procédés de fabrication disponibles dans la littérature [Padilla et Thèly, 1978] fournissent des données étendues et précises permettant d'alléger l'application de la troisième méthode pour les opérations de fabrication. C'est la méthode retenue pour les Entités Coût « opération de fabrication » (figure 61). Pour le reste des Entités Coût, c'est la première méthode qui sera employée.

La méthode orientée technologie, adoptée pour le niveau le plus bas du Modèle Costrgrammes, nous a ramené à déterminer pour chaque opération type considérée les quantités suivantes :

Débit de métal enlevé	Cm^3 / mn si c'est une opération d'ébauche.
Débit de surface produite	Cm^2 / mn si c'est une opération de finition.

Ce paramètre appelé « Débit » remplace les trois paramètres (Vc, f, Ap - Vitesse de coupe, Avance outil, profondeur de passe outil) appelés paramètres de coupe utilisés dans les méthodes classiques de calcul du temps de coupe. A ce niveau, un logiciel de paramètres de coupe tels que TOOL-LIGHT, MASTER-Tool ou ADC Coupe du CETIM peut être interfacé pour la détermination de ces débits.

Pour les opérations d'ébauche		
Coût = Vol / Débit * Taux d'imputation	Débit	= cm^3 / mn
	Vol	= Volume de matière enlevée cm^3
Pour les opérations de finition		
Coût = Surf / Débit * Taux d'imputation	Débit	= cm^2 / mn
	Surf	= Surface produite cm^2

Inducteur = Volume à enlever

Figure 61. Inducteur de l'Entité Coût « Opération de fabrication »

3.4 Le passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes

Le constat d'accroissement des coûts indirects au détriment des coûts directs, développé précédemment, nous a amené à accorder une attention particulière aux activités auxiliaires présentes dans le système de production et au delà dans l'entreprise. Le Modèle Costgrammes que nous avons développé tente de répondre à ce souci en intégrant l'ensemble des Entités Coûts traçables indépendamment de leurs types de coût (direct/indirect). Ainsi, l'estimation de coûts sera transférée du Modèle Produit au Modèle Costgrammes. L'Entité Coût « Opération de fabrication » est le lien entre ces deux modèles (figure 62).

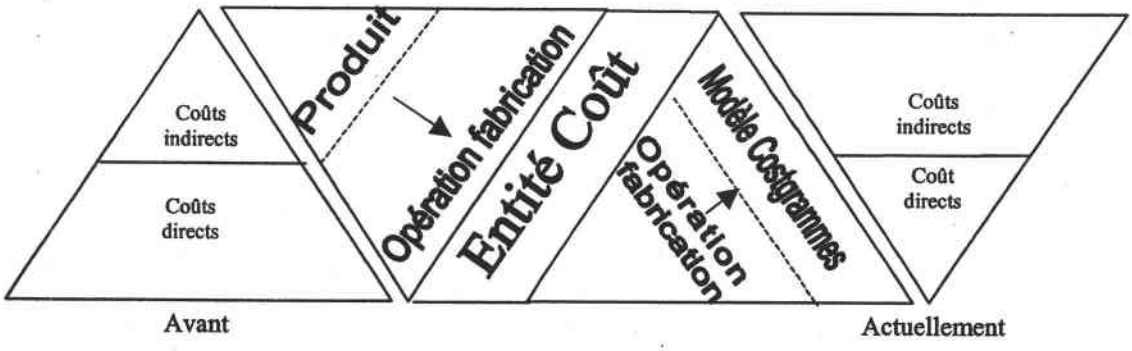


Figure 62. L'Entité Coût : un lien entre le Modèle Produit et le Modèle Costgrammes et un traitement commun du coût direct et indirect [H'mida *et al.*, 2001a]

L'analyse ascendante du Modèle Costgrammes est présentée dans la figure 63. L'inducteur, issu des caractéristiques produit puis du niveau 1 assure respectivement la causalité des coûts engagés au niveau 1 puis au niveau 2 (figures 63 et 65).

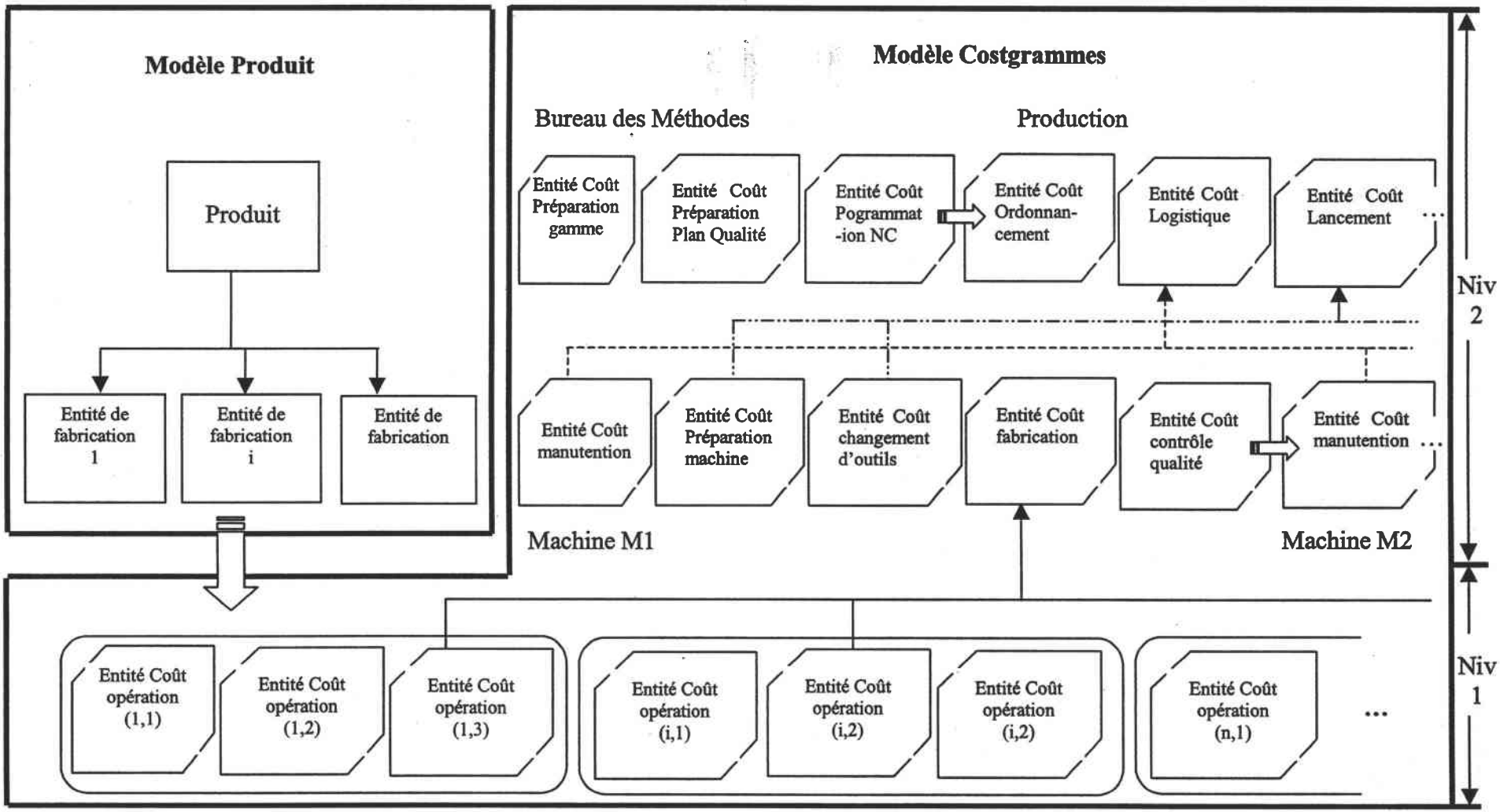


Figure 63. Le Modèle Produit / Costgrammes

La figure 64 résume la démarche d'estimation des coûts. Elle met en évidence la logique du passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes.

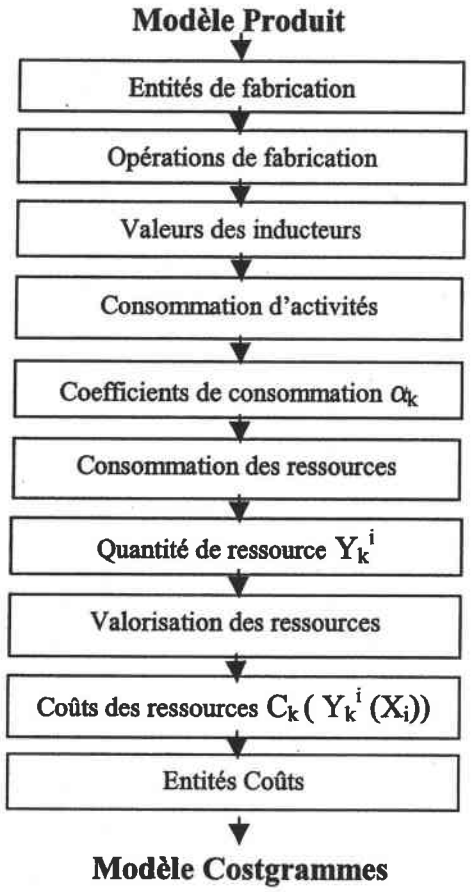


Figure 64. Logique de passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes

- Entité Coût Changement d'outils sur la machine M1 :

Le cout de l'activité changement d'outil augmente avec le nombre d'opérations [Blondaz, 1999].

Inducteur = Nombre d'opérations sur la machine M1

- Entité Coût Contrôle qualité à la sortie de la machine M1 :

Le coût de l'activité de contrôle qualité augmente avec le nombre d'opérations de finition :

Inducteur = Nombre d'opérations de finition sur la machine M1.

- Entité Coût Elaboration gamme :

Le coût de l'activité d'élaboration gamme augmente avec le nombre d'opérations.

Inducteur = Nombre total d'opérations d'usinage.

- Entité Coût Développement du plan contrôle qualité :

Le coût de l'activité de développement du plan de contrôle qualité augmente avec le nombre total d'opérations de finition.

Inducteur = Nombre total d'opérations finition.

Figure 65. Exemples d'inducteurs d'Entités Coût du niveau 2

Ainsi, le traitement d'un produit est vu comme l'engagement successif d'un certain nombre d'Entités Coût élémentaires nécessaires à sa réalisation et issues de services différents. La somme de leurs coûts est égale au coût total du produit. La figure 66 présente la plate-forme d'Entités Coût élémentaires correspondante à un Modèle Produit fournissant les inducteurs nécessaires au Modèle Costgrammes.

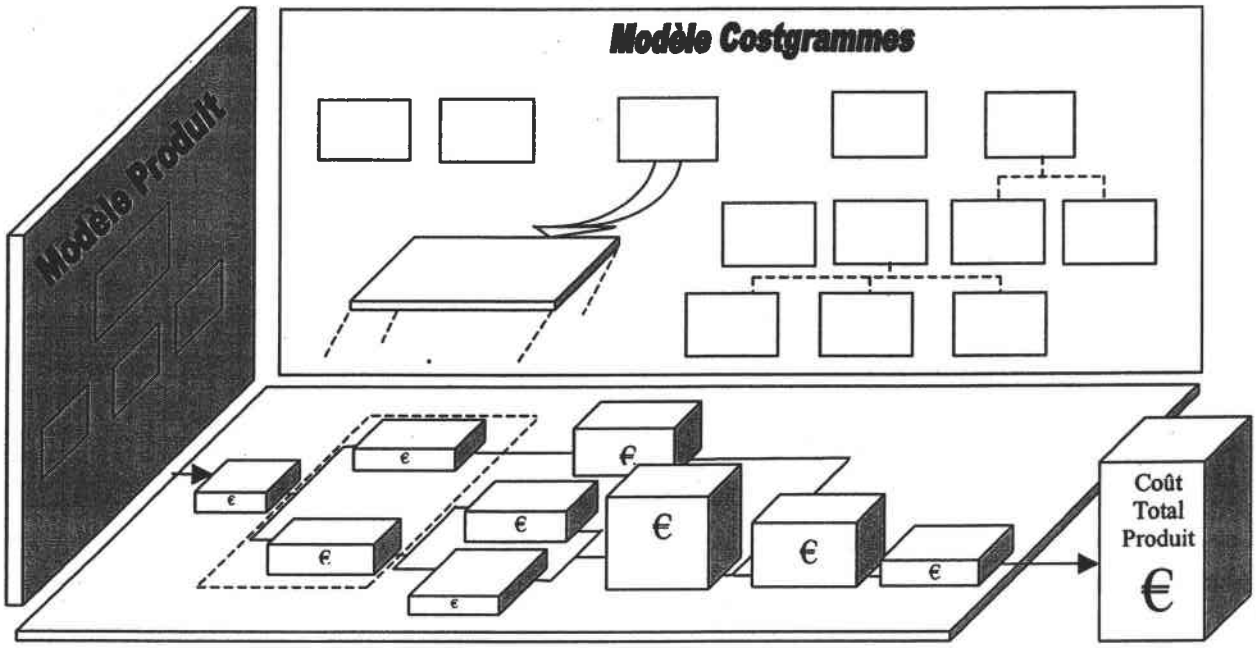


Figure 66. Plate-forme Entités Coût élémentaires

Conclusion

Ce chapitre concernait la modélisation des connaissances. Il a permis de définir les Modèles Produit et Costgrammes de la figure 66, soit en d'autres termes, de décrire l'univers auquel l'estimation des coûts d'un produit, d'une entité de fabrication...va se référer. Le chapitre suivant consiste à modéliser le raisonnement, à identifier les composantes et à spécifier les connaissances exploitées par celui-ci. Les décisions prises au niveau de la conception et de la production peuvent être, ainsi, automatiquement évaluées du point de vue économique.

Chapitre 4

Estimation des coûts : Modélisation des raisonnements

4.1 Introduction

Nous avons défini dans le chapitre précédent la connaissance nécessaire à l'estimation des coûts. En résumé, cette connaissance correspond à un niveau de perception du produit et de l'entreprise. Pour une entreprise manufacturière, l'art de l'estimation des coûts consiste à évaluer la consommation des ressources engendrée par le passage du produit dans l'entreprise. Les spécialistes appliquent leur savoir faire pour identifier les Entités Coût traversées par le produit. Cette tâche est complexe pour différentes raisons :

- Une croissance des activités indirectes liées aux produits. Leur estimation demande un suivi précis du processus de production nécessaire à la réalisation du produit.
- Un contexte de production très dynamique, qui influe également sur la validité d'une estimation des coûts du produit. La prise en compte de la disponibilité des ressources n'est pas *a priori* du ressort de l'estimateur, mais les conséquences des hypothèses interviennent au moment du passage en production. Elles peuvent conduire à l'invalidation de l'estimation des coûts au niveau du service ordonnancement.
- Une évolution technologique permettant à une même opération de fabrication d'être obtenue par différents procédés ; selon les spécifications portant sur la géométrie, le nombre de procédés éligibles sera plus ou moins élevé. D'un point de vue économique, le coût du produit est strictement dépendant de la machine employée et choisie.
- Des contraintes de fabrication liées aux précédences entre les opérations de fabrication doivent être prises en compte au plus tôt. Cette connaissance est nécessaire pour l'estimation des coûts de préparation des machines et de manutention.
- Une démarche de réduction de coûts demande une approche d'analyse causale des coûts intégrant la fonction conception.

Nous avons constaté que le raisonnement global d'estimation des coûts est le résultat d'un ensemble de raisonnements élémentaires. Le premier élément de la chaîne est l'estimation du coût des opérations de fabrication nécessaires à la réalisation d'une entité de fabrication. Ce premier élément est un problème linéarisable. Nous avons donc adopté une formalisation du problème sous forme de règles de type « Si – Alors », dites règles de production dans les systèmes experts. Les mécanismes d'analyse et d'expertise liés à la fabrication de chaque entité ont été transcrits sous forme de règles de ce type. Chaque opération générée encapsule l'expertise d'estimation de coût associée. Ainsi, pour chaque entité de fabrication définie dans le Modèle Produit, le système expert doit proposer les coûts estimés du processus de fabrication correspondant.

Le raisonnement global d'estimation de coût d'un produit est plus compliqué. Il a pour objectif d'affecter des valeurs cohérentes à chaque variable déterminée. Une valeur est cohérente lorsqu'elle respecte toutes les conditions. Ces conditions élémentaires, que nous exprimons sous forme de contraintes, permettent de cerner un ensemble de processus de production qui sont des solutions du problème. A chacune correspond un coût composé de trois types : les coûts d'opérations de fabrication, les coûts de préparation des machines et les coûts de manutention.

Ce chapitre détaille la modélisation des raisonnements relatifs à l'estimation des coûts. Il s'articule autour de quatre parties essentielles.

Dans un premier temps, nous proposons une analyse du raisonnement de l'estimateur. Ce travail aboutit à la représentation du schéma général de création d'une estimation. Il représente l'ensemble des tâches nécessaires à l'estimation. L'ensemble de l'analyse a permis de cerner les principes de base retenus et les fonctionnalités attendues d'un système d'aide à l'estimation des coûts.

Dans un deuxième temps, nous limitons l'étude aux entités de fabrication. Nous présentons les différentes approches éventuelles d'automatisation de l'estimation du coût du processus de fabrication associé. Nous exposons la structuration des données de l'approche retenue. A cette étape, seules les opérations de fabrication sont prises en compte.

Dans un troisième temps, l'étude porte sur le produit en entier. Nous introduisons la notion de contraintes. Nous montrons en quoi la technique de programmation par contraintes peut s'adapter à l'élaboration d'un système d'aide à l'estimation des coûts des processus de production alternatifs d'un produit. A cette étape, les coûts de préparation des machines et de manutention sont pris en compte, en plus des opérations de fabrication. Les contraintes sont introduites dans un système dit système de satisfaction de problèmes par contraintes. Le modèle construit permet de classer tous les processus de production solutions par ordre décroissant du degré de satisfaction économique dans un contexte de production déterminé, tout en garantissant le respect des spécifications technologiques. Ainsi, l'ensemble des solutions est compris dans une fourchette bornée par un $Coût_{mini}$ et un $Coût_{maxi}$ des processus de production solutions.

Dans un quatrième temps, nous établissons les relations directes existantes entre le processus de production et des Entités Coût d'un niveau hiérarchique supérieur ou égal, telles que « programmation MOCN » ou « maintenance ». Ainsi, nous avons défini une fonction inducteur pour chacune des Entités Coût considérées. Les variables des fonctions sont issues du processus de production solution. Cela a permis d'estimer le coût total unitaire du produit et d'affecter à chaque entité de fabrication ses propres coûts indirects.

4.2 Les principes retenus

Ce paragraphe présente tout d'abord les principes de base retenus pour la mise en place d'un système d'aide à l'estimation des coûts. Cette synthèse va nous permettre de préciser les grandes lignes de la méthodologie retenue. Le but est d'identifier les concepts et les techniques informatiques les plus aptes à reproduire les mécanismes de raisonnement d'un estimateur de coûts en production mécanique.

Identification des entités de fabrication

En premier lieu, l'estimateur identifie, sur les plans relatifs à la pièce, l'ensemble des entités d'un point de vue fabrication et les tolérances géométriques associées.

UNIVERSITE DE METZ
S. C. D.

L'identification des entités, qui semble naturelle pour le gammiste car relative à la perception visuelle de la pièce, apparaît compliquée à automatiser. Dans l'approche par *« reconnaissance et extraction d'entités »*, la problématique consiste à définir les mécanismes complets qui permettent l'analyse de la définition numérisée d'une pièce afin d'en extraire automatiquement les entités de fabrication. Aussi, nous nous sommes donc orientés vers une conception des pièces par utilisation directe d'entités orientées fabrication [Sabourin, 1995] [Paris, 1995], que nous avons appelées « entités de fabrication ». C'est l'approche « conception par entités » (section 3.2.1).

Génération des coûts du processus de fabrication de chaque entité

Pour une entité de fabrication donnée, l'estimateur, dans le cas de l'élaboration manuelle du devis, associe par analogie, et en tenant compte de la cotation fonctionnelle à respecter, une ou plusieurs opérations regroupées sous le terme de processus de fabrication.

Pour estimer le coût des entités de fabrication identifiées pour une pièce, il est possible de leur associer un catalogue de processus de fabrication constitué d'une ou plusieurs opérations. Pour chaque opération, nous capitalisons le groupe de machines capables. Le choix de tel ou tel processus est fonction de l'ensemble des paramètres caractérisant l'entité de fabrication (figure 67). Le coût de chaque opération est fonction du volume (surface) à enlever et de la machine employée.

La figure 67 représente un extrait des processus associées à une entité de fabrication de type Trou Taraudé borgne. Le choix d'un processus envisagé dépend à la fois des caractéristiques géométriques et des tolérances géométriques intrinsèques de l'entité de fabrication.

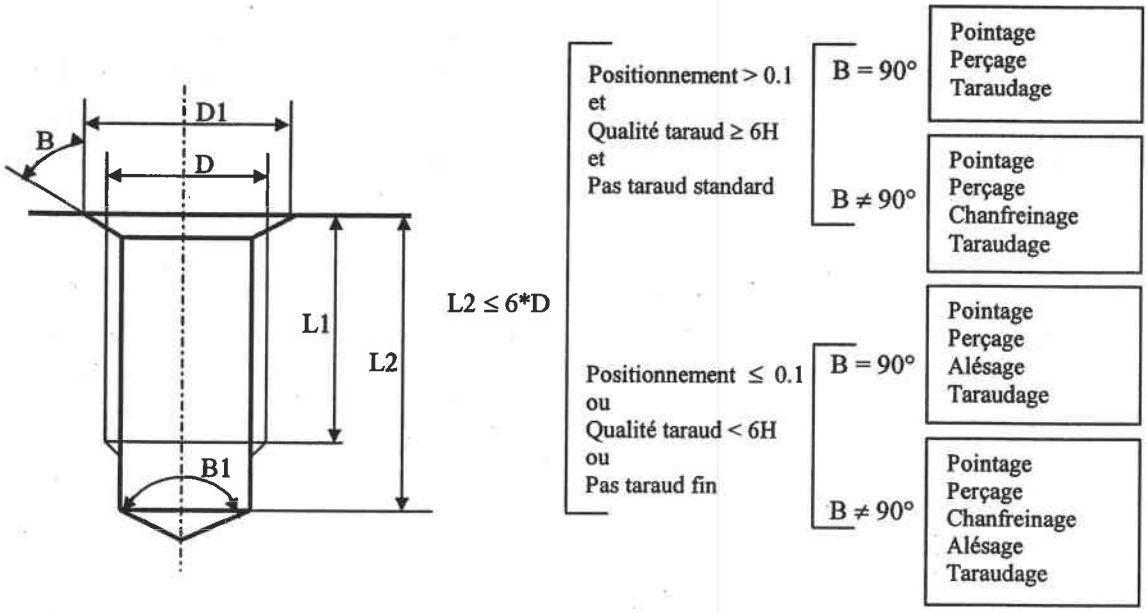


Figure 67. Extrait de l'expertise liée au Trou Taraudé borgne

Le problème de la génération automatique des coûts des processus de fabrication associés aux entités de fabrication de la pièce est un problème linéarisable. Comme indiqué en introduction, nous avons donc adopté une formalisation du problème sous forme de règles de type « Si – Alors ». Ainsi, pour chaque entité de fabrication définie dans le Modèle Produit, le système expert doit proposer les coûts estimés du processus de fabrication correspondants aux opérations effectives[9] de fabrication de l'entité.

Analyse des contraintes

Tout produit conçu et industrialisé doit répondre à certaines exigences. En termes de coût, le produit doit respecter le coût maximal admissible fixé dès le départ. Toute solution éloignée des objectifs économiques doit être sanctionnée et toute solution inférieure au coût maximal admissible doit exprimer un degré de satisfaction.

Le respect des *relations géométriques* précises de position et d'orientation entre les différentes entités conditionne l'ordre de certaines opérations dans le processus de production du produit. De même, les *relations topologiques* entre les différentes entités génèrent des précédences entre les opérations de fabrication. Par exemple, si un trou commence sur un plan, on cherchera à réaliser l'opération ébauche du plan avant celle du trou afin d'éviter tout problème d'usinage lié à une attaque sur brut. Ces relations spécifiées en phase de conception imposent alors des précédences entre les opérations, et elles exercent une influence directe sur les coûts de manutention et de préparation des machines.

Aussi, un contexte de production peut invalider une estimation du coût d'un produit. Il influe de manière restrictive principalement sur le choix des machines, selon que celles ci peuvent être ou non utilisées ou indisponibles.

Le modèle d'estimation de coûts qui nous semble le mieux adapté à une représentation explicite de la multiplicité des solutions techniques, et à une prise en compte des différentes dépendances vraies avec les fonctions de conception, fabrication et production, se présente sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes (CSP ou Constraint Satisfaction Problem). La modélisation par contraintes permet de considérer l'aspect granulaire du raisonnement d'estimation de coûts des processus de production d'un produit. En effet, un ensemble d'expertises élémentaires, appelées contraintes, peuvent être reliées entre elles au travers d'un réseau (ou graphe de contraintes). Une contrainte assure une relation entre les variables du modèle. Quatre types de contraintes seront distinguées : les contraintes propres au modèle, les contraintes de coût, les contraintes de fabrication et les contraintes de production. Comme nous allons le voir, ces contraintes concourent toutes à l'estimation du coût d'un processus de production solution pour un produit donné.

---

[9] Section 3.2.3

Dans la mise en œuvre pratique, les contraintes de fabrication et de production nécessitent des règles d'activation. Cette tâche sera effectuée dans le système expert CostAdvantage. Ensuite, elles sont introduites dans le système de satisfaction de contraintes.

Résoudre un CSP consiste à trouver un ensemble de valeurs admissibles à toutes les variables telles que toutes les contraintes soient simultanément respectées. Dans notre modèle, une solution se présente sous forme d'un processus de production auquel correspond un Coût noté C_{PP}. Les différentes solutions trouvées sont classées par ordre décroissant de satisfaction économique formant l'intervalle [$Coût_{mini}$, $Coût_{maxi}$].

Etablissement des liens de causalité dans le Costgrammes

Le processus de production d'un produit engage, suivant les opérations et les machines employées, un certain nombre d'Entités Coût d'un niveau hiérarchique supérieur ou égal (changement d'outil, réglage machine, contrôle qualité, programmation CN, lancement, ordonnancement...). Cet aspect de causalité implicite dans la structure de l'entreprise a été évoqué au chapitre 3 (section 3.4). Le Modèle Costgrammes a été défini dans cet esprit. Son objectif est d'expliciter et d'établir ces liens de causalité ascendants.

Ainsi, nous avons défini une fonction inducteur pour chacune des Entités Coût considérées. Les variables des fonctions sont issues du processus de production solution.

Conclusion

L'analyse et la synthèse de l'existant nous ont conduit à décomposer le problème global de l'estimation des coûts en trois domaines. Le premier est relatif à la génération des coûts du processus de fabrication associé à chaque entité de fabrication. Le deuxième est relatif à la génération des coûts alternatifs de production du produit. Le troisième porte sur l'analyse du Modèle Costgrammes et l'identification des fonctions inducteurs des Entités Coût concourantes.

L'analyse des mécanismes de raisonnement de l'expert pour chacun des domaines nous a amené à définir les principes de fonctionnement évoqués ci-dessus et présentés par le schéma global de la figure 68.

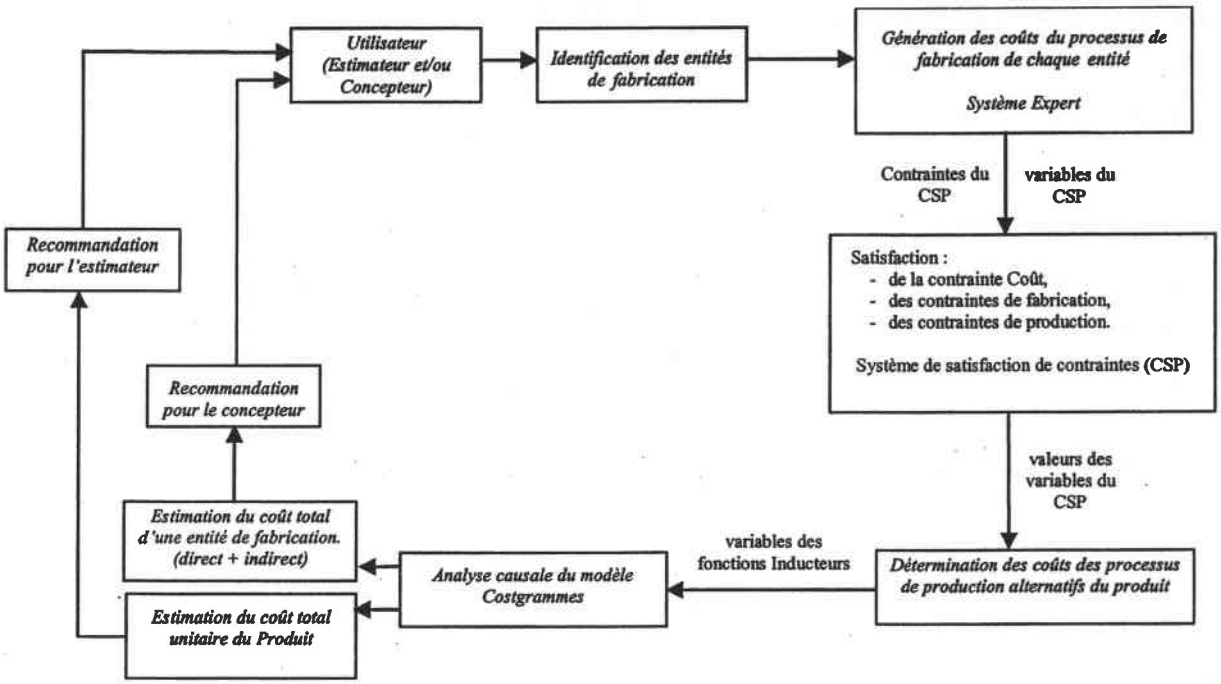


Figure 68. Schéma global de construction d'une estimation des coûts

La mise en place de ces principes nous a conduit à utiliser deux techniques de représentation informatique issues de l'Intelligence Artificielle (IA) : la première exploite l'expression des connaissances sous forme de règles de type « Si – Alors » pour la génération des coûts des opérations de fabrication, la deuxième repose sur les techniques de programmation par contraintes pour la génération des coûts des processus de production alternatifs.

Ainsi, le système construit fournit :

- Le coût total d'une entité de fabrication, ce qui apporte une aide précieuse à la décision dès la phase de conception détaillée à travers une évaluation économique des entités qui composent le produit pour des modifications éventuelles au plus tôt.
- Le coût total unitaire du produit, ce qui apporte une réponse rapide au problème du devis, ainsi qu'une aide au choix de gammes de fabrication intégrant le critère économique.

Nous allons maintenant détailler les deux domaines évoqués qui concernent :

- Les entités de fabrication et l'estimation des coûts du processus de fabrication associé,
- Le produit et l'estimation des coûts des processus de production alternatifs.

4.3 Entité de fabrication et estimation des coûts du processus de fabrication associé

Traditionnellement, une première estimation grossière des coûts est effectuée en phase de conception détaillée, suivie par une estimation détaillée après l'élaboration de la gamme (figure 69). L'insuffisance d'informations sur le processus de fabrication confère à la première un aspect purement indicatif, avec toutes les incertitudes que cela comporte. De plus, la lourdeur d'une élaboration complète d'une gamme de fabrication du produit dissocie nettement les deux phases. Cette séparation embrouille les liens de causalité existants entre les décisions prises au niveau de la conception et les coûts de production engendrés et, de plus, elle complique les modifications de conception éventuelles visant à réduire les coûts.

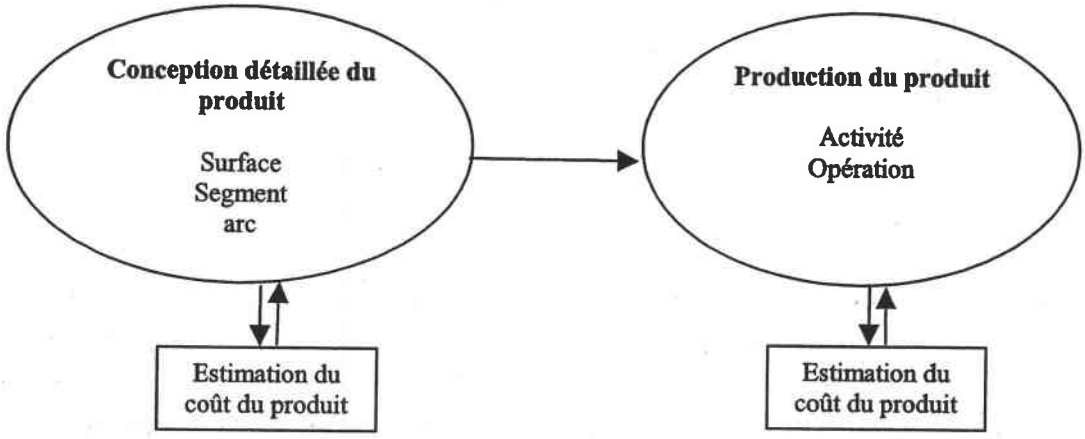


Figure 69. Estimation en deux temps du coût d'un produit

Nous pensons que l'établissement d'un système intégré d'estimation des coûts, permettant à chaque intervenant de l'élaboration du produit d'évaluer économiquement ses choix, passe fondamentalement par l'estimation du coût *des entités de fabrication* comme l'illustre la figure 70.

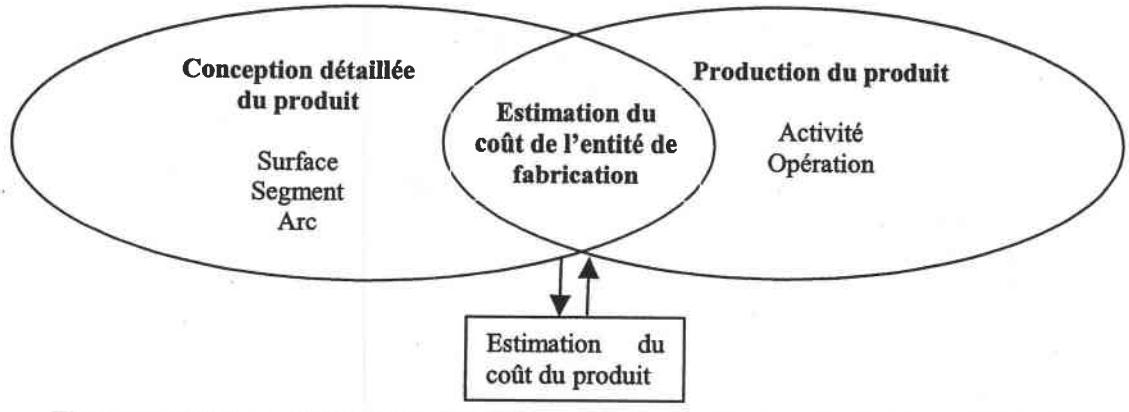


Figure 70. L'estimation des coûts des entités : un vecteur d'intégration Etudes – Méthodes

Wierda [1991] avance deux arguments justifiant l'estimation du coût des entités ou « Features » en phase de conception :

1. A une estimation de coût global ou élémentaire correspond habituellement une fonction de coût applicable à des objets similaires. Les données existantes au niveau de chaque classe d'objets forment les variables de ces fonctions. Les entités forment un niveau d'objet intéressant car le même type d'entité apparaît dans plusieurs pièces ou produits. Par conséquent, une information de coût basique, préparée au niveau de chaque classe d'entités, peut être réutilisée relativement souvent. Pour les mêmes raisons, il y aura un lot de données de référence disponibles sur les entités produites dans le passé. Cela est un avantage pour la formulation et la précision des fonctions coût.
2. Le concepteur voudrait également connaître pourquoi le coût d'un produit est assez élevé et comment il peut le réduire. Autrement dit, il voudrait repérer les relations entre les coûts et les aspects de conception qu'il pourrait maîtriser directement. Une solution potentielle est d'essayer de spécifier des coûts par entité. Dans des circonstances idéales, cela mènera à une situation où le coût d'un produit est la somme des coûts individuels de chaque entité.

La recherche autour de ce thème a été défendue dans deux articles de Wierda [1990,1991] intitulés respectivement *« Design-oriented cost information : the need and the possibilities »* et *« Linking design, process planning and cost information by Feature based modeling »*.

Les avancées réalisées dans l'informatisation et l'automatisation de la conception (CAO 3D) et de la génération de la gamme (CAPP), les efforts d'intégration de ces deux phases d'élaboration du produit autour de la notion de *feature* et l'émergence de l'ingénierie simultanée ont fortement contribué à l'application de l'approche d'estimation de coût intitulée depuis « *Feature-Based Costing* » [Feng *et al.*, 1996] [Zhang *et al.*, 1996].

Dans leur article intitulé *« Developping an integrated framework for feature based early manufacturing cost estimation »*, Ou-Yang et Lin [1997] proposent un cadre intégré d'estimation des coûts composé de trois modules : un système CAO, un module de référence et un module d'analyse. Le système CAO fournit des modèles de produit à base d'entités, le module de référence contient des processus d'usinage prédéfinis en entités ainsi que les données de coûts associées. Le modèle d'analyse calcule alors l'estimation des coûts en se basant sur les données recherchées dans les deux modules précédents, un sous-module de reconnaissance d'entités est également employé. Pour estimer les coûts, le module d'analyse est composé de trois fonctions. Une première fonction vérifie la fabricabilité de chaque entité en confrontant la résolution d'usinage des machines employées en opérations de finition avec les tolérances de l'entité. La deuxième fonction estime le temps de fabrication nécessaire à chaque entité ; ce calcul est basé sur le volume de matière à enlever de chaque surface spécifiée de l'entité. Enfin, les temps de fabrication et le taux horaire des machines correspondantes étant connus, le système détermine les coûts. Ce cadre, employé en phase de conception détaillée, fournit l'estimation du coût d'usinage de chaque entité et du produit.

Les travaux de recherche actuels [Leibl *et al.*, 1999] [Chen *et al.*, 2000] [Tseng & Jiang, 2000] montrent que ce domaine fournit de nouveaux outils d'aide à la décision économique en phase de conception. Cependant, certains points restent toutefois à approfondir, en particulier le développement de méthodes permettant d'inclure dans le coût affecté à chaque entité des coûts de production indirects engagés et nécessaires à sa réalisation. Cette donnée importante pour le concepteur prend tout son sens dans le contexte actuel de production où les coûts indirects présentent une part importante du coût total du produit (figure 71). Il semble que pour l'instant, seulement les coûts des opérations de fabrication sont pris en considération au niveau de l'entité, et à notre connaissance, il n'existe pas actuellement de travaux de recherche sur la prise en compte des coûts indirects.

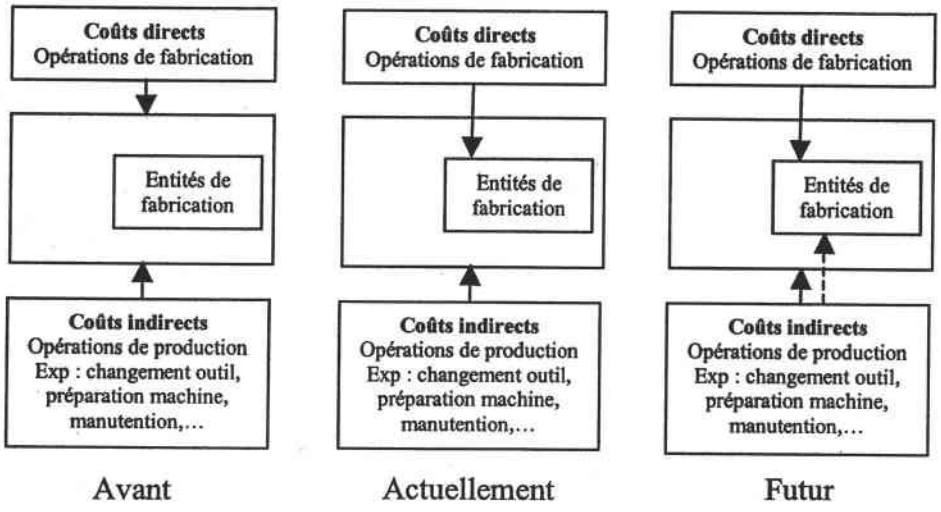


Figure 71. Elargissement des coûts affectés aux entités de fabrication

La réflexion que nous avons menée autour l'estimation de coût à base d'entités nous conduit à décomposer le coût affecté à chaque entité en deux :

- **Le coût intrinsèque** : somme des coûts directs des opérations de fabrication permettant d'obtenir la géométrie désirée et de garantir la qualité de l'entité de fabrication. Ce coût est indépendant du processus de fabrication et non partagé avec d'autres entités.
- **Le coût extrinsèque** : somme des coûts indirects correspondants aux activités auxiliaires de production causées par l'entité de fabrication. Ce coût peut être la part associée à l'entité d'un coût partagé par d'autres ou un coût propre à l'entité.

La suite de notre exposé porte sur la modélisation retenue pour l'estimation du coût intrinsèque à chaque entité de fabrication, ainsi que sur le raisonnement et les outils nécessaires qui seront développés. Le coût extrinsèque de l'entité, ainsi que l'estimation des coûts de production alternatifs du produit feront l'objet de la section 4.4.

4.3.1 Approches d'estimation des coûts d'une entité de fabrication

Comme pour un produit, les deux principaux mécanismes de raisonnement d'un estimateur face à une entité de fabrication sont de deux types : l'un analogique (recherche d'entités similaires dont le coût est connu), l'autre analytique (décomposition de l'estimation).

- L'*approche analogique* : elle se fonde sur le principe d'analogie suivant, si on connaît le coût d'une entité, on peut l'adapter pour estimer le coût d'une entité similaire. L'estimateur économise ainsi une grande partie de l'effort d'estimation en évaluant uniquement en quoi les deux entités différent. Deux phases se succèdent : la recherche d'une référence analogue, puis l'estimation des écarts. Elle nécessite donc une méthode de mesure de similarité entre deux cas et fournit, par la suite, une réponse rapide sur le coût de chaque entité.
- L'*approche analytique* : pour chaque entité estimée, sa fabrication est décomposée en opérations pour lesquelles des estimations sont appliquées. L'estimateur dispose ainsi du coût opératoire total de l'entité et du coût précis d'un certain nombre de paramètres tels que les spécifications géométriques précises associées à l'entité. Elle nécessite donc la formalisation des connaissances d'élaboration du processus de fabrication de chaque entité et fournit, par la suite, des évaluations économiques de choix précis de conception et des arguments techniques forts pour négocier avec le client.

L'approche paramétrique sous-entend la création (ou l'existence) de formules d'estimation du coût spécifiques à l'entité. Elle ne fournit aucune information sur son processus de fabrication, elle fonctionne en boîte noire. Nous estimons que l'emploi de cette méthode au niveau de l'entité ne correspond pas à l'esprit de notre approche qui vise à établir des liens de causalité entre les choix (spécifications) de conception et les coûts de fabrication engagés.

Aux deux premiers types de raisonnement susceptibles de répondre à notre objectif, correspondent deux approches d'automatisation : l'*approche par variante* (raisonnement analogique) et l'*approche générative* (raisonnement analytique).

L'approche par variante

Le principe repose sur une codification qui sert à identifier les entités puis sur une recherche des processus de fabrication existants associés au code de l'entité. Ce type d'application est connu sous le nom de T.G.A.O. (Technologie de Groupe Assistée par Ordinateur).

Deux étapes sont nécessaires à l'utilisation de ce concept [Villeneuve, 1994]. La première, dite préparatoire, consiste à regrouper par familles les entités connues de l'entreprise et d'y associer un code morpho-dimensionnel. En analysant ensuite les processus de fabrication existants de chaque entité, on détermine celles qui peuvent être considérées comme similaires. On crée alors un processus type englobant ces processus similaires et on détermine le modèle

d'estimation des coûts correspondants. Une matrice est enfin constituée pour représenter les codes morpho-dimensionnels qui correspondent à ce processus type (figure 72).

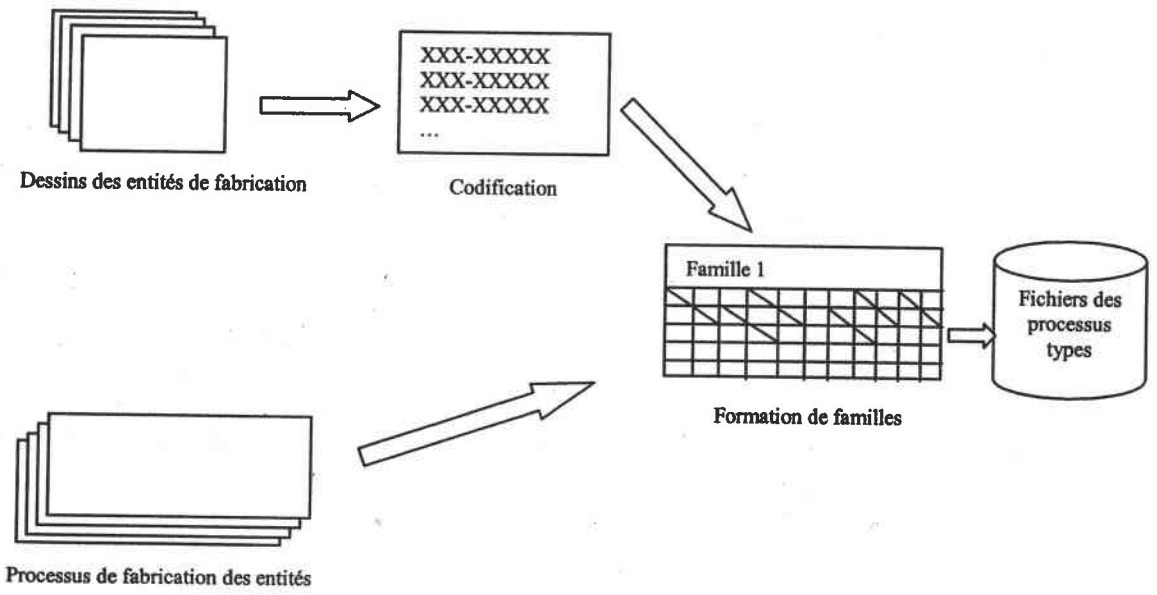


Figure 72. Etape préparatoire de la TGAO, d'après [Villeneuve, 1994]

La deuxième étape, dite étape productive, consiste, lorsqu'une nouvelle entité est à estimer, à déterminer son code. Le système informatique recherche puis édite les coûts du processus type associé à ce code. Quand un processus est trouvé, un certain degré de modification est généralement nécessaire pour pouvoir estimer l'écart avec la nouvelle entité (figure 73).

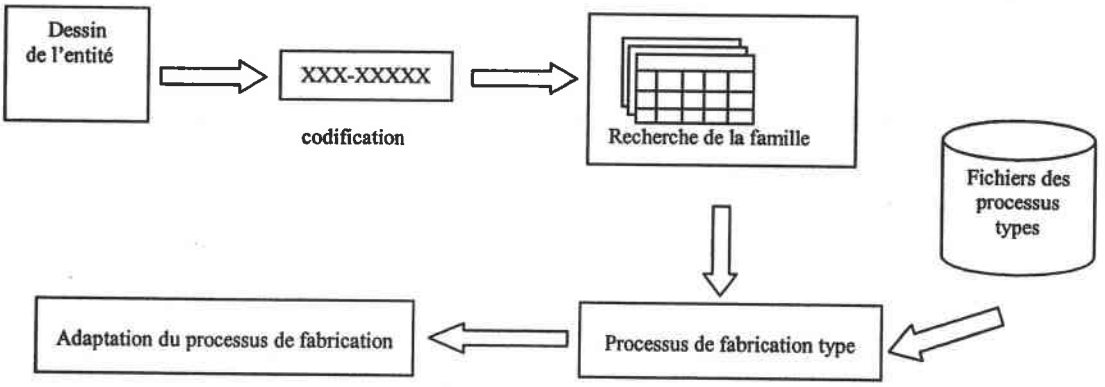


Figure 73. Etape productive de la TGAO, d'après [Villeneuve, 1994]

En conclusion, nous notons que la condition de similitude dans chaque famille, nécessaire à la réussite d'une application TGAO, est plus facile à satisfaire au niveau des entités de fabrication regroupées par type, qu'au niveau de la pièce. Dans une entreprise, le nombre d'entités maîtrisées est très souvent inférieur au nombre de produits réalisés.

L'estimation des coûts d'une entité avec cette approche analogique est plus riche en information sur la fabrication que l'approche paramétrique. Cependant, et mise à part le problème d'estimation des écarts qui reste entier, l'inconvénient majeur de cette approche, relativement à notre objectif, réside dans l'absence de relations explicites entre les coûts du processus type et les chiffres composant le code de l'entité, correspondant aux choix de conception. De ce point de vue, le code reste une boîte noire pour une analyse causale des coûts.

L'approche générative

Dans cette approche, la procédure sera réalisée par déduction. Elle consistera à intégrer les savoir-faire d'élaboration de processus de fabrication des entités et les connaissances de d'estimation des coûts. Deux démarches majeures correspondent à cette approche, une plutôt algorithmique fonctionnant par tables et arbres de décision, l'autre utilisant une technique d'IA (Intelligence Artificielle) qui est le système expert.

Les systèmes algorithmiques

Les systèmes algorithmiques nécessitent une formalisation détaillée des connaissances afin de pouvoir les transcrire sous forme d'algorithmes.

Ces systèmes sont souvent spécialisés dans un domaine de fabrication (fraisage, tournage, etc.) et s'appuient sur des bases de données de coupe, d'outils, de porte-outils et des caractéristiques de machines-outils très documentées. Ils procèdent généralement par étapes successives en fixant des choix à chaque étape. Les possibilités d'intervention de l'opérateur sont faibles car la remise en cause d'une décision peut déstabiliser l'ensemble du système [Villeneuve, 1994].

Des langages du type FORTRAN sont bien adaptés pour l'implantation des arbres de décision et des langages spécifiques sur une base FORTRAN ou COBOL ont été développés pour une représentation et une interprétation plus aisée des tables de décision.

Chep et Anselmetti présentent une structure par centres de décision pour représenter la connaissance au sein du logiciel LURPA-TOUR [Chep, 1992]. Ce système, basé sur une démarche algorithmique performante et orienté gamme de tournage, a été aussi employé pour la génération automatique du coût de l'entité et du devis pour l'usinage sur MOCN [Anselmetti, 1995].

En fait, le véritable problème des systèmes algorithmiques n'est pas dans l'implantation de la connaissance sous une forme ou une autre mais bien dans l'expression de cette connaissance, peu formalisée ou souvent contradictoire, d'une entreprise à une autre. L'adaptabilité et la dynamique de tels systèmes est faible ce qui constitue un handicap non négligeable pour leur

application dans les entreprises. Le développement croissant de systèmes basés sur une logique IA est un espoir important de résolution de ce problème.

Les Systèmes Experts (IA)

Les premières théories de l'intelligence artificielle ont vu le jour dans les années 1940, en même temps que sont apparus les premiers ordinateurs programmables. L'expression « intelligence artificielle » ne fut cependant introduite qu'en 1956 au premier congrès portant sur cette question. Les chercheurs en intelligence artificielle ont d'abord été préoccupés par les opérations de raisonnement (décennies 1950 et 1960), pour ensuite, à partir des années 1970, mettre l'accent sur la représentation et l'utilisation des connaissances dans les processus de prise de décision (construction de systèmes experts).

Un système expert simule l'intelligence humaine dans un champ particulier de connaissance ou relativement à une problématique bien déterminée. Evolutif, il évite d'avoir à écrire de nouveaux programmes pour réinjecter de l'information : grâce à son module d'acquisition, on peut incorporer une donnée nouvelle en cours d'utilisation.

Un système expert a trois composantes essentielles (figure 74) : 1) une *base de faits*, formée des énoncés relatifs aux faits de tous ordres constitutifs du domaine ; 2) une *base de règles* de décision, consignant les méthodes, procédures et schémas de raisonnement utilisés dans le domaine et 3) un *moteur d'inférence*, programme informatique générique qui permet d'appliquer les règles de décision à la base de connaissances.

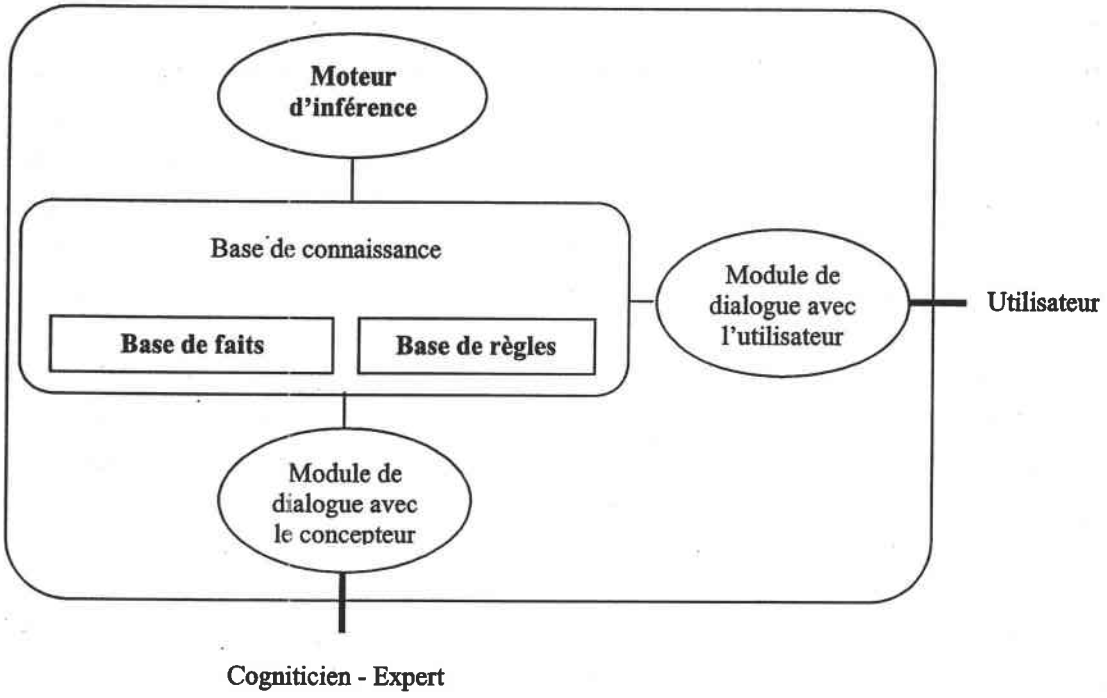


Figure 74. Principe général d'un Système Expert

La base de faits est la mémoire de travail du système expert. Elle est variable au cours de l'exécution et vidée lorsque l'exécution se termine. Au début de la session, elle contient ce que l'on sait du cas examiné avant toute intervention du moteur d'inférence. Elle est ensuite complétée par les faits déduits par le moteur ou demandés à l'utilisateur en cours d'inférence.

Les faits peuvent prendre des formes plus ou moins complexes. Nous n'envisagerons que des faits élémentaires dont les valeurs possibles sont :

- *booléennes* : vrai, faux
- *symboliques* : c'est-à-dire appartenant à un domaine fini de symboles
- *réelles* : pour représenter les faits continus.

Un système expert qui n'utilise que des faits booléens est dit d'*ordre 0*. Un système expert qui utilise des faits symboliques ou réels, sans utiliser de variables, est d'*ordre 0+*. Un système utilisant toute la puissance de la logique du premier ordre est d'*ordre 1*.

La base de règles peut se présenter sous deux formes classiques, une forme dite par règles de production et une forme dite par frames :

- Une *règle de production* se présente sous la forme ***Si*** <prémisses> ***Alors*** <conclusion>. Si les prémisses sont tous vérifiés (et logiques), la conclusion est déclenchée. Exemple, ***Si*** l'entité (*X*) est une face de qualité < 7 ou de Ra < 0.8 ***Alors*** deux opérations types sont nécessaires, l'opération ébauche coûtera *C1* sur le centre d'usinage, *C2* sur le tour ou *C3* sur la fraiseuse et la finition coûtera *C4* sur la rectifieuse plane.
- Les systèmes basés sur des *frames* représentent la connaissance sous forme de structures comportant un certain nombre d'attributs qui permettent d'associer, par exemple, un procédé à une entité avec un certain nombre de restrictions. Le problème de ce type de représentation est que, tant qu'il est utilisé pour représenter les capacités technologiques d'un procédé, il convient bien. Par contre, quand les relations géométriques entre les entités de la pièce sont considérées, ce qui est le cas de notre développement, il est difficile de les prendre en compte de cette façon.

Le moteur d'inférence est un mécanisme qui permet de déduire des faits nouveaux à partir des faits initiaux de la base de connaissances du système. On distingue essentiellement trois modes principaux de fonctionnement des moteurs d'inférences :

- *le chaînage avant* dans lequel les règles sont appliquées à des faits pour établir d'autres faits,
- *le chaînage arrière* qui part du but à atteindre et tente d'établir des faits qui rendent le but vrai,

- *le chaînage mixte* combine, comme son nom l'indique, les algorithmes de chaînage avant et de chaînage arrière.

Le langage principalement utilisé pour écrire des systèmes experts est un langage déclaratif tel que LISP et ses dialectes (CommonLISP, AllegroLISP, etc.) ou PROLOG (PROgrammation LOGique).

On remarquera que les moteurs d'inférence sont indépendant de tout domaine d'application. La séparation entre connaissance et raisonnement est essentielle dans les systèmes experts. Cette caractéristique considérable a permis l'application de cette technique informatique à des domaines très divers tels que : mathématiques, chimie, géologie, médecine, mais aussi banque et assurance.

Les systèmes experts avec leurs caractéristiques de capitalisation des connaissances et de modélisation des raisonnements se prêtent bien à une approche analytique d'estimation des coûts d'une entité de fabrication. Une analyse de la consommation des ressources matérielles et humaines dans le système de fabrication permet d'associer à chaque opération type une fonction coût, puis de capitaliser par la suite la connaissance d'estimation de coûts. Un recueil d'expertise relative à la fabrication des entités types permet d'associer à chacune un ensemble de processus de fabrication et de modéliser le raisonnement correspondant. La transcription dans le modèle du système expert du traitement élémentaire du raisonnement de l'estimateur permettra de générer automatiquement le coût de chaque opération nécessaire à la réalisation de l'entité et le coût de son processus de fabrication. La génération des coûts prendra en compte les données intrinsèques (dimension, qualité...) de l'entité de fabrication.

A ce propos, les avancées réalisées dans la génération automatique de gamme d'usinage nous ont été utiles pour modéliser ce type d'automatisation du raisonnement analytique d'estimation des coûts. Sans chercher à être exhaustif sur ce thème, citons quelques références de base, que ce soit des ouvrages [Chang, 1990] [Gama, 1990], ou des articles proposant un état de l'art [Alting et Zhang, 1998] [Kiritsis, 1993] [Eversheim et Schneewind, 1993] [Villeneuve, 1994]. Ces travaux de recherche s'étendent à tous les aspects de la gamme (détermination des surfaces d'appui et des bridages, détermination de la cotation de fabrication, détermination des conditions de coupe, génération des feuilles de gamme et des programmes CN...). Nous précisons seulement les notions retenues.

Le groupe de travail GAMA [Gama, 1990], promoteur de la gamme automatique en France, a défini un vocabulaire commun relatif au problème d'usinage. Nous rappelons dans la figure 75 la définition de l'entité d'usinage et les notions associées (opération, séquence, processus).

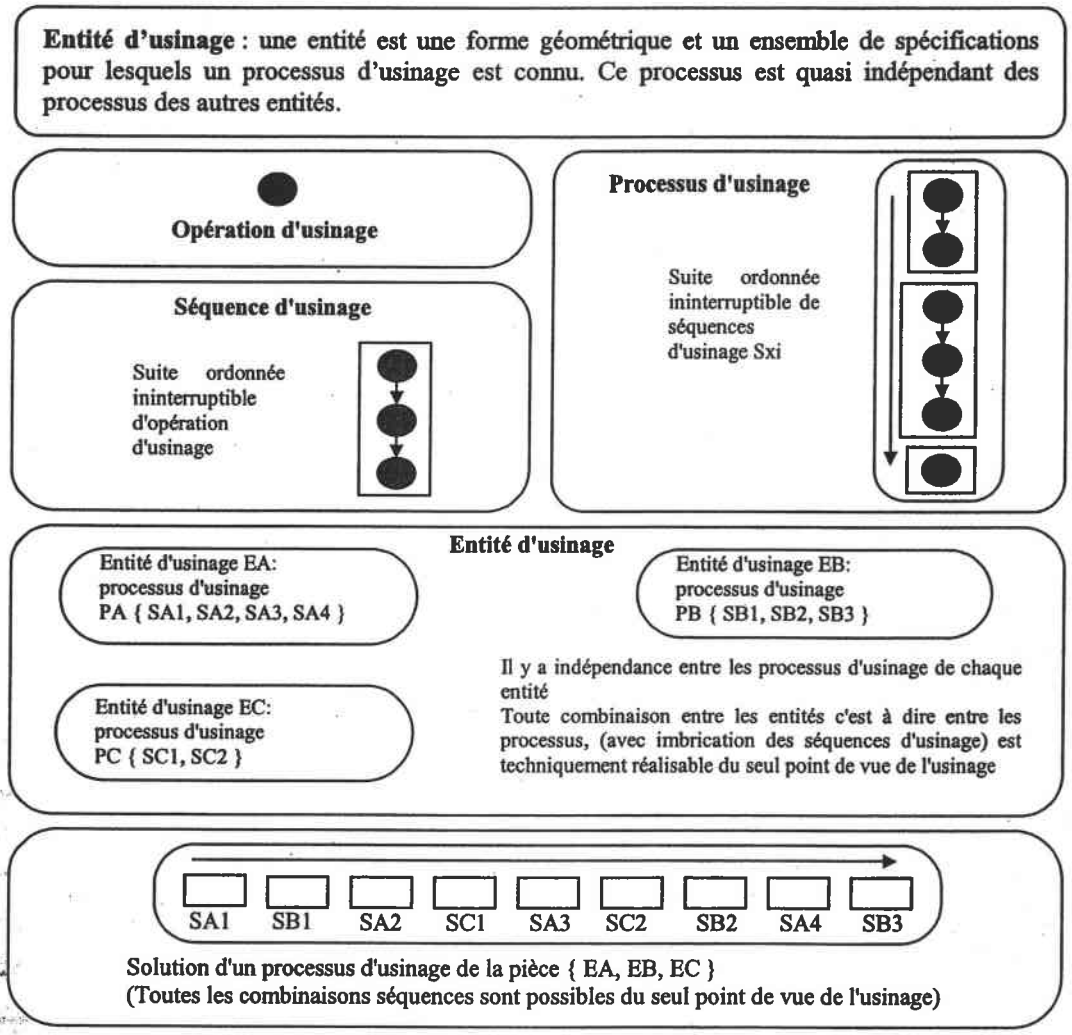


Figure 75. Rappel des notions de base relatives à l'entité d'usinage

Nous considérons que notre approche d'estimation des coûts peut supporter, en plus de l'usinage, d'autres types de fabrication (formage, emboutissage...) du moment que le produit peut être décomposé en entités géométriques pour lesquelles des processus de fabrication (ensembles d'opérations nécessaires à sa réalisation) sont associables. Cela nous a conduit à retenir le terme « entité de fabrication ».

Selon la définition du groupe GAMA, les processus d'usinage d'une entité sont quasi indépendants des processus des autres entités. Cela veut dire que la génération de ces processus peut précéder l'élaboration de la gamme. Cette caractéristique est très importante pour une démarche d'estimation des coûts car elle ouvre la voie à la prise en compte des coûts dès la phase de conception et offre une information rapide au Devis. L'idée est donc de faire partager cette information par les fonctions Conception et Devis (figure 76).

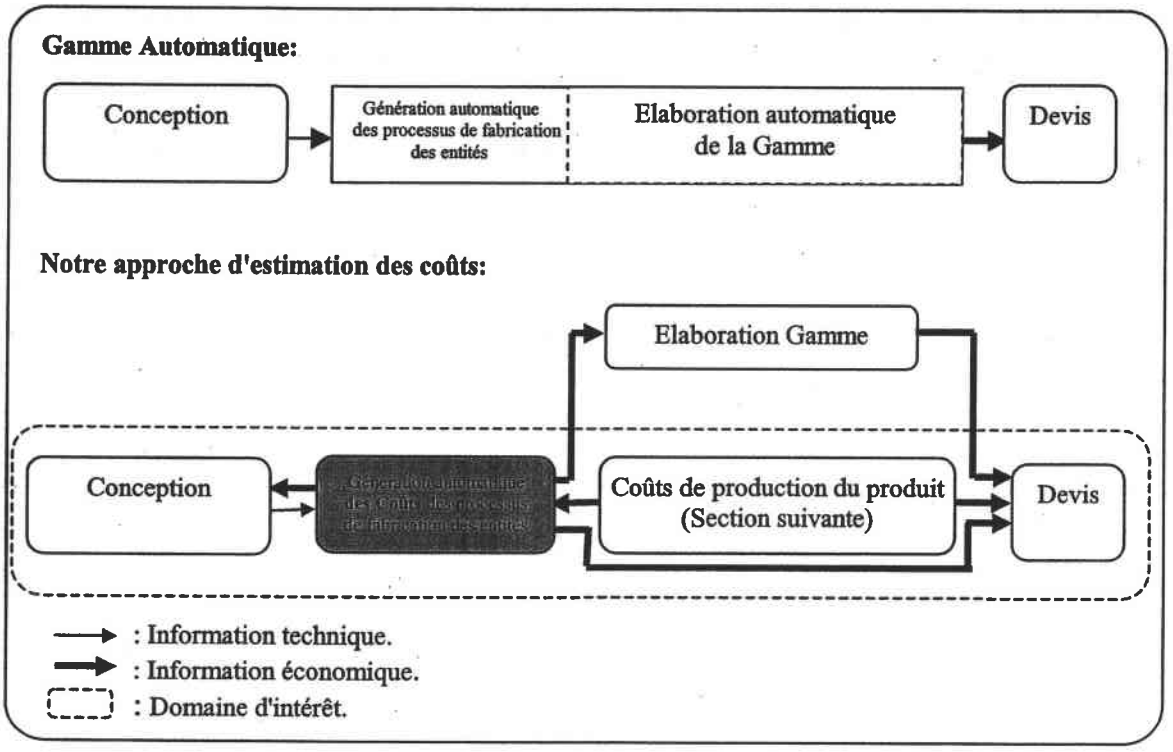


Figure 76. Une mise en parallèle avec la fonction élaboration de gamme

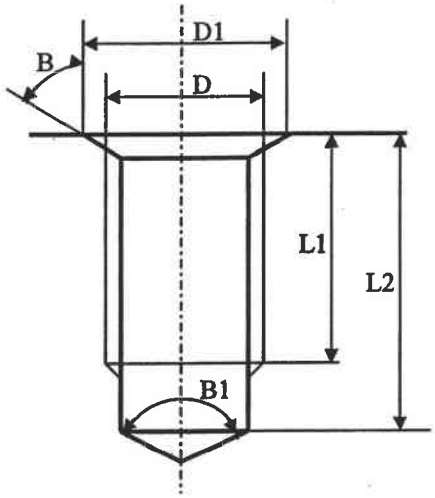
Nous nous sommes donc orientés vers l'automatisation de l'approche analytique d'estimation des coûts d'une entité de fabrication en faisant appel aux principes du système expert. Notre intérêt pour cette technique est motivé aussi par la vulgarisation des outils de développement, appelés générateurs de systèmes experts, qui proposent un environnement très performant et des outils d'inférence évolués (KEE, SMECI, CAD-X1, CostAdvantage, etc.) permettant aux entreprises et aux chercheurs de développer leurs applications en se préoccupant essentiellement de la représentation de la connaissance sans avoir à effectuer les développements informatiques formels.

4.3.2 Construction du raisonnement d'estimation des coûts d'une entité de fabrication

Pour une entité de fabrication donnée, l'estimateur, dans le cas de l'élaboration manuelle d'évaluation des coûts, associe, en tenant compte de la qualité à respecter, une ou plusieurs opérations regroupées sous le terme processus de fabrication et estime les ressources consommées au niveau de chaque opération.

A chaque type d'entité de fabrication, il lui correspond un ensemble $\mathcal{T}$ d'opérations *potentiellement* nécessaires à sa réalisation. $\mathcal{T}$ correspond à l'ensemble des opérations pouvant être envisagées pour les instances les plus variées de chaque entité de fabrication. Des critères essentiellement d'ordre technologique (la qualité à obtenir) conditionnent les décisions permettant de lui associer le processus de fabrication *effectif*, formant ainsi le sous-ensemble t

d'opérations, avec $t \in \mathcal{T}$. Ainsi, il est possible d'associer aux entités identifiées sur une pièce, un catalogue de processus de fabrication. Le choix de tel ou tel processus effectif est fonction de l'ensemble des paramètres caractérisant l'entité de fabrication (figure 77, exemple du Trou Taraudé borgne) et le coût de chaque opération est fonction du volume à enlever et de la machine employée.



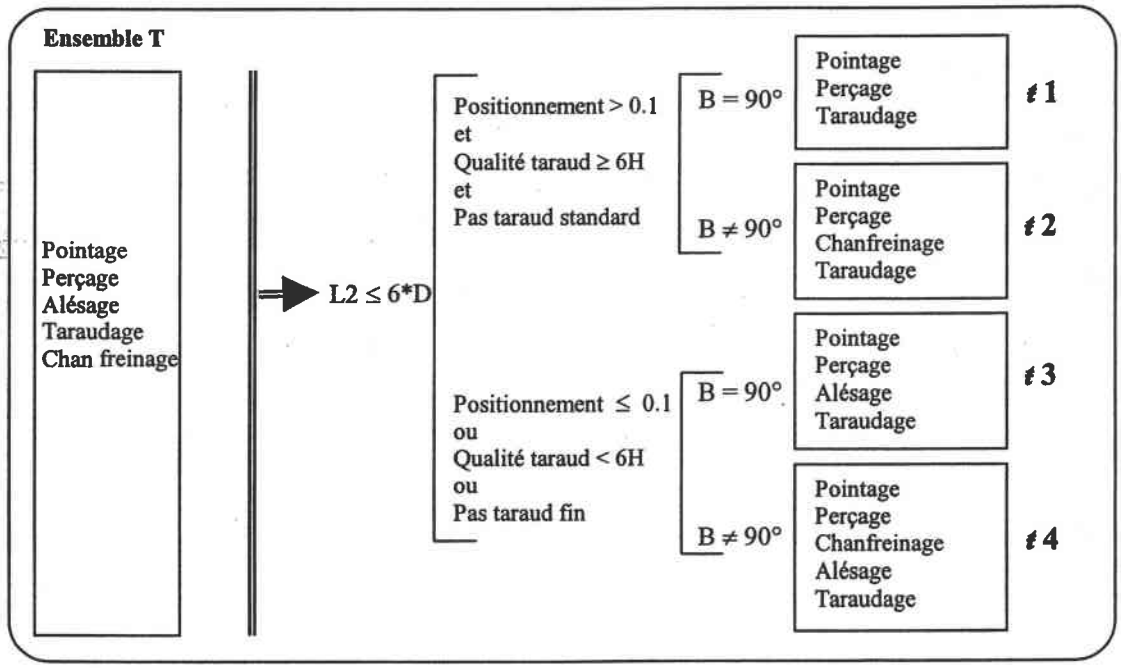


Figure 77. Extrait de l'expertise liée au Trou Taraudé borgne

Des règles de type « Si – Alors » ont été donc employées pour formaliser le problème. Les mécanismes d'analyse et *d'expertise liés à la fabrication de chaque entité* ont été transcrits sous forme de règles. Chaque opération type présente dans le processus *encapsule l'expertise d'estimation de coût associé*. La mise en œuvre de ces principes permet, au travers d'un système un expert, de générer pour une entité de fabrication définie dans le Modèle Produit, les coûts estimés du processus de sa fabrication.

Structuration de l'expertise de fabrication

Dans notre cas, les entités de fabrication s'appuient sur une représentation objet au niveau du de l'outil CostAdvantage. Rappelons que les classes d'objets sont appelées *contextes* dans CostAdvantage. Pour chaque contexte d'entité de fabrication, l'équivalent d'une classe d'objet, nous avons constitué une base de connaissances permettant de générer automatiquement les coûts du processus de fabrication de chaque instance associée. La génération des coûts prend en compte les données intrinsèques de l'entité de fabrication.

Les règles relatives à l'expertise de fabrication de chaque entité sont regroupées sous la rubrique règles, présente dans la fenêtre associée au *contexte* de l'entité de fabrication.

Les deux composants essentiels d'une règle sont ses prémisses et ses conclusions. Les prémisses servent à reconnaître ou à identifier l'état de l'entité de fabrication. On utilise les conclusions pour générer les opérations nécessaires à sa réalisation, formant le processus de fabrication correspondant.

Le principe des règles est le suivant :

- une première partie filtre les variables (partie déclaration), ainsi que leurs propriétés (partie des prémisses constituée d'un ensemble de prédicats) ; lors d'une tentative d'application d'une règle, les deux opérations suivantes sont réalisées :
    1. les variables sont instanciées ;
    2. les variables sont filtrées au moyen des prémisses.

  A titre d'exemple, soit la règle suivante (en langage fabricant) :
  « Pour une entité de fabrication trou taraudé dont la qualité est supérieure ou égale à 6 avec un pas de taraud standard et angle de chanfrein β égale à 90^0 Alors… ».
  Cette règle pourrait s'écrire en CostAdvantage de la manière suivante :
  Une partie déclaration permettant d'identifier la variable et d'une façon plus générale de filtrer les objets à partir de leurs contextes :

  Soit *T* l'entité de fabrication *Trou-taraudé,* une partie prémisse permettant de filtrer les propriétés retenues grâce à des prédicats :
  Si Qualité-Taraud ≥ 6 et
  Pas-Taraud = Standard et
  $\beta = 90^0$

  Lors de l'examen éventuel de cette règle, si le produit contient deux entités de fabrication trou taraudé dont leur qualité taraud est respectivement ≥ 6 et <6, la conclusion de la règle ne s'appliquera qu'à la première entité.

- une deuxième partie de la règle constituée de conclusions est exécutée lorsque toutes les variables sont instanciées et les prémisses vérifiés.

  Reprenons la suite de la règle ci-dessus en langage fabricant :

  « ...Alors il faut commencer par un pointage, suivi d'un perçage et terminer par un taraudage, ces trois opérations sont suffisantes pour réaliser cette entité »

  Cette règle pourrait s'écrire en CostAdvantage de la manière suivante :

  Alors Créer l'objet opération pointage et
  Créer l'objet opération perçage et
  Créer l'objet opération taraudage

Lors de l'examen de cette règle, la *caractéristique* coût associée à chacune de ces trois opérations sera calculée automatiquement sur la base des données dimensionnelles de l'entité de fabrication et de la machine par défaut de l'opération, ainsi qu'une simulation du coût sur l'ensemble des machines capables associées à l'opération.

Ainsi, lorsque le système cherche à déterminer le processus de fabrication d'une entité spécifiée, il considère la base de règles associée. Chaque règle présente dans cette base correspond à un processus *t* (sous-ensemble d'opérations). Le moteur cherche alors à appliquer successivement chacune des règles. Celle qui vérifie le prémisse sera appliquée.

Capitalisation de l'expertise d'estimation des coûts

L'association à chaque opération type de l'ensemble des machines capables d'assurer sa réalisation et l'analyse des ressources au niveau de chaque couple Opération/Machine définissent l'Entité Coût élémentaire correspondante (figure 78).

En usinage, la méthode adoptée nous amène à définir pour chaque opération type un couple Outil/Matière donnant le débit d'enlèvement matière :

Pour les opérations d'ébauche
Coût = Vol / Débit * Taux d'imputation
Débit = cm^3 / mn
Vol = Volume de matière enlevée cm^3

Pour les opérations de finition
Coût = Surf / Débit * Taux d'imputation
Débit = cm^2 / mn
Surf = Surface produite cm^2

L'encapsulation de ces données au niveau des Entités Coût élémentaires « opérations types » permet d'exprimer l'inducteur en données de conception : le volume à enlever. Cette valeur est calculée automatiquement à partir des champs de dimension associés à l'entité de fabrication.

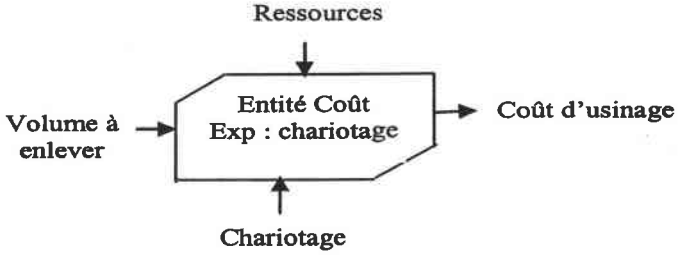


Figure 78. Entité Coût « Opération d'usinage »

Pour une opération d'usinage type exécutée sur la machine *M'* et consommant les ressources *Ri* avec *TI* le taux d'imputation de la ressource *i*, le Coût d'usinage est la somme de :

- Coût Main d'œuvre = **(Volume à enlever)** . (1/débit d'usinage) . (€/h)
  = Vol à enlever . α1 . TI1

- Coût lubrifiant = **(Volume à enlever)** . (Litre / Cm^3) . (€/Litre)
  = Vol à enlever . α2 . TI2

-Coût amortissement M' = **(Volume à enlever)** . (1/débit d'usinage) . (€/h)
  = Vol à enlever . α3 . TI3

-Coût usure outil = **(Volume à enlever)** . (Cm^3(outil) / Cm^3(pièce) . (€/Cm^3)
  = Vol à enlever . α4 . TI4

$$\textit{Coût opération usinage type (i)} = \sum_{k \in Ri} C_k^r (y_k^i (\textit{Volume à enlever}))$$

Ces Entités Coût élémentaires (opérations potentielles) formeront les sous-contextes de l'entité de fabrication correspondante (figure 79).

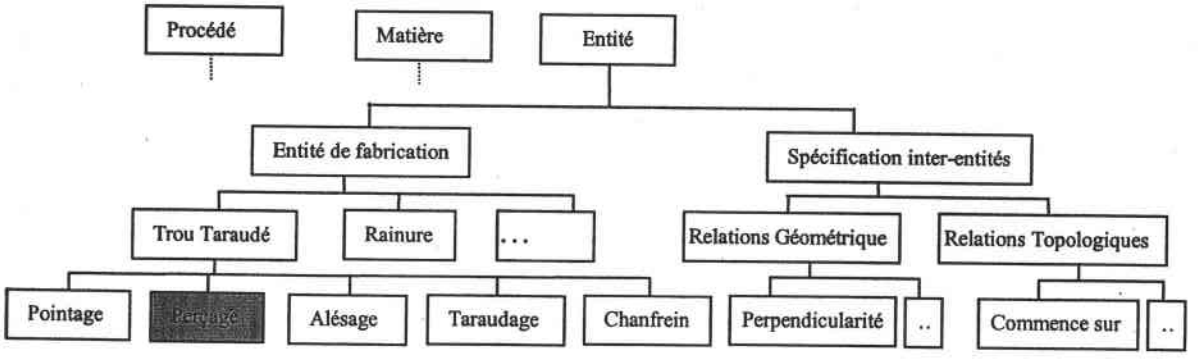


Figure 79. Les sous contextes opérations de fabrication

Nous rappelons que les *caractéristiques* (champs) d'un *contexte* opération sont de deux types :

- Une caractéristique statique : l'ensemble des machines capables,
- Une caractéristique fonctionnelle : la formule d'estimation du coût de l'opération.

La somme des coûts des opérations types ainsi définie correspond au coût intrinsèque de l'entité de fabrication. C'est son Entité Coût mère.

4.3.3 Conclusion

L'établissement d'un système intégré d'estimation des coûts, permettant à chaque intervenant dans l'élaboration du produit d'évaluer économiquement ses choix, passe par l'estimation de coûts *des entités de fabrication.* L'attention croissante portée à ce point de vue dans la communauté scientifique a été soulignée et les travaux de recherche actuels montrent que ce domaine est considéré comme un nouveau vecteur d'intégration. Cette section a porté particulièrement sur l'estimation du coût intrinsèque d'une entité de fabrication. Nous avons présenté les deux approches essentielles d'estimation appropriées de coûts : analogique et analytique, ainsi que la technique d'automatisation convenable à chaque raisonnement : Technologie de Groupe Assistée par Ordinateur et Systèmes Experts. Les relations causales entre les spécifications de l'entité de fabrication et les coûts engendrés sont nécessaires à une analyse économique en phases de conception et fabrication. Ce critère de choix nous a conduit à retenir l'approche d'estimation analytique, ainsi le coût de chaque opération type de fabrication est évalué. Pour cela, nous appliquons le concept d'Entité Coût, chaque opération type n'est qu'une Entité Coût élémentaire, et la somme de ces dernières correspond au coût du processus de fabrication nécessaire à la réalisation de l'entité de fabrication, c'est son coût intrinsèque.

Le coût intrinsèque d'une entité de fabrication, ou d'un produit composé de plusieurs entités, représente le coût strictement direct de la production. Cette donnée importante reste cependant insuffisante pour une démarche d'estimation, d'analyse et de réduction de coûts.

En effet, les coûts indirects matérialisés par les activités de soutien et d'assistance, présentent une part importante du coût total du produit et ils doivent, par conséquent, être pris en considération au même titre que les coûts directs.

L'objectif de la section suivante est de prendre en compte dans l'estimation des coûts de produit une part importante des coûts indirects : ceux présents dans son processus de production et d'autres relatifs à des Entités Coûts de soutien au processus.

4.4 Produit et estimation des coûts des processus de production alternatifs

Si les méthodes industrielles actuelles sont principalement destinées à la mise en œuvre des concepts du juste à temps, à la gestion de la complexité née de l'augmentation de la variété des produits, à l'amélioration de la qualité (Poka-Yoké, SMED, Topo-maintenance, Kanban etc.) et ont pour effet une augmentation de la productivité des entreprises qui les mettent en œuvre, elles impliquent également une croissance d'activités de support. Cela s'est traduit par une modification considérable résumée comme suit :

> *La part des opérations de fabrication directement estimables a tendance à diminuer de manière importante au profit d'activités de support (qualité, manutention, maintenance par exemple), que les entreprises n'ont pas fréquemment la possibilité de suivre avec autant de précision que les opérations de fabrication* [Kieffer *et al.*, 1994].

Ce changement majeur dans les systèmes de production a déstabilisé les méthodes traditionnelles d'estimation des coûts. Celles ci évaluent le coût de production d'un produit sur la base de la main d'œuvre et de matières premières (c'est à dire les coûts directs). Les coûts indirects, liés aux activités en amont, en aval et de support à la production, ne sont ensuite ré-imputés à chaque produit qu'en fonction de clés de répartition très peu pertinentes, telles que les heures de main d'œuvre nécessaires à sa fabrication.

Dans le contexte actuel des systèmes de production, le coût indirect d'un produit n'est plus systématiquement corrélé à son volume (quantité) mais aussi aux activités nécessaires. En effet, les petites séries peuvent en nécessiter relativement plus (changements d'outils et réglages de machines, coûts d'ingénierie, ordres de commande, ordres de réception, ordres d'emballage...). La proportionnalité entre les coûts directs et les coûts indirects d'un produit n'est plus une règle. La croissance des activités indirectes en production et en dehors ne laisse plus les entreprises indifférentes, devant l'imprécision autrefois tolérée, de l'estimation des coûts indirects.

Les critiques des méthodes traditionnelles ont débouché sur des propositions en faveur des méthodes alternatives évoquées précédemment (ABC, Unité de Valeur Ajoutée UVA,...) et qui présentent des progrès vers l'exactitude en estimation des coûts.

Des recherches scientifiques sont menées sur la méthode UVA [Kieffer *et al.*, 1994] [Levant & De la Villarmois, 2000], ainsi que des mises en œuvre en entreprise [Fievez et Chabanas, 1999]. Les applications industrielles croissantes de la méthode ABC, plus répandue, semblent répondre au besoin des entreprises de recueillir et d'analyser les informations qui reflètent les processus plutôt que la hiérarchie [Gronnier et Hédin, 1999]. Les travaux de recherche autour de cette méthode sont nombreux [Bhimani et Pigott, 1992] [Lebas, 1991] [Noreen, 1991] et suscitent une large réflexion sur la mise à niveau de la comptabilité analytique, source d'imprécision et de coagulation des méthodes classiques d'estimation des coûts.

Le suivi des activités indirectes, rendu possible par l'application de ces nouvelles méthodes, nous mène à la notion de causalité des coûts. Nous faisons la distinction entre deux types :

- Le premier relatif à la variété des produits réalisés par l'entreprise. Pouvoir affecter à chaque produit ses propres coûts indirects est considéré comme une avancée dans l'établissement des liens de causalité entre un coût enregistré au niveau d'une activité

(ou un groupement) et un produit particulier. L'inducteur matérialise ce lien. Nous pensons que ce type de lien permet essentiellement d'assurer la traçabilité des coûts.

- Le deuxième relatif aux activités nécessaires à la réalisation d'un produit. Pouvoir cerner la cause de l'existence d'une activité serait une donnée intéressante pour une démarche de réduction de coûts.

Si les méthodes alternatives, appliquées en phase de production, apportent une réponse satisfaisante au premier type de causes assurant ainsi la traçabilité des coûts, leur réponse au deuxième type reste insuffisante et surtout courte. Elles s'arrêtent sur la désignation d'un produit particulier et déplacent, par conséquent, la décision au niveau stratégique : garder ou non le produit ?. Il est important de savoir, en amont, quelle(s) caractéristique(s) du produit (géométrique, dimensionnelle ou qualitative) est la cause de l'existence d'une activité ou une autre dans son processus de production.

Autrement dit, l'efficacité d'un système d'estimation des coûts dépend de deux caractéristiques :

- la méthode employée,
- et la pénétration de l'analyse causale.

Remonter l'arbre des causes de coûts conduit donc à la phase de conception. La majorité des travaux de recherche relatifs aux nouvelles méthodes d'estimation des coûts sont appliquées en phase de production. Toutefois, et dans le cadre de l'intégration des fonctions de l'entreprise, un certain nombre d'articles ont porté sur l'application de la méthode ABC en phase de conception. Si pour certains, on ne peut parler que d'estimation au plus tôt [Subbaraman *et al.*, 98] [Tseng & Jiang, 2000], pour d'autres, des liens de causalité entre des coûts de production et des choix de conception ont été réellement abordés [Leibl *et al.*, 1999].

L'automatisation du raisonnement relatif à une estimation analytique du coût intrinsèque d'une entité de fabrication a fait l'objet de la section précédente. Elle fournit l'ensemble des opérations de fabrication nécessaires à la réalisation du produit.

L'objectif de cette section est de prendre en compte dans l'estimation des coûts du produit une part importante des coûts indirects : ceux présents dans son processus de production et d'autres relatifs à des Entités Coût liées au processus. L'atteinte de cet objectif nécessite la détermination des processus de production solutions respectant un certain nombre et types de contraintes.

Des choix de conception détaillée seront transcrits en contraintes de fabrication pour établir des liens de causalité entre ces décisions et des coûts du produit. Des contraintes issues du contexte de production (disponibilité machines) ou autres reflétant les exigences économiques seront intégrées.

Le problème d'estimation des coûts des processus de production alternatifs d'un produit est modélisable en problème de satisfaction de contraintes. C'est l'objet de la section suivante.

4.4.1 L'estimation des coûts de production : un problème de satisfaction de contraintes

Poussés par des impératifs de flexibilité, de réactivité et de réduction de coûts, les systèmes manufacturiers évoluent à l'heure actuelle vers une production discontinue par lots de taille variable, où la gestion des flux de produits devient prépondérante [Deneux, 1993]. La mise en production d'un lot de produits identiques passant par différentes machines doit se faire de façon continue et fluide, en minimisant le temps de préparation des machines et le temps de déplacement d'un poste à un autre. Ces impératifs ont contribué à modifier en profondeur la perception de la production et la physionomie des ateliers modernes.

Dans ce contexte, le coût d'un processus de production d'un produit est fortement dépendant de deux facteurs :

- Les machines employées. Le coût d'une opération de fabrication est dépendant de la machine de réalisation.
- Le chemin de parcours du lot dans l'atelier. Les coûts de préparation des machines et les coûts de manutention sont tributaires de l'ordre des opérations de fabrication sur les machines alternatives. Les relations de précédence exigées entre des opérations réalisées sur des machines différentes imposent des routages pour le lot à fabriquer.

Imposer à la production une machine spécifique et/ou un routage du lot est une contrainte. Estimer le coût d'un processus de production du produit sous entend la prise en considération de ces contraintes. Les gérer au plus tôt nous conduit à remonter aux causes :

- Pour un certain nombre d'opérations, une qualité exigée sur des surfaces du produit en phase de conception impose des machines spécifiques.
- Une relation géométrique (perpendicularité, parallélisme...) spécifiée à une tolérance précise entre deux entités de fabrication exprime implicitement une précédence entre les opérations associées. De même, une relation topologique (commence sur, débouche dans...) peut exprimer, suivant la qualité des surfaces des deux entités de fabrication, une précédence entre les opérations.

Le coût d'un processus de production composé des coûts des opérations de fabrication, de préparation des machines et de manutention n'est que l'effet de décisions de conception, causes des coûts engagés (figure 80).

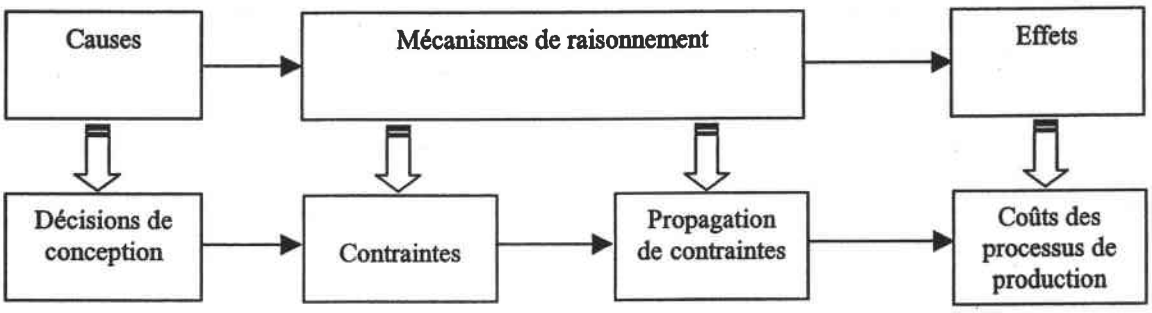


Figure 80. Démarche de l'évaluation économique des décisions de conception

Le raisonnement d'estimation des coûts de production d'un produit porte par essence sur l'évaluation de **variables inconnues**. Sa modélisation ne peut s'effectuer que selon un mécanisme causal construit sur des connaissances élémentaires représentées sous forme de **contraintes**.

La section 4.3 a porté sur la génération automatique des opérations nécessaires à la réalisation d'une entité de fabrication, chaque opération ayant été identifiée comme une Entité Coût élémentaire (EC^f). Aussi, le système expert permet d'associer au produit décomposé en entités de fabrication le coût de l'ensemble des opérations.

Aux typologies de relations géométriques et topologiques entre entités de fabrication retenues, nous associerons un ensemble de règles qui expriment des contraintes de précédence entre les opérations des entités de fabrication concernées.

Une opération de manutention est une Entité Coût (EC^m) ayant comme inducteur la distance qui sépare les deux postes. De même, la préparation d'une machine est une Entité Coût (EC^{pr}) dont l'inducteur est à déterminer avec l'opérateur machine.

Nous décrivons un processus de production d'un produit par :

- Des variables entières U_j (variant de 1 à m) correspondant au rang de chaque opération j et variables booléennes $X_{jj'}$ (0, 1) correspondantes aux précédences éventuelles entre toutes les opérations.

  U_j : m Si l'opération j générée est réalisée comme la $m^{éme}$ opération dans le processus de production du produit.

  $X_{jj'}$: 1 Si l'opération j' suit l'opération j dans le processus de production du produit. ($j \neq j'$),

  0 Sinon.

- Une variable réelle C_{PP} définie sur un domaine flou correspondant au coût d'un processus de production solution.

- Des contraintes à satisfaire du type $U_a < U_b$ (opération de fabrication *a* précède opération de fabrication *b*). Ce type de contraintes, appelées contraintes de fabrication, est déclenché par l'analyse des relations géométriques et topologiques inter-entités de fabrication, décidées en phase de conception. D'autres types de contraintes : contraintes propres au modèle, contraintes de coût et contraintes de production, seront développées dans la suite (section 4.4.3).

Estimer le coût d'un processus de production solution du produit avec un lot de taille Q consiste à trouver une valeur pour chaque variable ($X_{jj'}$, U_{jm} et C_{PP}) tout en respectant toutes les contraintes simultanément.

$$C_{PP} = \sum_{j=1}^{N} \sum_{j'=2}^{N} (EC^{pr}_{jj'} + Q \cdot EC^{f}_{j} + EC^{m}_{jj'}) \cdot X_{jj'} \qquad avec (j \neq j) et\ j \in \{1, N\}$$

Les systèmes de satisfaction de contraintes répondent à cette demande. Ils proposent la recherche de valeurs solutions par un mécanisme de recherche combinatoire. C'est une technique d'Intelligence Artificielle encore en développement. Nous détaillerons dans la section suivante (4.4.2) les caractéristiques ainsi que les atouts de tels mécanismes.

Ainsi, pour chaque processus de production solution, nous connaissons les valeurs (0 ou 1) de toutes les variables $X_{jj'}$. Ces valeurs seront employées pour établir les relations de causalité existantes avec des opérations telles que le changement d'outils sur chaque machine et des activités telles que l'élaboration de gamme ou la programmation en Commande Numérique. La fonction inducteur de chaque Entité Coût correspondante aura comme variables des $X_{jj'}$.

Le modèle permet de déterminer l'intervalle du coût de production (C_{PPmini}, C_{PPmaxi}) correspondant au produit. Pour des raisons de simplicité, nous avons omis à cette étape les indices (*i,k*) correspondants aux entités de fabrication et aux machines alternatives. Le modèle complet, développé dans la suite, permet de déduire l'estimation du coût extrinsèque de chaque entité de fabrication. Une discussion à ce propos sera présentée.

4.4.2 Les problèmes de satisfaction de contraintes

Les systèmes de satisfaction de contraintes ou CSP (*Constraint Satisfaction Problems*) conviennent à notre problématique. Nous allons détailler dans cette section les caractéristiques ainsi que les avantages de tels mécanismes.

4.4.2.1 Notion de contrainte

Lors de la description du processus de production d'un produit, nous avons présenté les variables comme pouvant disposer de plusieurs types de valeurs. Chaque type s'adapte à un mode d'expression.

La contrainte permet de relier entre elles ces variables.

> *Une contrainte est une relation entre un ensemble de variables, chacune prenant leurs valeurs dans un domaine continu ou discret. Une contrainte est donc définie par un ensemble de variables. Le prédicat d'une contrainte permet de vérifier si les valeurs prises par les variables satisfont la contrainte : si l'affectation de valeurs aux variables respecte la contrainte, alors le prédicat est vrai, sinon il est faux.*

On distingue essentiellement trois types de contraintes : les contraintes continues, les contraintes discrètes et les contraintes flexibles.

Les contraintes continues C_c permettent de lier des variables prenant des valeurs dans des domaines continus.

Les contraintes discrètes C_d assurent une relation entre des variables de domaines discrets.

Une contrainte mixte C_m assure une relation entre des variables prenant leurs valeurs dans des domaines discrets et des domaines continus.

Les contraintes particulières C_p se construisent par l'agencement des contraintes continues, discrètes et mixtes entre elles [Rellier, 1996]. Cela fournit d'autres types de contraintes résultantes (contraintes conditionnelles, contraintes par morceaux, contraintes logiques...).

Pour des besoins précis, nous utilisons les contraintes logiques. Ces contraintes sont explicitées à partir des lois classiques de l'algèbre de Boole, à savoir le « *ou exclusif* » et le « *et* ». Ainsi, une conjonction de contraintes correspond à faire agir toutes les contraintes élémentaires spécifiées : la loi utilisée est le « *et* », alors qu'une disjonction de contraintes ne permet que de faire opérer une et une seule contrainte : la loi logique utilisée est le « *ou exclusif* ».

Appelons $\hat{C}$ l'ensemble des contraintes

$$C_i \in \hat{C} \qquad i \in \{1,\ldots,n\}$$

Une conjonction de contraintes est telles que :

$$C_1 \text{ ET } C_2 \text{ ET } \ldots \text{ ET } C_i$$

Une disjonction de contraintes est telles que :

$$C_1 \text{ OU } C_2 \text{ OU } \ldots \text{ OU } C_i$$

Une extension des contraintes précédentes est *la contrainte flexible* C_f. Elle exprime des préférences entre des solutions plus ou moins acceptable [Derras, 1998]. L'association d'un

domaine flou à une variable introduit une gradualité qui affine la distinction entre les valeurs solutions complètement acceptables. Un domaine flou exprime alors une contrainte flexible. Sa construction s'effectue en donnant le degré de satisfaction que l'on associe à toutes les valeurs solutions de la variable.

Sur la figure 81, la fonction *S(D)* représente les degrés de satisfaction associés aux différentes valeurs du diamètre *D*, relativement à la contrainte « Diamètre petit ». Pour une valeur $D = 45$ mm, ce degré de satisfaction vaut 0,5.

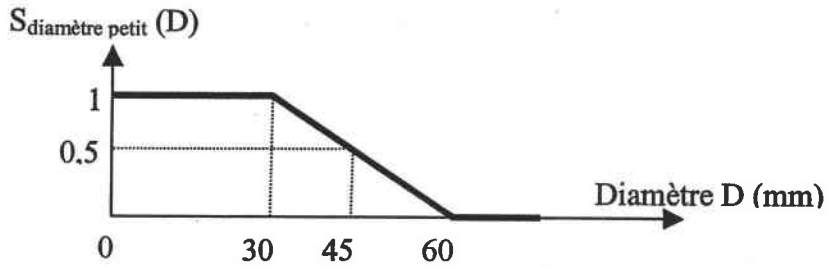


Figure 81. Exemple d'utilisation d'un sous ensemble flou [30, 60] modélisant une contrainte flexible

La modélisation par contraintes permet de considérer l'aspect granulaire du raisonnement d'estimation des coûts des processus de production d'un produit : un ensemble d'expertises élémentaires, appelées contraintes, sont reliées entre elles au travers d'un réseau. Une contrainte assure une relation entre les variables du système. L'ensemble de ces expertises impose alors des restrictions sur les valeurs admissibles de chaque variable.

De plus, le moteur d'inférence considère toutes les contraintes de manière simultanée et concourante. Par ailleurs, un tel système a la capacité d'intégrer des variables et des contraintes de nature hétérogène. Le système peut être sous-contraint, mais les solutions sont déterminées.

Nous avons donc choisi de représenter le raisonnement sous forme de contraintes. La recherche des solutions se fait autour de la satisfaction du problème ainsi rédigé.

4.4.2.2 Propriétés du CSP

Un problème de satisfaction de contraintes se catégorise par le rang du problème et le nombre de variables à évaluer.

Dans le cas d'un problème sur-contraint, la solution possible tient compte d'un compromis sur les valeurs. Si le problème est bien contraint, il n'existe qu'une seule solution unique au problème posé. Le système de contraintes se comporte alors comme une boîte noire ou une fonction mathématique. Enfin, si le problème est sous-contraint, les solutions correspondent à des combinaisons d'instanciations qui rendent toutes les contraintes vraies (figure 82).

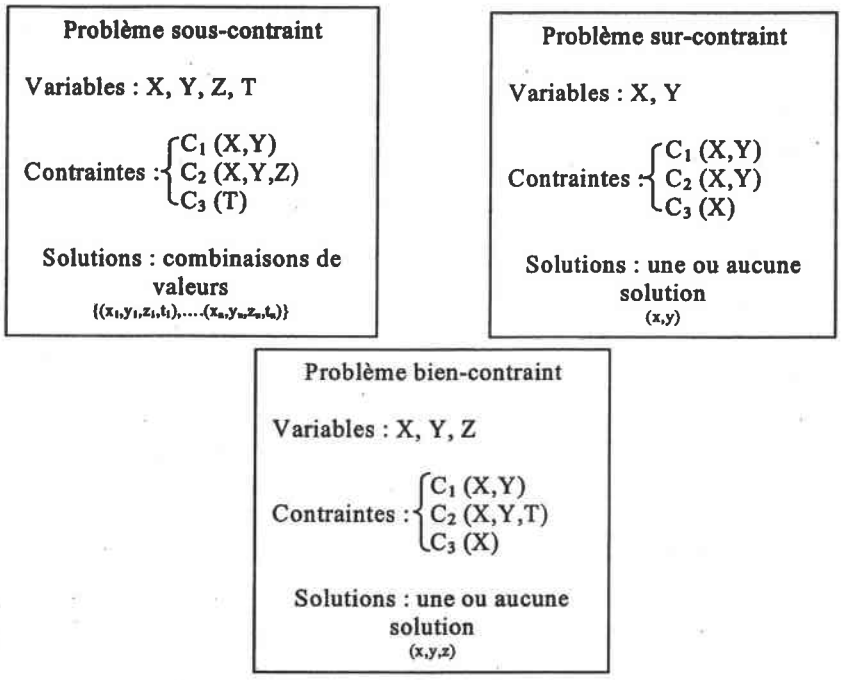


Figure 82. Nature d'un système de contraintes [Fischer 2000]

Il existe à ce jour deux types de problèmes CSP :

- Les problèmes CSP statiques pour lesquels le nombre de variables et de contraintes, ainsi que la définition des domaines de valeurs sont entièrement prédéterminés et ne varient pas durant la phase de calcul,
- Les problèmes CSP dynamiques pour lesquels des contraintes peuvent être ajoutées, enlevées ou modifiées durant le processus de calcul.

Nous n'étudions dans notre cas que des problèmes statiques.

La résolution d'un problème CSP s'articule autour de deux phases :

- La phase de filtrage (propagation de contraintes) qui consiste à réduire les domaines de valeurs aux valeurs satisfaisant toutes les contraintes,
- La phase de recherche des solutions.

La première phase consiste à trouver les valeurs éligibles et la seconde phase à déterminer les combinaisons de valeurs compatibles entre elles au regard de toutes les contraintes.

4.4.2.3 Environnements de programmation par contraintes

La modélisation de problèmes par contraintes n'est apparue que dans les années 80, bien que les recherches aient débutées dans les années 70 au sein de la communauté informaticienne. Elle s'applique à un large éventail de types de problèmes, tels que l'optimisation dans les

graphes, l'ordonnancement et le raisonnement temporel, l'analyse des circuits électriques, les problèmes de surveillance radar [Farreny et Ghallab, 1987] [Vargas, 1995].

Vu son intérêt, de nombreux travaux ont conduit à l'élaboration d'environnement de programmation par contraintes et de moteurs de résolution. On peut distinguer essentiellement trois classes de produits, avec une liste limitée d'outils correspondants :

- Les systèmes capables de traiter des domaines discrets (Oz, Gnu-Prolog, B-Prolog),
- Les systèmes exploitant les domaines continus (CIAL, Cassowary, ICE InC++),
- Les systèmes considérant à la fois les domaines discrets et continus (Ilog, Con'flex, CLP).

Nous avions besoin d'un outil capable de traiter à la fois des variables discrètes et continues et des contraintes flexibles. De plus, notre problème est fortement sous-contraint. Le champ des outils accessibles était donc restreint. Nous avons utilisé l'environnement de travail Con'flex. Cet environnement intègre des résultats classiques, publiés dans la littérature CSP depuis une dizaine d'années, et des résultats nouveaux. Il s'agit de l'extension du formalisme CSP aux problèmes dits flexibles où les contraintes sont plus ou moins satisfaites par les différentes combinaisons de valeurs des variables [Rellier, 1996]. Ce dernier point nous a permis de poser le problème en terme d'optimisation.

4.4.2.4 Résolution d'un problème CSP

Résoudre un CSP consiste à trouver un ensemble de valeurs à toutes les variables de manière à ce que toutes les contraintes soient simultanément respectées. C'est un problème NP-complet[10] que l'on traite généralement avec une procédure de parcours exhaustive de l'arbre de recherche. C'est pourquoi il est important de réduire au maximum la taille de l'espace de recherche, donc la taille des domaines de valeurs.

Un système est *consistant* si un groupe de variables (consistance locale) ou toutes les variables du problème (consistance globale) disposent de valeurs respectant toutes les contraintes.

Déterminer des solutions à un problème CSP consiste à établir la consistance globale du problème. Par contre, réduire la taille des domaines de chaque variable s'attache à des problèmes de consistance locale. Les problèmes de satisfaction de contraintes correspondent à des problèmes à très forte combinatoire. Le rôle de la phase de filtrage est de limiter cette combinatoire. Pour cela, il utilise des techniques forçant la consistance locale du système.

---

[10] Un problème NP-complet ou non polynomial est caractérisé par le fait qu'il n'existe pas d'algorithme informatique capable de donner des solutions dans un temps raisonnable.

Filtrage

Un sous-problème est défini par l'ensemble de toutes les contraintes du problème et un sous-ensemble de l'ensemble des variables du problème. La consistance locale consiste à analyser un ensemble de sous-problèmes du problème global afin de détecter des valeurs incohérentes des valeurs ne respectant pas les contraintes. Pour un sous-problème donné, les valeurs incompatibles sont enlevées des domaines, et les nouveaux domaines ainsi créés sont propagés sur d'autres sous-problèmes.

Ainsi, le filtrage correspond à la phase de pré-traitement des recherches des solutions des problèmes CSP. Il consiste à réduire les domaines de valeurs de chaque variable aux valeurs potentiellement éligibles dans des solutions (figure 83). Ceci permet d'éviter par la suite des calculs inutiles, c'est à dire de tester des valeurs qui n'ont aucune chance d'être un des éléments d'une solution.

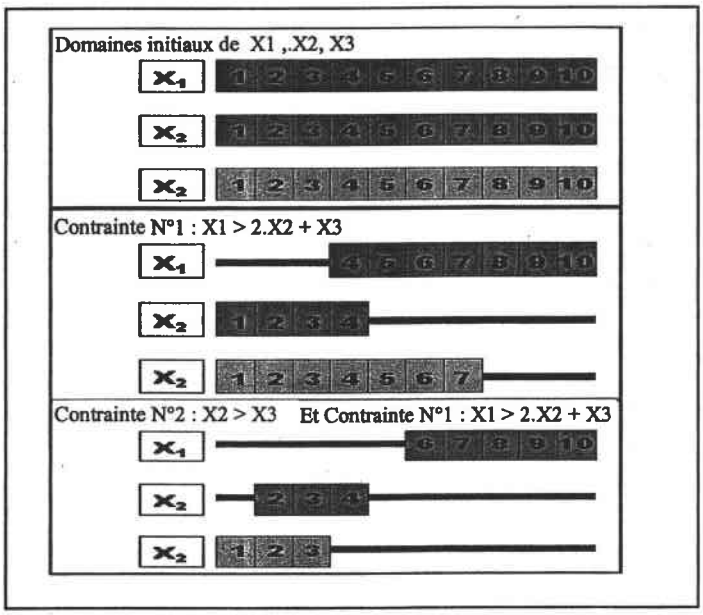


Figure 83. Exemple de filtrage (propagation de contraintes) sur des variables entières

Si le filtrage permet de renseigner sur les valeurs pouvant entrer dans une solution, il ne prétend pas à donner la combinaison des valeurs qui construit une solution. Cet aspect est le rôle des moteurs de recherche de solutions.

Recherche de solutions

La consistance globale est rattachée à la détection de solutions du problème CSP. Lorsque les techniques de consistance globale ont permis de ne garder que les valeurs ou les combinaisons de valeurs qui apparaissent dans une solution, alors le système de contraintes est dit globalement consistant.

Le moteur de recherche de solutions consiste à trouver les valeurs compatibles entre elles au regard de toutes les contraintes. L'énumération des solutions est réalisée au moyen de différents algorithmes.

L'environnement Con'flex propose trois algorithmes (figure 84). Ils sont tous fondé sur une recherche arborescente, mais deux d'entre eux sont des algorithmes hybrides, en ce sens qu'ils effectuent un certain niveau de filtrage à chaque instanciation de variable dans le développement de l'arbre [Rellier, 1996] [Fischer, 2000].

L'algorithme Backtrack : Il repose sur des tests itératifs de cohérence sur la variable courante à instancier. Certaines variables étant déjà instanciées, le backtrack tente par une énumération exhaustive de trouver une valeur cohérente pour la variable courante. Si aucune valeur du domaine de la variable n'est acceptable, il se recentre sur une variable déjà instanciée afin de trouver une nouvelle valeur compatible avec les précédentes qui permettra de déterminer une valeur pour la variable suivante. Si, par contre, une valeur est trouvée pour la variable courante, l'algorithme se déplace sur l'étude de la variable suivante. L'algorithme du backtrack fonctionne sur des tests itératifs de valeurs et des retours en arrière en cas d'échec. Son objectif est d'assurer la cohérence globale. Cette recherche énumérative essaie de construire pas à pas une solution en revenant en arrière sur ses choix à chaque fois qu'il apparaît que l'affectation partielle courante est incohérente. Elle est lourde et coûteuse.

L'algorithme forward-checking : Il applique une forme de consistance locale aux variables non encore instanciées. Les variables futures à instancier voient leur domaine de valeurs réduit à des valeurs cohérentes, ce qui par la suite permettra de limiter les temps de calculs. Cependant, les seules variables futures à instancier qui sont soumises au filtrage sont celles directement liées à la variable courante par des contraintes : le filtrage n'est pas plus profond.

L'algorithme real-full-look-ahead : Il propose la même philosophie de filtrage que le *forward-checking*, mais préconise, en plus du filtrage des domaines des variables les plus proches, le filtrage de toutes les variables futures à instancier indirectement liées à la variable courante. Le filtrage est donc beaucoup plus profond au cours de la recherche.

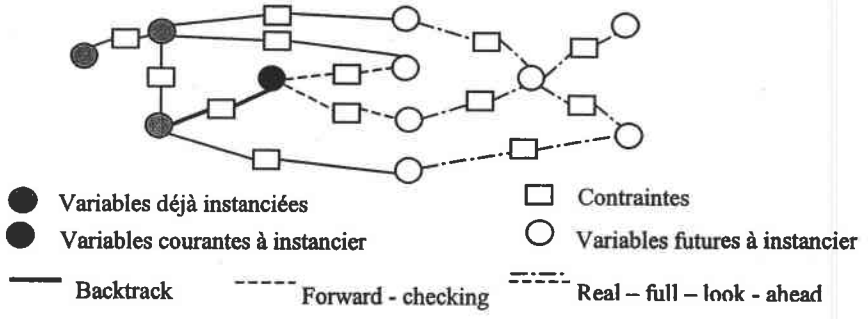


Figure 84. Les algorithmes de recherche [Fischer 2000]

Nous utilisons dans notre phase de recherche de solutions l'algorithme *Real-full-look-ahead*. Son intérêt essentiel est de permettre le raffinement des espaces de recherche durant la recherche, alors qu'il n'y a aucun filtrage inclus dans l'algorithme de *backtrack*.

Conclusion

Notre cadre de travail et de modélisation nous a mené à certains choix. Ces choix sont dus à la particularité des contraintes et des variables dont nous disposons.

Pour fournir un support au raisonnement pour l'estimation des coûts des processus de production d'un produit, rappelons que nous avons choisi le logiciel Con'flex. Ce logiciel propose un cadre de programmation aisé et un ensemble d'outils relatifs aux techniques de filtrage et de recherche de solutions. Il est capable de traiter des variables hétérogènes (continues, discrètes et floues). Nous avons pu y intégrer les contraintes flexibles en plus de celles de natures continues, discrètes, mixtes ou particulières. Bien que les variables soient de nature différente, cet environnement n'appartient pas au domaine des CSP flous ou autres. Il utilise des méthodes d'inférence classiques. Les variables floues sont traitées comme des intervalles numériques auxquels sont attachés des degrés de satisfaction : l'inférence est numérique.

Ce logiciel propose un langage d'expression du problème en termes de variables, de contraintes, et fournit un ensemble d'algorithmes de résolution. Ces algorithmes visent d'une part à réduire l'espace dans lequel il faut rechercher des solutions (cette opération s'appelle le *filtrage*), et d'autre part à parcourir cet espace (de manière *arborescente*) pour y trouver des solutions. On parle de résolution pour désigner la procédure qui met en œuvre tout à la fois le filtrage et la recherche de solutions.

Enfin, nous utilisons Con'flex car il permet de résoudre des problèmes sous-contraints.

4.4.3 Modélisation de l'estimation des coûts de production

Du point de vue de l'estimateur des coûts, en plus des nouvelles activités de support évoquées précédemment, un ensemble de données supplémentaires sont à prendre en compte :

L'évolution technologique : une même surface (opération) peut être obtenue par différents procédés ; selon les spécifications qui pèsent sur la géométrie, le nombre de procédés éligibles sera plus ou moins élevé ; mais d'un point de vue technique, il devient tout à fait envisageable par exemple de réaliser un parallélépipède en tournage ou un cylindre en fraisage [Deneux, 1993].

Un contexte de production très dynamique : celui-ci influe également sur la validité de l'estimation des coûts du produit. La prise en compte de la disponibilité des ressources n'est

pas a priori du ressort de l'estimateur, mais les conséquences des hypothèses interviennent au moment du passage en production. Elle peuvent conduire à l'invalidation de l'estimation des coûts au niveau du service ordonnancement.

La formalisation de l'estimation des coûts de production d'un produit doit prendre en considération cette nouvelle donne. Le modèle proposé consiste à construire le raisonnement à partir d'une identification des variables, des connaissances et des contraintes.

Les variables

Le système expert, discuté à la section 4.3, permet d'associer au produit décomposé en entités l'ensemble des opérations de fabrication. Pour chaque opération, nous avons aussi capitalisé les machines alternatives capables. Cela a permis de paramétrer chaque opération par l'indice X_{ijk} : option machine k réalisant l'opération j générée par l'entité de fabrication i.

Deux variables du processus de production s'établissent autour de cette connaissance. Elles sont de deux types :

- Des variables booléennes relatives aux précédences éventuelles entre toutes les opérations de fabrication.

$X_{ijki'j'k'}$:	1	Si l'option k' de l'opération j' générée par l'entité de fabrication i' suit l'option k de l'opération j générée par l'entité de fabrication i,
	0	Sinon.

- Des variables entières relatives au rang de chaque opération de fabrication.

U_{ijk}	m	Si l'option k de l'opération j générée par l'entité i est exécutée comme la $m^{\text{éme}}$ opération dans le processus de production.

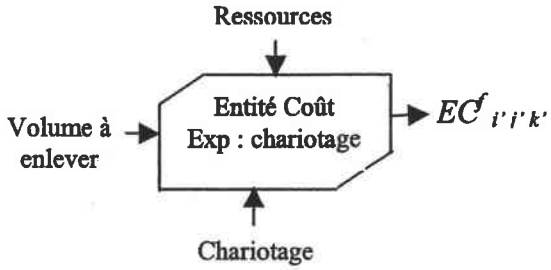
La troisième variable déclarée est relative au coût d'un processus de production solution.

- Une variable réelle à domaine flou notée C_{pp}.

Les connaissances

L'expertise d'estimation de coût capitalisée au niveau de chaque opération permet de déterminer le coût de fabrication EC^f correspondant à chaque association opération / machine. La connaissance des machines du système de production et de leur disposition dans l'atelier avec les moyens de manutention employés permet d'identifier les Entités Coût de préparation machine EC^{pr} et de manutention EC^m relatives à chaque variable $X_{ijki'j'k'}$. Nous les définissons comme suit :

- EC^{f}_{ijk} : Coût de fabrication de l'option k de l'opération j générée par l'entité de fabrication i (figure 85).



Avec :

$$EC^{f}_{i'j'k'} = \sum_{k' \in Ri} C^{r}_{k'} (y_{k'} (Volume\ à\ enlever))$$

Figure 85. Entité Coût opération de fabrication

- $EC^{pr}_{ijk,i'j'k'}$: Coût de préparation de l'option k' de l'opération j' générée par l'entité de fabrication i' si elle suit l'option k de l'opération j générée par l'entité de fabrication i (figure 86)

0	Si X_{ijk} et $X_{i'j'k'}$ sont sur la même machine,
Constante [$f(k)$]	Si elles ne sont pas sur la même machine.

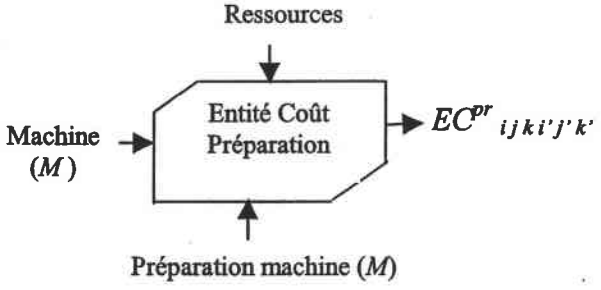


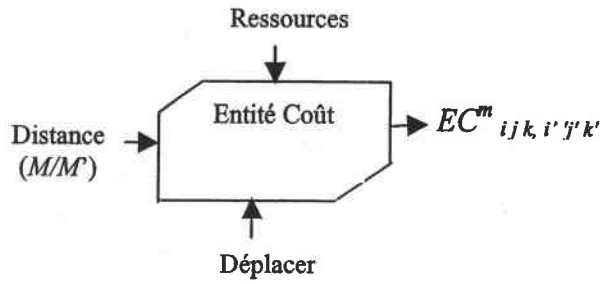
Figure 86. Entité Coût préparation machine

Une distinction doit être faite entre le coût de fabrication proprement dit et le coût de préparation machine. Pour les entreprises ayant des lots de production de petite taille, de 1 à 100, les coûts de préparation de machine représentent une portion importante du coût total de production et doivent par la suite être estimés séparément. Pour cette Entité Coût, des interviews avec l'opérateur machine qui connaît bien les relations existantes entre le produit et le temps de préparation de la machine peuvent amener à la détermination de l'inducteur adéquat. Dans notre étude, et faute de données industrielles, nous avons choisi l'hypothèse d'affecter un coût constant de préparation en fonction de chaque machine k.

- $EC^{m}_{ijk,i'j'k'}$: Coût de manutention de l'option k' de l'opération j' générée par l'entité de fabrication i' si elle suit l'option k de l'opération j générée par l'entité de fabrication i (figure 87). Ce coût prend les valeurs :

0 Si X_{ijk} et $X_{i'j'k'}$ sont sur la même machine,

$EC^m_{ijk,i'j'k'}$ Si elles ne sont pas sur la même machine.



Avec :

$$EC^m_{ijk,i'j'k'} = \sum_{k' \in Ri} C^r_{k'}(y_{k'}(Distance\ M/M'))$$

Figure 87. Entité Coût manutention

Les contraintes

Le raisonnement d'estimation des coûts de production d'un produit se construit autour de quatre types de contraintes : les contraintes propres au modèle, la contrainte de coût, les contraintes de fabrication et les contraintes de production. Ces contraintes contribuent à l'inférence globale. Elles concourent toutes à l'estimation du coût d'un processus de production solution du produit.

La *contrainte de coût* sanctionne tout processus de production solution dépassant un coût maximal admissible fixé dès le départ et exprime un degré de satisfaction sur toute solution.

Les *contraintes de fabrication* sont issues des relations géométriques et topologiques entre les entités de fabrication. Elles décident les précédences à respecter entre les opérations des entités et les regroupements en phases de certaines d'entre elles. Elles exercent une influence directe sur les coûts de préparation de machines et des coûts de manutention.

Les *contraintes de production* sont issues de la prise en compte du facteur de disponibilité des machines lors de l'estimation des coûts. Elles précisent les restrictions de l'estimation de coûts à la réalité physique de l'entreprise qui, considérée du point du produit seul, supposait des disponibilités infinies des machines. Contrairement aux contraintes de fabrication liées aux produits, les contraintes de production liées au contexte sont dépendantes du moment où elles sont activées, dans la mesure où le contexte est par nature dynamique

La formalisation de la contrainte de coût ainsi que des contraintes de fabrication et de production sera développée dans les sections suivantes (4.4.3.1 – 4.4.3.2 – 4.4.3.1). Dans ce qui suit, nous présentons en premier les contraintes propres au modèle. Ces contraintes sont

complètement indépendantes du produit et du contexte de production. Elles assurent principalement la définition du modèle (figure 88).

Si on considère :

n : nombre d'entités de fabrication,
n_i : nombre d'opérations d'une entité de fabrication i,
n_{ij} : nombre d'options d'une opération j d'une entité de fabrication i
N : nombre total d'opérations de fabrication possibles.

On aura :

$$N \leq \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_i} n_{ij}$$

On ajoute les deux états $X_{0,1,1}$ et $X_{n+1,1,1}$ qui représentent respectivement la pièce dans l'état brut dans le stock de matière première et la pièce dans l'état fini dans le stock des produits finis.

Les contraintes propres au modèle sont :

Contraintes conjonctives mutuellement exclusives

- Une seule opération peut suivre une opération donnée :

$$\sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k,i',j',k'} = 1 \quad pour\ i = 0,\ldots,n\ ;\ j = 1,\ldots,ni\ ;\ k = 1,\ldots,n_{ij}$$

- Une seule opération peut précéder une opération donnée :

$$\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} X_{i,j,k,i',j',k'} = 1 \quad pour\ \ i' = 1,\ldots,n+1\ ;\ j' = 1,\ldots,ni\ ;\ k' = 1,\ldots,n_{i'j'}$$

- La pièce en stock MP ($X_{0,1,1}$) est suivie d'une seule opération sauf ($X_{n+1,1,1}$) :

$$\sum_{i'=1}^{n} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{0,1,1,i',j',k'} = 1$$

- La pièce en stock PF ($X_{n+1,1,1}$) est précédée d'une seule opération sauf ($X_{0,1,1}$) :

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} X_{i,j,k,n+1,1,1} = 1$$

Contraintes disjonctives de dépendance mutuelle

- Une opération ne peut que suivre ou précéder une opération donnée

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k,i',j',k'} \neq \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i',j',k',i,j,k} \quad pour\ \ j=1,\ldots,n_i\ ;\ j'=1\ ou\ 2\ ou\ldots.n_{i'}$$

Figure 88. Les contraintes propres au modèle

Contraintes conjonctives de dépendance mutuelle

- Une opération qui précède doit suivre

$$\sum_{i=1}^{n+1}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{nij} X_{i,j,k,i',j',k'} = \sum_{i'=1}^{n+1}\sum_{j'=1}^{ni'}\sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i',j',k',i,j,k} \quad pour\ i=1,...,n\ ;\ j=1,...,n_i\ ;\ k=1,...,n_{ij}$$

Contraintes relatives à l'énumération de l'ordre des opérations

- l'ordre de l'opération dans la séquence

$$U_{i,j,k} - U_{i',j',k'} + X_{i,j,k,i',j',k'} = 0$$

- contrainte sur la première et dernière position dans le processus (initialisation)

$U_{0,1,0} = 0$ Stock matière première.

$U_{n+1,0,0} = N+1$ Stock produit fini.

Figure 88. Les contraintes propres au modèle (suite)

4.4.3.1 Contrainte de coût

Le deuxième type de contrainte est la contrainte de coût. Tout produit conçu et industrialisé doit répondre à certaines exigences. En terme de coût, le produit doit respecter le coût maximal admissible fixé dès le départ. Ne pas dépasser cette limite garantit la rentabilité pour l'entreprise et assure sa percé concurrentielle sur le marché. Cette contrainte sanctionne tout processus de production solution éloigné des objectifs économiques et exprime un degré de satisfaction sur toute solution. Sa forme est la suivante[11] :

$$\sum_{i=1}^{n+1}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{n_{ij}}\sum_{i'=1}^{n}\sum_{j'=1}^{n_{i'}}\sum_{k'=1}^{n_{i'j'}}(EC^{pr}{}_{i,j,k,i',j',k'} + Q\,EC^{f}{}_{i',j',k'} + EC^{m}{}_{i,j,k,i',j',k'})X_{i,j,k,i',j',k'} \langle\ Coût\ maximal\ admissible$$

Le premier terme de cette contrainte correspond à la variable *Cpp* déclarée au départ, c'est à dire, le coût d'un processus de production solution du produit.

---

[11] Q correspond à la taille du lot de fabrication. Il a pour but de compenser les temps de préparation des machines. Il est clair que, s'il faut par exemple ½ h pour préparer une machine à un nouveau produit et 3mn pour le fabriquer, on cherchera à rentabiliser chaque préparation en fabriquant un certain nombre de produits. La détermination de la taille du lot se fait suivant des méthodes bien déterminées qui ne sont pas liées au sujet de ce travail.

Cette variable réelle appartenant à un domaine flou formalise la relation existante entre les connaissances $EC^{f}_{ijki'j'k'}$, $EC^{pr}_{ijki'j'k'}$, $EC^{m}_{ijki'j'k'}$ et les opérations X_{ijk}. A chaque processus de production solution est associée une valeur de coût *Cpp* qui correspond à un assemblage d'Entités Coût élémentaires et un degré de satisfaction.

$$Cpp = \sum_{i=1}^{n+1}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{n_{ij}}\sum_{i'=1}^{n}\sum_{j'=1}^{n_{i'}}\sum_{k'=1}^{n_{i'j'}}(EC^{pr}_{i,j,k,i',j',k'} + Q\,EC^{f}_{i',j',k'} + EC^{m}_{i,j,k,i',j',k'})X_{i,j,k,i',j',k'}$$

Sur la figure 89, la fonction $S_{\text{coût estimé}}$ (C_{PP}) représente les degrés de satisfaction associés aux différentes valeurs du Coût C_{PP}.

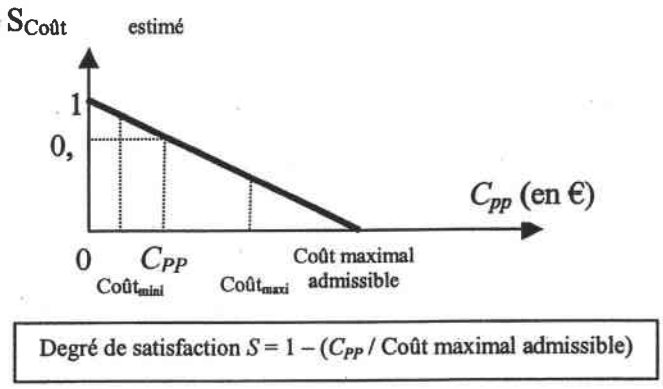


Figure 89. L'ensemble flou associé à la contrainte flexible Coût

En conclusion, le type d'expression de cette contrainte de coût permet de classer toutes les solutions par ordre décroissant du degré de satisfaction. Ainsi, l'ensemble des solutions est compris entre un $Coût_{mini}$ et un $Coût_{maxi}$.

4.4.3.2 Contraintes de fabrication

Ce domaine d'expertise constitue un point important dans la détermination des processus de production, dans le sens où c'est celui qui décide effectivement des précédences à respecter entre les opérations des entités et les regroupements en phases de certaines d'entre elles. Cela permet de cerner les alternatives du routage du lot dans le système de production et par la suite les activités et opérations engendrées telles que les préparations des machines et les manutentions. Aussi, ce pôle d'expertise met en œuvre des savoir-faire qui permettent de modéliser l'ensemble des interactions entre les différentes entités définissant la pièce.

Fondamentalement, les relations de précédence entre opérations s'effectuent de manière conditionnée par la précision des relations géométriques et topologiques existantes entre les entités et décidées en phase de conception détaillée.

Une relation géométrique indique une zone géométrique dans laquelle une des entités en relation doit se situer, par référence à l'autre. Lors de la fabrication des deux entités, la

précision de la réalisation de la relation dépend de la précision de la machine-outil utilisée et de la précision due au posage de la pièce. Il existe trois configurations pour réaliser deux entités de fabrication E_1-E_2 en relation [Derras, 1998] :

- Une première configuration consiste à fabriquer les deux entités de la relation dans une même sous-phase. Ici, la précision de réalisation de la relation entre les entités ne dépend que de la précision de la machine utilisée. C'est le cas le plus favorable pour le respect de la spécification géométrique entre les entités. La seule façon d'améliorer la précision obtenue est d'utiliser une machine plus précise. Ainsi, lorsque le fabricant estime que la précision d'une relation est « serrée », c'est à dire que la spécification géométrique est difficile à obtenir, il n'envisage que cette première configuration pour la fabrication des deux entités E_1 et E_2.
- Dans la deuxième configuration, une première entité de fabrication est réalisée dans une sous-phase, tandis que l'autre dans une sous-phase suivante, cette dernière faisant intervenir la première entité comme prise de pièce. Dans tous les cas, la précision de réalisation de la relation entre entités dépend non seulement de la précision de la machine utilisée, mais aussi de la qualité du posage sur cette entité pour fabriquer l'autre entité. Ainsi, lorsque le fabricant estime que la précision d'une relation est « moyennement serrée », c'est à dire que la spécification géométrique n'est pas très difficile à obtenir, il envisage qu'en plus de la première configuration, cette configuration peut aussi exister pour la fabrication des deux entités E_1 et E_2.
- La configuration la plus générale consiste à fabriquer les deux entités E_1 et E_2 de la relation indépendamment l'une de l'autre. Elle fait intervenir au moins une entité E_3 comme prise de pièce des sous-phases dans lesquelles E_1 et E_2 sont fabriquées. C'est de loin la configuration la plus défavorable pour la précision de réalisation de la relation entre deux entités. Ainsi, lorsque le fabricant estime que la précision d'une relation est large, c'est à dire que la spécification géométrique n'est pas difficile à obtenir, il envisage l'existence de cette configuration en plus des deux autres pour la fabrication des deux entités E_1 et E_2.

Cependant, l'expertise de fabrication liée au choix de l'une de ces configurations est assez complexe dans son expression. Dans son influence sur la précision de chaque relation entre deux entités, la valeur de la tolérance est systématiquement dépendante de l'aptitude d'appui des entités, de leur position relative, de leur type, ainsi que des directions des outils.

Pour des raisons de simplicité de présentation et afin que l'on puisse bien identifier le type de raisonnement, nous avons volontairement limité l'analyse à l'aptitude d'appui des entités. Cette propriété permet à l'entité de participer à la prise de pièce sur le montage d'usinage (sous-phase).

Dans les trois configurations présentées ci-dessus, tout ordre entre la fabrication des entités est envisageable pour la dernière, contrairement aux deux premières qui reflètent une condition qu'il faut respecter. Leur examen montre que les différentes alternatives de décisions concernant la fabrication des deux entités en relation sont clairement au nombre de trois :

- même sous-phase,
- entité *i* avant entité *i'*,
- égalité de précédence.

Nous nous arrêtons sur ce niveau d'analyse pour faire deux remarques, l'une liée à l'expertise de fabrication et l'autre à l'estimation des coûts de production :

- Du point de vue fabrication, les opérations d'ébauche influent peu sur le respect des relations géométriques entre les entités, tandis que les opérations de finition sont extrêmement concernées.
- Du point vue estimation des coûts de fabrication propres à chaque opération, des coûts de manutention et de préparation des machines, l'ordre des opérations au sein d'une phase n'a aucune influence. Tandis que, l'appartenance ou non d'une opération à une phase a des effets sur ces types de coûts du processus de production.

Notre objectif à ce niveau est d'apporter aux concepteurs du produit une évaluation économique du processus de production correspondant. Nous nous intéressons donc aux opérations de finition et nous nous plaçons au niveau de la phase.

Les trois alternatives de fabrication associables à une relation géométrique (figure 90), présentées ci-dessus, correspondent d'un point de vue production aux suivantes :

- Fabriquer les deux opérations de finition des deux entités dans une même sous-phase revient à imposer la même phase pour les deux opérations :

  $X_{ijk(M),i'j'k'(M')} = 1$ avec $M=M'$

- Fabriquer l'entité *i* avant l'entité *i'* signifie que l'opération finition *j* de l'entité *i* précède l'opération finition *j'* de l'entité *i'* (même phase ou non) :

  $U_{ij} < U_{i'j'}$

- Egalité de précédence entre les deux entités, ce qui signifie l'absence de contraintes sur les opérations des entités lors de la réalisation de la relation géométrique.

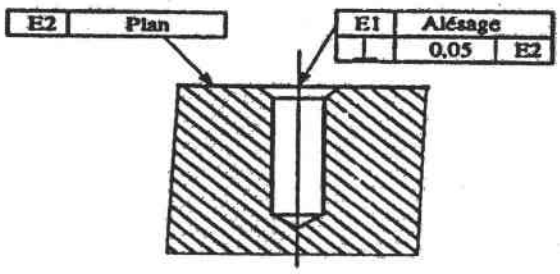


Figure 90. Exemple de relation géométrique : la perpendicularité entre *E1* et *E2*

Une relation topologique, souvent implicite au niveau de la conception, permet de caractériser une relation de voisinage entre deux entités. La connaissance de ces relations est nécessaire en fabrication pour traiter les problèmes d'inférence entre entités. Suivant le type de la relation exprimée et la qualité des entités, un ordre entre les opérations associées peut être imposé.

La spécification des relations topologiques entre deux entités permet essentiellement une prise en compte au plus tôt des problèmes de bavures sur les arêtes après fabrication. La formation de bavure peut créer des problèmes de type : assemblage, reprise de pièce en usinage, risques de dysfonctionnement du produit, risques de blessures lors de la manipulation de la pièce... Toutes ces raisons poussent à effectuer une opération d'ébavurage, c'est à dire une opération de fabrication en plus, conduisant à des coûts d'ébavurage. Dans certains cas cependant, l'ébavurage n'est pas nécessaire. Une bavure peut être acceptée si elle ne présente pas les inconvénients précédents et l'optimisation de fabrication peut être privilégiée, sauf dans le cas de bavure sur une surface de qualité précise.

A ce propos, Blondaz [1999] présente un recueil de règles textuelles destinées aux acteurs de la conception du produit afin d'éviter ou simplifier l'ébavurage.

Les différentes alternatives de décision concernant la fabrication de deux entités en relation topologique peuvent être synthétisées au nombre de deux :

- entité *i* avant entité *i'* (ébauche et finition),
- entité *i* avant entité *i'* (ébauche) et entité *i'* avant entité *i* (finition).

Ces deux alternatives de fabrication, associables à une relation topologique (figure 91), correspondent d'un point de vue production aux suivantes :

- Réaliser toutes les opérations de *i* avant les opérations de *i'* signifie que le rang de toutes les opérations associées à *i* est inférieur à celles de *i'* :

$$U_{ijk(M)} < U_{i'j'k'(M')} \text{ pour } j=0,...,n_i;\ k=0,...,n_{ij}\ ;\ j'=0,...,n_{i'} \text{ et } k'=0,...,n_{i'j'}$$

- Réaliser toutes les opérations d'ébauche de i avant les opérations d'ébauche de i' et les opérations de finition des deux entités, inversement cela signifie que le rang de toutes les opérations d'ébauche (finition) associées à i (i') est inférieur à celles de i' (i) :

$$U_{i\,j\,k\,(M)} < U_{i'\,j'\,k'\,(M')} \text{ pour } j=0,\ldots,n_{i\text{-}f};\ k=0,\ldots,n_{ij}\ ;\ j'=0,\ldots,n_{i'\text{-}f} \text{ et } k'=0,\ldots,n_{i'j'}$$
$$U_{i'\,j'\,k'\,(M')} < U_{i\,j\,k\,(M)} \text{ pour } j=n_{i\text{-}f},\ldots,n_i;\ k=0,\ldots,n_{ij}\ ;\ j'=n_{i'\text{-}f},\ldots,n_{i'} \text{ et } k'=0,\ldots,n_{i'j'}$$

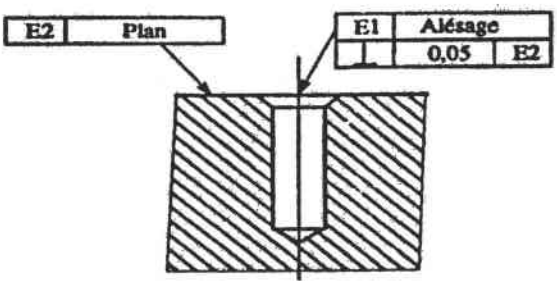


Figure 91. Exemple de relation topologique : *E1* commence sur *E2*

L'analyse des relations géométriques et topologiques entre entités de fabrication s'effectue dans notre cas sous le système *CostAdvantage*. Nous avons associé à chaque *contexte* de relation (figure 92) une base de règles qui décide les précédences éventuelles à respecter entre les opérations de fabrication et pose ainsi les contraintes à satisfaire dans le processus de production.

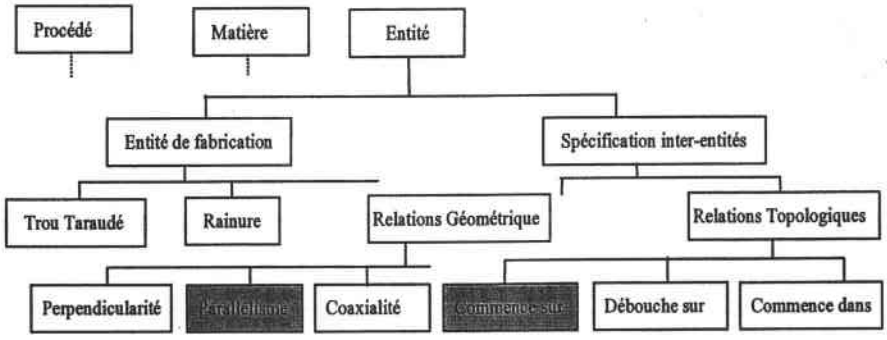


Figure 92. Les contextes relations géométriques et topologiques

Les règles sont d'un niveau stratégique et liées à l'expertise de fabrication qui, en fonction des caractéristiques des entités et des relations géométriques ou topologiques exprimées par le concepteur, posent telle ou telle contrainte sur le processus de production.

Les règles présentées à la figure 93, associées à la relation de « parallélisme » exprimée entre deux entités i et i', posent, suivant l'aptitude d'une entité d'être un appui dans le posage de la pièce, une contrainte de précédence, suivant la règle 1, entre les deux opérations de finition n_i et $n_{i'}$ des deux entités ou, suivant la règle 2, une contrainte sur la variable $X_{i\,j\,(M),\ i'\,j'\,(M')}$, signifiant que les deux opérations de finition n_i et $n_{i'}$ sont réalisées dans la même phase (machine M ou machine M').

Règle 1 :
Si
Entité i est une entité d'appui
Entité i' n'est pas une entité d'appui
Alors
$U_{ij} < U_{i'j'}$
Pour $j = n_i ; j' = n_{i'}$
Règle 2 :
Si
Entité i n'est pas une entité d'appui
Entité i' n'est pas une entité d'appui
Alors
$X_{ij\,(M),\,i'j'\,(M')} = 1$
Pour $j = n_i ; j' = n_{i'}$
Et $M=M'$

Figure 93. Règles de pose de contraintes associées à la relation « Parallélisme »

Les règles présentées à la figure 94, associées à la relation « commence sur » exprimée entre deux entités i et i', posent suivant la qualité de la surface concernée de l'entité i, une contrainte de précédence, suivant la règle 1, entre toutes les opérations de l'entité i relativement à toutes les opérations de l'entité i' ou, suivant la règle 2, l'ordre des opérations de finition n_i et $n_{i'}$ des deux entités est l'inverse de l'ordre de leurs opérations d'ébauche.

Règle 1 :
Si
Planéité Entité $i \geq 0.05$ et
Rugosité Entité $i >$ Ra 3.2
Alors
$U_{ij} < U_{i'j'}$
Pour $j=0,\ldots,n_i ; j'=0,\ldots,n_{i'}$

Règle 2 :
Si
Planéité Entité $i < 0.05$ et
Rugosité Entité $i \leq$ Ra 3.2
Alors
$U_{ij} < U_{i'j'}$
Pour $j=0,\ldots,n_{i-1} ; j'=0,\ldots,n_{i'-1}$
et
$U_{i'j'} < U_{ij}$
Pour $j = n_i ; j' = n_{i'}$

Figure 94. Règles de pose de contraintes associées à la relation « commence sur »

Ces grandes règles de savoir-faire stratégique posent les contraintes à respecter pour tout processus de production solution. L'estimateur de coûts (concepteur) cerne ainsi les alternatives du routage du lot dans le système de production. Signalons qu'une fois ces règles

prioritaires appliquées, il en existe d'autres que nous ne traitons pas ici et qui permettent « d'optimiser » l'architecture conçue et de définir la gamme. Cette optimisation s'effectue à partir de règles de fabrication limitant le nombre de sous-phases. Des critères comme la prise de pièce du point de vue du bridage et les directions d'usinage sont pris en compte et permettent d'effectuer cette optimisation.

4.4.3.3 Contraintes de production

Un contexte de production peut invalider une estimation de coûts d'un produit. Il influe de manière restrictive principalement sur le choix des machines, selon que celles ci peuvent être ou non utilisées ou en panne (indisponibilité). Le regard du contexte de production du produit introduit dans le modèle de nouvelles contraintes. Leurs négligences rendent caduques certains des choix que l'estimation sur des critères strictes du produit pouvait autoriser et leur prise en compte redonne plus de fiabilité à la solution. En effet :

- Si l'indisponibilité d'une machine sélectionnée est d'une durée limitée, la conséquence est un retard avec des coûts de pénalité éventuels (plus coûts d'immobilisation) ;
- Si l'indisponibilité d'une machine sélectionnée est durable, la conséquence est l'affectation en ordonnancement d'une machine alternative à coût différent.

La prise en compte au plus tôt de cette perturbation latente permet donc non seulement de relaxer les contraintes de production mais aussi d'éviter des fausses estimations ou des re-bouclages inutiles.

Cette constatation nous a conduit à intégrer cette donne dans le modèle d'estimation des coûts. La formalisation adoptée s'effectue dans le système expert *CostAdvantage* selon la figure 95. L'utilisateur choisi au départ *le contexte* d'estimation des coûts : *planifié* ou *non planifié*. *Les caractéristiques procédés* de la fenêtre associée au contexte *Planifié/Matière/Entité de fabrication* sont l'ensemble des machines du système de production. Chaque machine (caractéristique procédé) peut prendre deux valeurs textuelles logiques : Disponible, Indisponible.

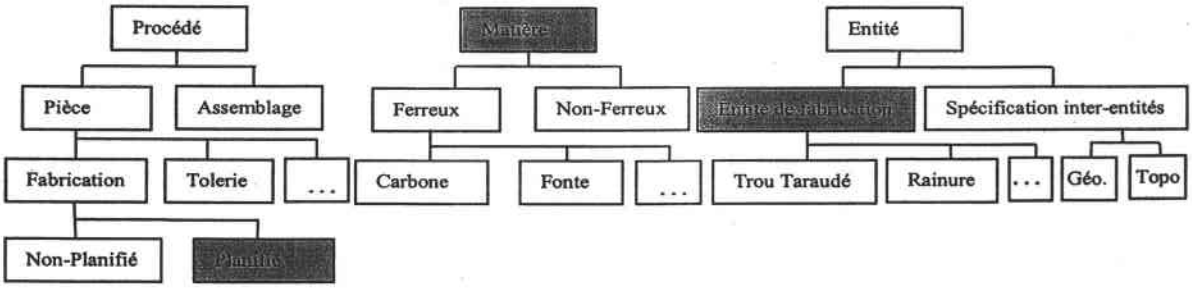


Figure 95. Le contexte CostAdvantage : Planifié / Matière / Entité de fabrication

Nous avons associé à ce *contexte* une base de règles. A chaque valeur « non disponible » prise par une machine, la règle correspondante active la ou les contrainte(s) de production à satisfaire pour tout processus solution.

Dans l'exemple de la figure 96, la règle teste la disponibilité de la machine Cu4x. Si, comme l'exprime la règle, la machine est indisponible, alors la contrainte de production est posée, toute variable $X_{i\,j\,k,\,i'j'k'}$ ayant comme option machine k ou k' sur Cu4x est forcée de prendre la valeur 0. Ceci permet d'éviter d'avoir dans le processus de production solution cette machine indisponible et de prévenir une estimation de coût du produit invalide.

Règle :
Si
Machine Cu4x = « Indisponible »
Alors

$$X_{i,j,k(Cu4x),i',j',k'} = 0$$

$$pour\ i = 0,\ldots,n\ ;\ j = 1,\ldots,n_i\ ;\ k = k(Cu4x)$$

$$pour\ i' = 0,\ldots,n+1\ ;\ j' = 1,\ldots,n_{i'}\ ;\ k' = 0,\ldots,n_{i'j'}$$

et

$$X_{i,j,k,i',j',k'(Cu4x)} = 0$$

$$pour\ i = 0,\ldots,n\ ;\ j = 1,\ldots,n_i\ ;\ k = 0,\ldots,n_{ij}$$

$$pour\ i' = 0,\ldots,n+1\ ;\ j' = 1,\ldots,n_{i'}\ ;\ k' = k(Cu4x)$$

Figure 96. Règle d'activation des contraintes de production relatives à l'indisponibilité de la machine Cu4x

Selon le cas choisi par l'utilisateur, l'estimation des coûts est réalisée dans un contexte à procédé planifié ou non (figure 95). Dans la première option, les contextes fils doivent respecter des valeurs 0 de $X_{i\,j\,k,\,i'j'k'}$ imposées par leur père. La deuxième revient à considérer l'hypothèse de la disponibilité des machines sans aucune contrainte de production, dans ce cas toute valeur de $X_{i\,j\,k,\,i'j'k'}$ est possible.

Conclusion

La plupart des systèmes d'estimation de coûts ne prennent pas en compte l'aspect ordonnancement et se contentent de proposer un coût unique correspondant à un processus de production unique. Si ce processus n'est pas réalisable, que ce soit de manière prévisible ou accidentelle, aucune estimation de coût alternative n'est proposée de manière automatique.

Le modèle d'estimation de coûts de production que nous proposons permet d'intégrer la notion de multiplicité des processus solutions sans avoir à en subir les désagréments.

Le processus de production apparaît comme un assemblage d'Entités Coût ordonnées. La figure 97 illustre la solution pour fabriquer les quatre opérations $X_{n,1,2}$, $X_{n',3,1}$, $X_{n'',2,2}$ et $X_{n,2,1}$ successivement. Leurs entités de fabrication d'appartenance sont n, n' et n''. $X_{n,1,2}$ |($X_{n',3,1}$ et

$X_{n'',2,2}$)| $X_{n,2,1}$ sont réalisées sur trois machines différentes et engendrent des coûts spécifiés dans la figure.

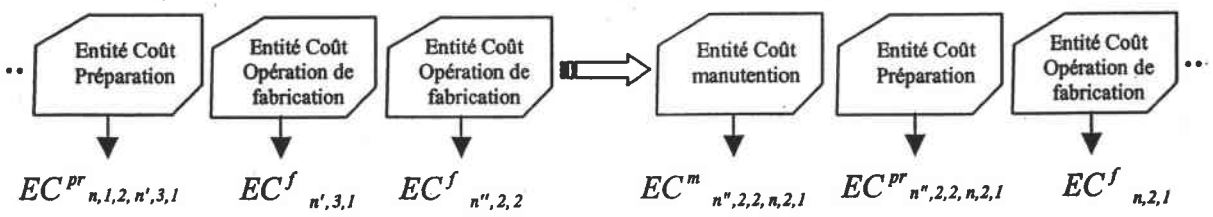


Figure 97. Une portion d'assemblage d'Entités Coût d'un processus de production

Entre les deux extrémités, qui représentent la pièce dans le stock de pièces brutes et dans le stock de pièces finis, un ensemble d'opérations de fabrication intermédiaires sont reliées entre elles dans un ordre qui peut être multiple. Le choix d'un ordre se justifie par le respect de toutes les contraintes, la multiplicité par l'existence de différentes alternatives de passage d'une Entité Coût à une autre.

La recherche d'une solution alternative consiste à rechercher les tronçons modifiables qui garantissent le respect d'une spécification, qui assurent l'infériorité du coût de production au coût maximal admissible et qui évitent la ressource indisponible.

C'est pourquoi le modèle d'estimation des coûts qui nous semble le mieux adapté, d'une part concernant la représentation explicite de la multiplicité des solutions techniques, d'autre part par rapport au respect simultané de toutes les contraintes, se présente sous la forme d'un problème de satisfaction de contraintes traduisant à la fois le séquencement des opérations et les machines de fabrication choisies.

La modélisation de l'estimation des coûts développée dans cette section a permis de générer les coûts alternatifs des processus de production. Chaque coût solution, nommé *Cpp*, est composé des coûts des opérations de fabrication, de préparation des machines et de manutention. L'objet de la section suivante est d'élargir l'estimation des Coûts.

4.4.4 Génération des inducteurs

La méthodologie du passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes présenté à la section 3.4 trouve son application après le développement du modèle d'estimation des coûts présenté à la section précédente. En effet, à chaque processus de production solution correspond une estimation des coûts ascendante du modèle Costgrammes. Des Entités Coût telles que le « changement d'outil » ou la « maintenance » sont fortement dépendantes du processus de production.

Dans la figure 98, nous reprenons le schéma du Modèle Produit/Costgrammes. Nous rappelons l'analyse descendante du Modèle Produit composé d'entités de fabrication, elles mêmes décomposées en opérations de fabrication. Ainsi, le niveau 1 comprend toutes les opérations de fabrication associées au produit. Le niveau 2 correspond à un processus de production solution. Il sera le support de l'estimation des Entités Coût d'un niveau supérieur ou égale et nécessaires à l'industrialisation du produit (figure 99). A chacune, nous proposons un inducteur I en fonction des valeurs solutions (0 ou 1) des $X_{ijk,\ i'j'k'}$ ($I(X_{ijk,\ i'j'k'})$).

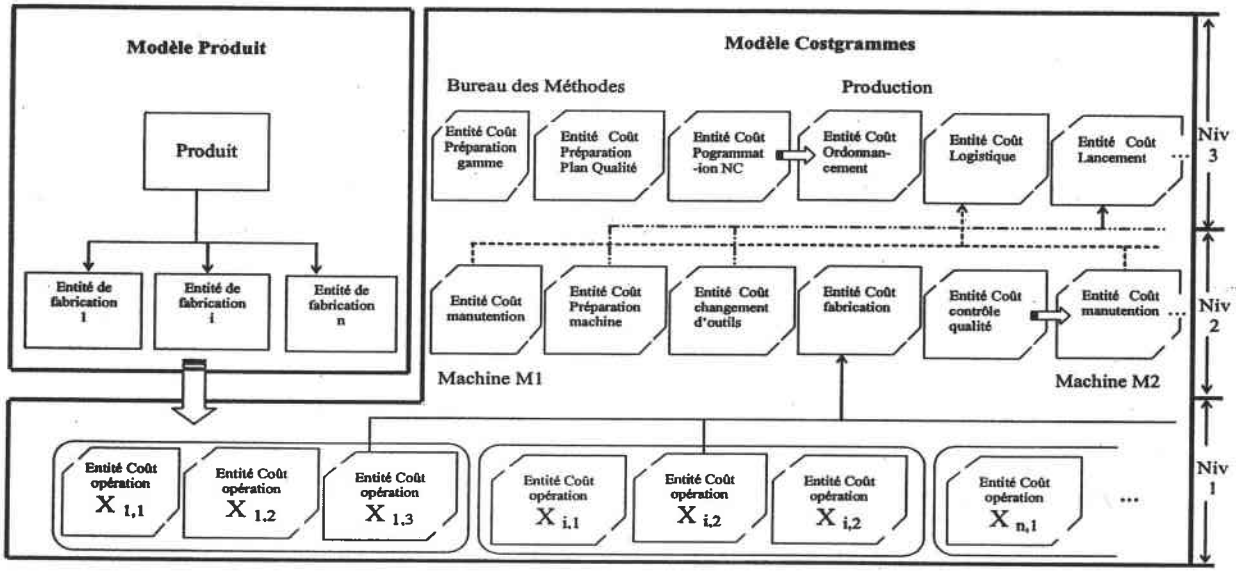


Figure 98. Le passage du Modèle Produit au Modèle Costgrammes

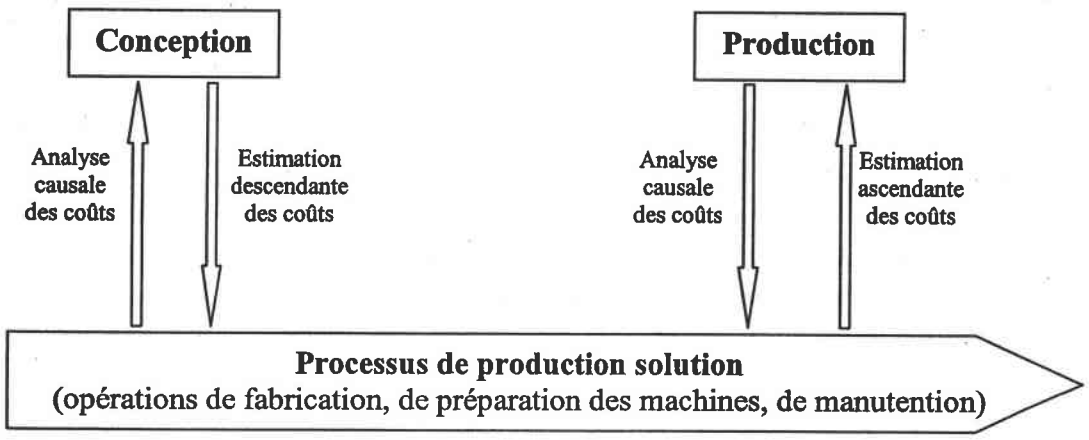


Figure 99. L'élargissement de l'analyse causale depuis la conception à la production

Cela nous a amené à esquisser une réflexion autour :

- de la génération automatique, et en fonction du processus de production solution, des fonctions inducteurs $I(X_{ijk,\ i'j'k'})$ des Entités Coût tels que le changement d'outils, l'élaboration de programme de commande numérique, l'élaboration de plan de contrôle de Qualité…

- de la génération automatique du coût unitaire du produit,
- de l'affectation à chaque entité de fabrication d'une estimation du coût intrinsèque et extrinsèque et l'initiation d'une analyse causale du type « quelle opération de fabrication est la cause de tel coût intrinsèque ou extrinsèque ?»,

4.4.4.1 Fonctions inducteurs des Entités Coût concourantes

Jusqu'à cette étape, la sortie du système d'estimation des coûts a été définie comme un ensemble de coûts possibles du produit. Chacun reflète un processus de production solution.

Pour chaque alternative, la connaissance claire des machines employées (k) pour la réalisation des types déterminés d'opérations (j) nécessaires aux entités de fabrication identifiées (i), dérivées des valeurs solutions des $X_{ijk,\, i'j'k'}$ (0 ou 1), permet de déduire les inducteurs d'Entités Coût concourantes à l'industrialisation du produit.

Nous appelons Entités Coût concourantes celles qui sont en amont, en aval et en soutien du processus de production. Elles font partie du coût total du produit (figure 100).

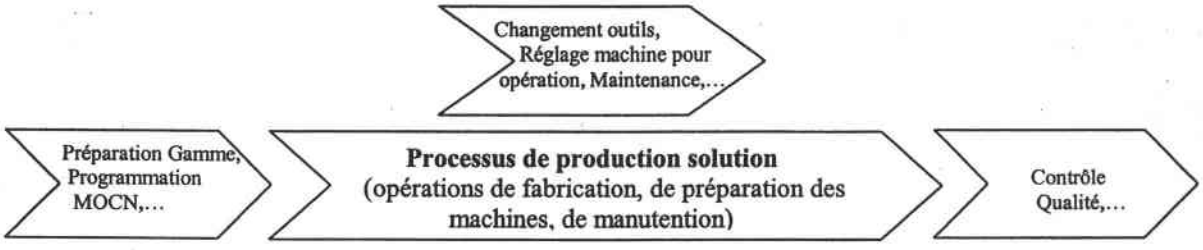


Figure 100. Entités Coût Concourantes

Nous présentons dans les encadrés des figures 101 et 102 la méthode de déduction des inducteurs, appliquée aux Entités Coût concourantes.

A chacune de ces Entités Coût concourantes correspond une fonction inducteur. Sa valeur en nombre entier est variable en fonction du produit et de son processus de production. Dans la variété des produits traversant l'entreprise, cela permet d'affecter à chacun ses propres coûts.

Les types des inducteurs peuvent être affinés suite à une analyse détaillée et suivant les méthodes de production de l'entreprise.

- **Entité Coût Changement d'outils sur la machine M1 :**

L'activité changement d'outils sur la machine M1 augmente si le nombre d'opérations sur la machine M1 augmente.

Inducteur = Nombre d'opérations sur la machine M1.

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')}$$

$$Avec: \quad X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')} = 1 \quad si\ M' = M1$$

$$= 0 \quad si\ M' \neq M1$$

- **Entité Coût Réglage de la machine M1 :**

L'activité réglage sur la machine M1 augmente si le nombre d'opérations sur la machine M1 augmente.

Inducteur = Nombre d'opérations sur la machine M1.

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')}$$

$$Avec: \quad X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')} = 1 \quad si\ M' = M1$$

$$= 0 \quad si\ M' \neq M1$$

- **Entité Coût Contrôle Qualité à la sortie de la machine M1 :**

L'activité contrôle sur machine M1 augmente si le nombre d'opérations de finition sur machine M1 augmente.

Inducteur = Nombre d'opérations de finition.

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),i',ni',k(M')}$$

$$Avec: \quad X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')} = 1 \quad si\ M = M1$$

$$= 0 \quad si\ M \neq M1$$

- **Entité Coût Maintenance de la machine M1 :**

L'activité maintenance de la machine M1 augmente avec le temps de fabrication sur la machine M1.

Inducteur = temps de fabrication sur la machine M1.

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')} \cdot t_{j'}$$

$$Avec: \quad X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')} = 1 \quad si\ M' = M1$$

$$= 0 \quad si\ M' \neq M1$$

- **Entité Coût Ordonnancement :**

L'activité ordonnancement affectée au produit augmente avec le nombre de ses opérations.

Inducteur = Nombre d' opérations du produit.

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')}$$

Figure 101. Les fonctions inducteurs des Entités Coût concourantes

- **Entité coût Préparation Gamme de Fabrication :**

L'activité préparation gamme augmente si le nombre d'opérations augmente.

Inducteur = Nombre d' opérations du produit.

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')}$$

- **Entité Coût Elaboration du Plan Contrôle Qualité :**

L'activité élaboration du plan contrôle qualité augmente si le nombre d'opération de finition augmente.

Inducteur = Nombre d'opérations Finition du produit.

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{j'=1}^{ni'} X_{i,j,k(M),i',ni',k'(M')}$$

- **Entité Coût Programmation CN :**

L'activité NC-Programming augmente avec le nombre d'opération sur les machines outils à commande numérique MOCN.

Inducteur = Nombre d'opérations sur MOCN

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),i',j',k'(M')}$$

$$Avec\ X_{i,j,k(M'),i',j',k'(M')} = 1 \quad si\ M' \in \{MOCN\ 1, MOCN\ 2, \ldots\}$$
$$= 0 \quad si\ M' \notin \{MOCN\ 1, MOCN\ 2, \ldots\}$$

Figure 102. Les fonctions inducteurs des Entités Coût concourantes (Suite)

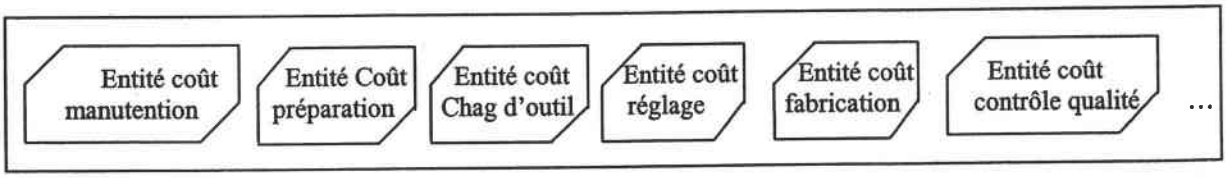
4.4.4.2 Estimation du coût unitaire du produit

A chaque commande d'un produit va correspondre à un nouvel assemblage d'Entités Coût.

Pour un produit ayant comme :

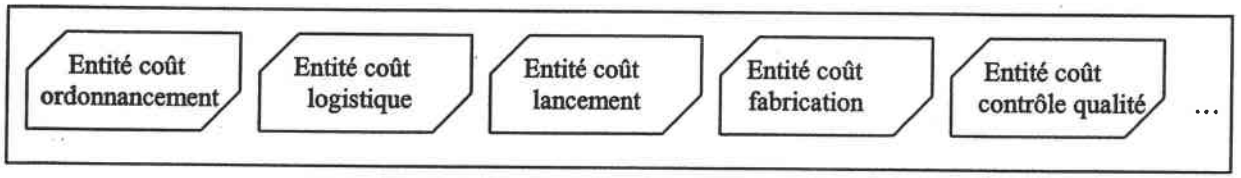
Q	nombre de pièces par lot.
N	nombre de lots par commande.
P	nombre de commandes.

- Niveau 2 du Modèle Costgrammes



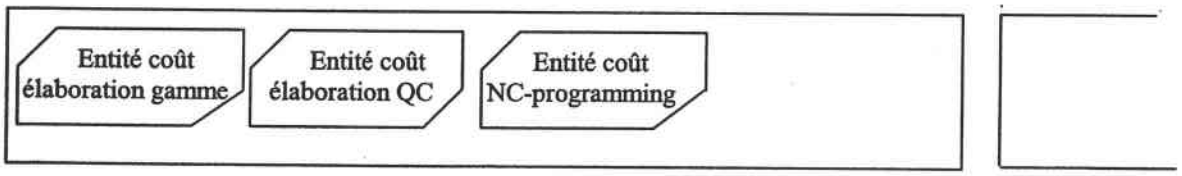
$$Coût\ d'un\ lot = \sum_{Phase} \left(\begin{array}{l} EC^{manutention} + EC^{préparation} + EC^{changement\ d'outil} + EC^{réglage} \\ + Q\,EC^{fabrication} + Q\,C^{contrôle\ qualité} + EC^{maintenance} \end{array} \right)$$

- Niveau 3 du Modèle Costgrammes



$$\textit{Coût d'une commande} = \begin{pmatrix} EC^{ordonnanment} + \sum_{phase} N.EC^{manutention} + \sum_{phase} N.(EC^{chang.outil} + EC^{réglage}) \\ + \sum_{phase} N.Q.EC^{fabricatin} + \sum_{phase} N.Q.EC^{qualité} + \sum_{phase} N.Q.EC^{maintenance} \end{pmatrix}$$

- Niveau 3 du Modèle Costgrammes



$$\textit{Coût Total} = \begin{pmatrix} EC^{\text{élaboratio n gamme}} + EC^{\text{élaboratio n plan contrôle qualité}} \\ + EC^{\text{programmat ion CN}} + P.\textit{Coût d'une commande} \end{pmatrix}$$

La connaissance du coût total permet de déterminer alors le coût unitaire :

Le coût unitaire du produit = Coût Total / P N Q

4.4.4.3 Estimation du coût d'une entité de fabrication

Le coût d'une entité de fabrication θ est la somme de son coût intrinsèque et extrinsèque

Coût (θ) = Coût intrinsèque θ + Coût extrinsèque θ .

- Coût intrinsèque de l'entité de fabrication θ :

Le coût intrinsèque est la somme des coûts des opérations de fabrication permettant d'obtenir sa géométrie désirée et de garantir sa qualité.

$$C_{intr} = \sum_{Phase} EC^{fabrication}(\theta)$$

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} EC^{fabrication}{}_{i,j,k,\theta,j',k'} X_{i,j,k,\theta,j',k'}$$

- Coût extrinsèque de l'entité de fabrication θ :

Le coût extrinsèque est la somme des coûts indirects correspondants aux activités auxiliaires causées par l'entité de fabrication θ :

$$C_{extrin} = \sum_{phase} \left(\begin{array}{l} \left(\frac{EC^{manutention} + EC^{préparation}}{Q} \right) \cdot \left(\frac{Nbr\ d'opérations\ de\ fabrication\ de\ l'entité\ i'}{Nbr\ total\ d'opérations\ de\ fabrication\ dans\ la\ phase} \right) \\ + EC^{réglage}\ ramenée\ aux\ opérations\ de\ l'entité\ i' \\ + EC^{changement\ d'outils}\ ramenée\ aux\ opérations\ de\ l'entité\ i' \\ + EC^{contrôle\ qualité}\ ramenée\ aux\ opérations\ de\ l'entité\ i' \\ + EC^{maintenance}\ ramenée\ aux\ ramené\ aux\ opérations\ de\ l'entité\ i' \end{array} \right)$$

Ce coût extrinsèque est composé de cinq éléments présents au niveau de chaque phase. Le premier élément est relatif aux coûts de manutention et de préparation des machines. L'absence de critère raisonnable d'affectation de ces types de coût à chacune des entités de fabrication concernées par la phase nous a conduit à choisir une répartition. Le rapport de répartition est le nombre d'opérations de l'entité de fabrication considérée sur le nombre total des opérations réalisées dans la phase. Cette solution est soumise à toutes les critiques qu'on peut formuler sur les clés de répartition.

Les quatre éléments suivants, et contrairement au premier, sont directement affectables à l'entité de fabrication considérée. Généralement jugés comme des coûts indirects, nous proposons leur suivi au niveau de chaque entité de fabrication, et par conséquent au niveau de chaque produit. Cela permet de suivre avec plus de précision ces types de coûts et apporte une prise en conscience dès la phase de conception de l'ensemble des coûts engagés.

Pour estimer le coût de chacun de ces quatre éléments, nous ferons appel aux fonctions inducteurs correspondantes et présentées précédemment. Ces fonctions $I(X_{ijk,\ i'j'k'})$, ayant comme valeurs des nombres entiers, peuvent être orientées pour chaque entité de fabrication. La méthode consiste à ne prendre en compte que les valeurs de $X_{ijk,\ i'j'k'}$ relatives à l'entité de fabrication considérée.

Le nombre d'opérations N_θ de l'entité de fabrication θ est :

$$N_\theta = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{nij}\sum_{j'=1}^{ni'}\sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k,\theta,j',k'}$$

Avec la connaissance au niveau de chaque Entité Coût des coefficients de consommation α_P des ressources P et leur taux d'imputation IT_p (voir l'équation de base d'une Entité Coût, section 2.3). Le coût extrinsèque de l'entité de fabrication θ aura la forme suivante :

$$\textit{Coût extrinsèque} = \sum_{Phase}\left(\begin{array}{l}
\left(\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{nij}\sum_{j'=1}^{ni'}\sum_{k'=1}^{ni'j'}\left(\frac{EC^{manutention}_{i\,j\,k,\,\theta\,j'\,k'} + EC^{préparation}_{i\,j\,k,\,\theta\,j'\,k'}}{Q\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{nij}\sum_{i'=1}^{n+1}\sum_{j'=1}^{ni'}\sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i\,j\,k,\,i'\,j'\,k'}}\right) X_{i\,j\,k,\,\theta\,j'k'}\right) \\
+\left(\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{nij}\sum_{j'=1}^{ni'}\sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k,\theta,j',k'(M')}\right)\sum_{p}\alpha_p TI_p \\
+\left(\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{nij}\sum_{j'=1}^{ni'}\sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),\theta,j',k'(M')}\right)\sum_{p}\alpha_p TI_p \\
+\left(\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{nij}\sum_{k=1}^{ni'j'} X_{i,j,k,\theta,n_{j'},k}\right)\sum_{p}\alpha_p TI_p \\
+\left(\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{ni}\sum_{k=1}^{nij}\sum_{j'=1}^{ni'}\sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k,\theta,j',k'}\cdot t_{j'}\right)\sum_{P}\alpha_p TI_P
\end{array}\right)$$

4.4.5 Conclusion

Un de nos objectifs annoncés est la prise en compte des contraintes issues du marché, de la fabrication et de la production lors de l'estimation des coûts. Cette intégration confère une fiabilité accrue aux coûts et évite des retours en arrière coûteux.

Pour un produit donné :

- la connaissance du marché permet de fixer un coût limite à ne pas dépasser,
- le respect de certaines tolérances géométriques et dimensionnelles spécifiées impose des choix de machines et des précédences entre les opérations de fabrication, influant ainsi sur les coûts de préparation machines et de manutention,
- l'indisponibilité pour des raisons de réparation ou de planning d'une machine de coût *C1*, amène une (des) opération(s) de fabrication sur une machine de remplacement de coût *C2*.

Dans cette section, nous avons proposé une modélisation de l'estimation de coût des processus de production alternatifs sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes

(CSP). Nous avons aussi défini des fonctions inducteurs relatives aux Entités Coût concourantes pour un processus de production solution. Ainsi, pour un produit donné, la définition des entités de fabrication dans le Modèle Produit support suffit pour déterminer le coût de chacun des processus de production alternatifs. Pour un processus sélectionné, l'analyse ascendante (causale) du Modèle Costgramme à travers les fonctions inducteurs des Entités Coût concourantes permet d'estimer le coût unitaire total d'un produit ainsi que les coûts extrinsèques d'une entité de fabrication.

Dans la section suivante, nous proposons une méthodologie de décision intégré dans le cadre de l'estimation des coûts exploitant la variabilité des processus de production.

4.5 Une méthodologie de décision intégrée

Industriels et scientifiques sont communément d'accord sur le rôle économique de la conception. Elle conditionne le coût total du produit et « fige » sa production. Nous nous rappelons que la conception d'un produit est un processus complexe qui engage de 70 à 80% des coûts d'un produit. Si l'on ne prend pas en compte une contrainte le plus tôt possible dans le cycle de conception, on fait du travail inutile ou en perd son temps en allers et retours de modification coûteux. Plus une modification de conception est détectée tard dans le cycle de vie d'un produit, plus elle coûte chère.

La figure 103 montre les courbes des coûts engagés et dépensés durant le cycle du vie d'un produit.

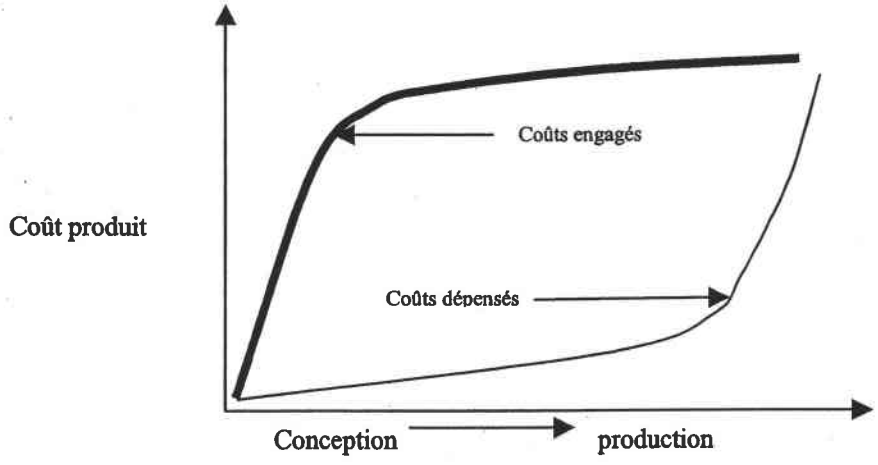


Figure 103. Coûts et cycle de vie d'un produit

Le pilotage d'un processus de conception est influencé par la temporalité du processus. Cette temporalité pose la question du niveau de granularité des coûts estimés. Cette granularité se précise de manière explicite dans les niveaux progressifs de définition du produit. Dans le même temps, l'évaluation des coûts, en phase de conception, ne présente un réel intérêt que dans la mesure où le cumul des coûts engagés laisse des marges de manœuvre. Dans les

phases avancées de la conception, l'évaluation économique peut avoir pour rôle d'aider au choix des solutions techniques sur la base d'un éclairage économique ou de tester la robustesse d'une solution technique par rapport à tous les scénarios d'hypothèses envisagées. Elle permet d'éclairer l'impact économique de choix techniques alternatifs (figure 104).

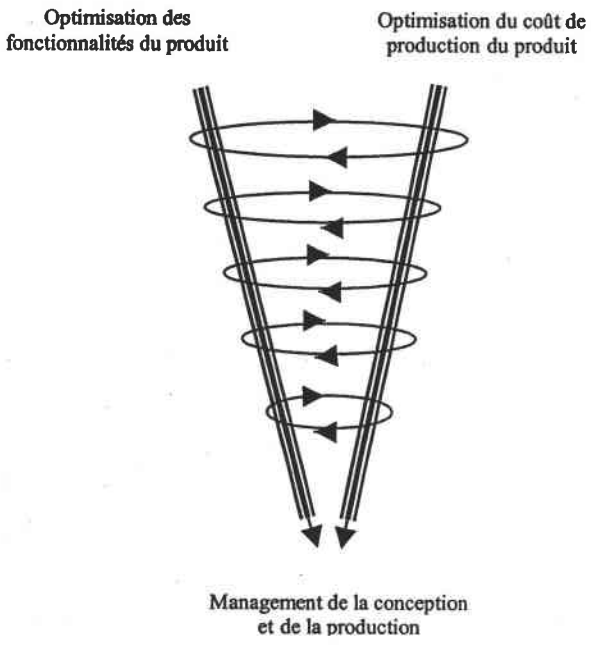


Figure 104. Interaction entre conception et coût de production [Noble et Tanchoco, 1990]

Dans ce qui suit, nous développons un modèle intégré permettant aux concepteurs, au fur et à mesure de l'avancement de leur projet, d'améliorer la définition du produit en défendant les objectifs de qualité tout en évaluant économiquement les choix décidés. Nous ferons appel au modèle développé précédemment pour déterminer les coûts de production minimal et maximal associés à une prise de décision de conception. Les grandes étapes du modèle intégré de décision sont les suivantes :

Etape 1 : Etablissement des alternatives de conception.

Après la phase conceptuelle et au cours des phases de conception préliminaire et détaillée, le concepteur affine progressivement la définition du produit. A chaque étape du processus de conception correspond un état du produit. Le $x^{ème}$ état du produit est noté par PD_x.

Etape 2 : Etablissement de l'intervalle Coût.

Le processus de production du produit évolue avec l'avancement de définition du produit. A chaque état du produit correspond un ensemble de processus de production alternatifs. Le $y^{ème}$ processus de production alternatif du $x^{ème}$ état du produit est noté par PP_{xy}.

Etape 3 : Détermination des coûts optimaux.

L'application du modèle d'estimation des coûts développé précédemment permet la sélection du processus de production optimal et de l'intervalle coût [$C_{PP\,xy,\,mini}$; $C_{PP\,xy,\,maxi}$].

Le diagramme schématique du modèle multi-étape de décision intégrée est montré par la figure 105. Dans ce diagramme, le processus de production PP_{xy} du produit évolue avec l'avancement de la définition du produit. Une alternative de conception est représentée par un retour arrière sur le diagramme. A chaque alternative PP_{xy}, on peut obtenir le coût correspondant. Ainsi, à chaque état du produit, on peut obtenir l'intervalle des coûts engagés des processus de production [$C_{PP\,x\,y,\,mini}$; $C_{PP\,x\,y,\,maxi}$].

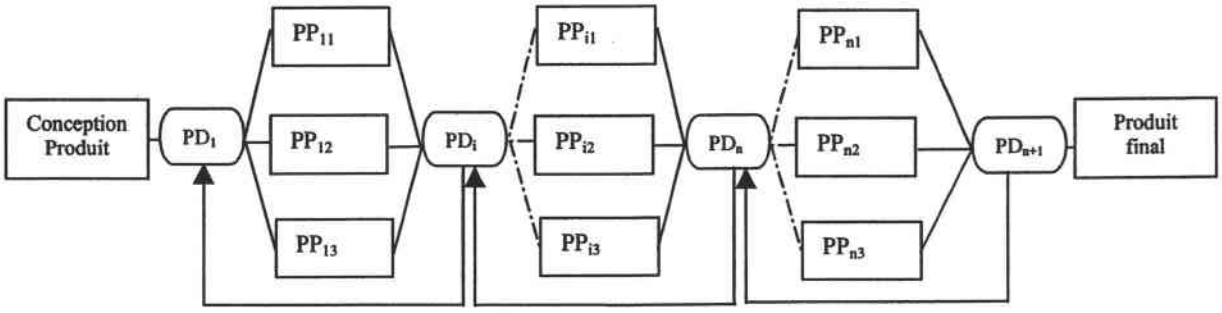


Figure 105. Le modèle multi-étape de décision intégrée

L'estimation des coûts engagés sur le cycle de vie n'ayant pas un caractère certain, il existe, à un instant donné, un ensemble de courbes de coûts à engager relatives aux processus de production alternatifs. Cet ensemble de courbes résulte de l'existence de degrés de liberté en matière de choix de conception du produit et des processus de production correspondants. En phase de conception, le rôle de l'estimation des coûts est alors d'analyser la variabilité induite par ces degrés de liberté.

Cette évolution des coûts engagés est décrite par la figure 106. Chaque étape correspond à une décision, et à chaque décision prise à la date θ, on peut déterminer le couple [$C_{PP\,x\,y,\,mini}$; $C_{PP\,x\,y,\,maxi}$]$_\theta$ ainsi que les deux courbes enveloppes, la courbe optimiste $(C_{PP\,x\,i\,y,\,mini})_\theta$ et la courbe pessimiste $(C_{PP\,x\,i\,y,\,maxi})_\theta$. La différence représente à la fois des marges de manœuvre sur les choix de conception mais aussi l'existence de risques ayant un impact économique.

Sur un plan pratique, il convient de comprendre les causes du caractère variable des coûts estimés en $t = \theta$ (intervalle de variabilité = [$(C_{PP\,x\,y,\,mini})_\theta$ - $(C_{PP\,x\,y,\,maxi})_\theta$]). En effet, il existe un certain nombre de causes différentes (choix et dimensions des entités de fabrication, leurs tolérances dimensionnelles et géométriques, leurs états de surfaces, l'ordonnancement des opérations de fabrication, le choix des machines) pouvant avoir un impact sur les coûts engagés. Lorsque ces différentes causes sont liées, c'est-à-dire que l'on observe des phénomènes de co-variation entre les différentes causes (par exemple, une tolérance

géométrique imposant un ordre particulier entre deux opérations), il n'est plus possible d'obtenir un coût par agrégation de coûts élémentaires. En effet, calculer un coût global en additionnant des coûts individuels suppose une absence de corrélation statistique entre les coûts individuels. Ces problèmes d'interdépendance entre variables de décision ont un impact sur le produit et les systèmes productifs. Sur le plan instrumental, la modélisation du problème d'estimation des coûts sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes permet la détermination des courbes d'enveloppe avec un traitement simultané des variables et des contraintes.

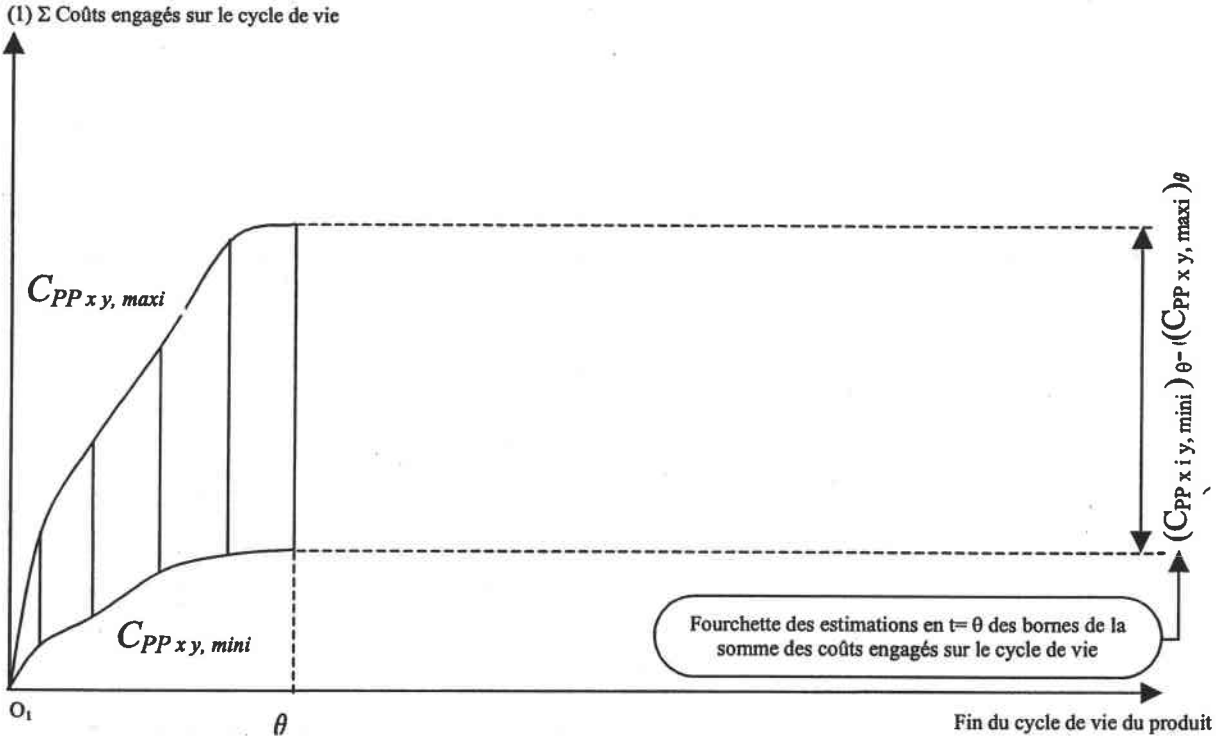


Figure 106. Evolution des bornes de coûts engagés du produit

L'objectif du processus de conception produit/process est de construire progressivement une réalité à venir. Cette temporalité est marquée par le découpage du processus en phases et étapes et se traduit par la convergence en fin du processus. Nous découpons le processus en trois phases : conception préliminaire, conception détaillée et devis. Au cours de chaque phase, le processus passe par des étapes successives.

4.5.1 En conception préliminaire

La figure 107 présente les deux courbes d'enveloppe au cours de la conception préliminaire. Le choix de chaque nouvelle entité de fabrication, à la date θ avec les informations dimensionnelles et topologiques le concernant, permet de déterminer les coûts $C_{PP\,x\,y,\,mini}$ et $C_{PP\,x\,y,\,maxi}$ cumulés.

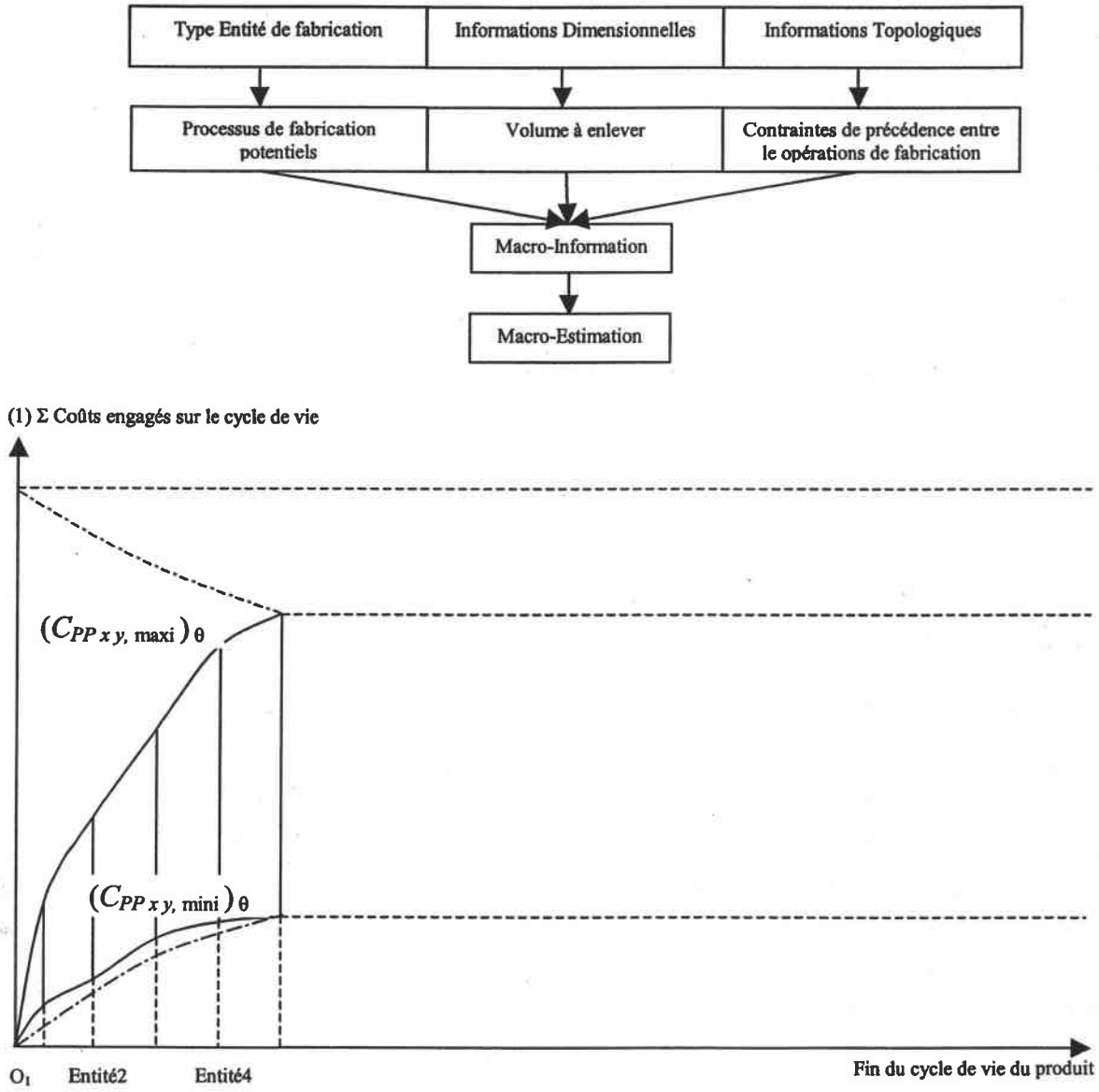


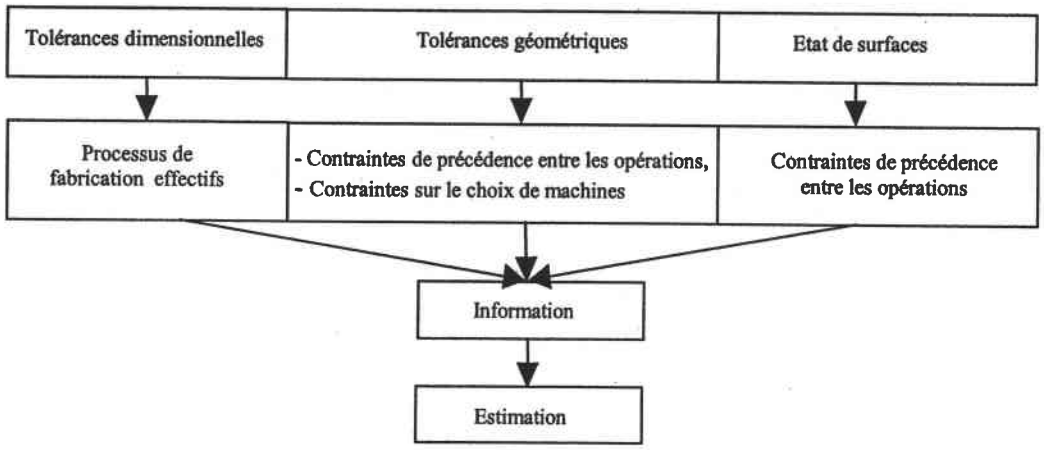
Figure 107. Evolution des bornes de coûts engagés au cours de la phase de conception préliminaire

A t=0 (repère 1), une estimation intuitive des coûts en fonction des formes géométriques du produit est exprimée. L'identification progressive des entités de fabrication et leur définition est accompagnée de la construction des deux courbes enveloppes $(C_{PPxy,mini})_\theta$ et $(C_{PPxy,maxi})_\theta$. La fin de cette phase est caractérisée par la connaissance de l'intervalle des coûts engagés.

4.5.2 En conception détaillée

Le repère 2 de la figure 108 présente les deux courbes d'enveloppe au cours de la conception détaillée. Le coût mini estimé à la fin de la conception préliminaire permet de réaliser un produit satisfaisant les exigences de cette phase. Des spécifications ajoutées en conception détaillée auront pour effet d'accroître ce coût mini. Au fur et au mesure de l'injection de ces attributs, transformés en contrainte de fabrication, l'intervalle de variabilité $[(C_{PP\ xy,\ mini})_\theta$ -

$(C_{PP\,xy,\,maxi})_\theta$] décroît durant cette phase. Les deux courbes d'enveloppe se situent à l'intérieur de la fourchette des estimations des bornes à la fin de la conception préliminaire.



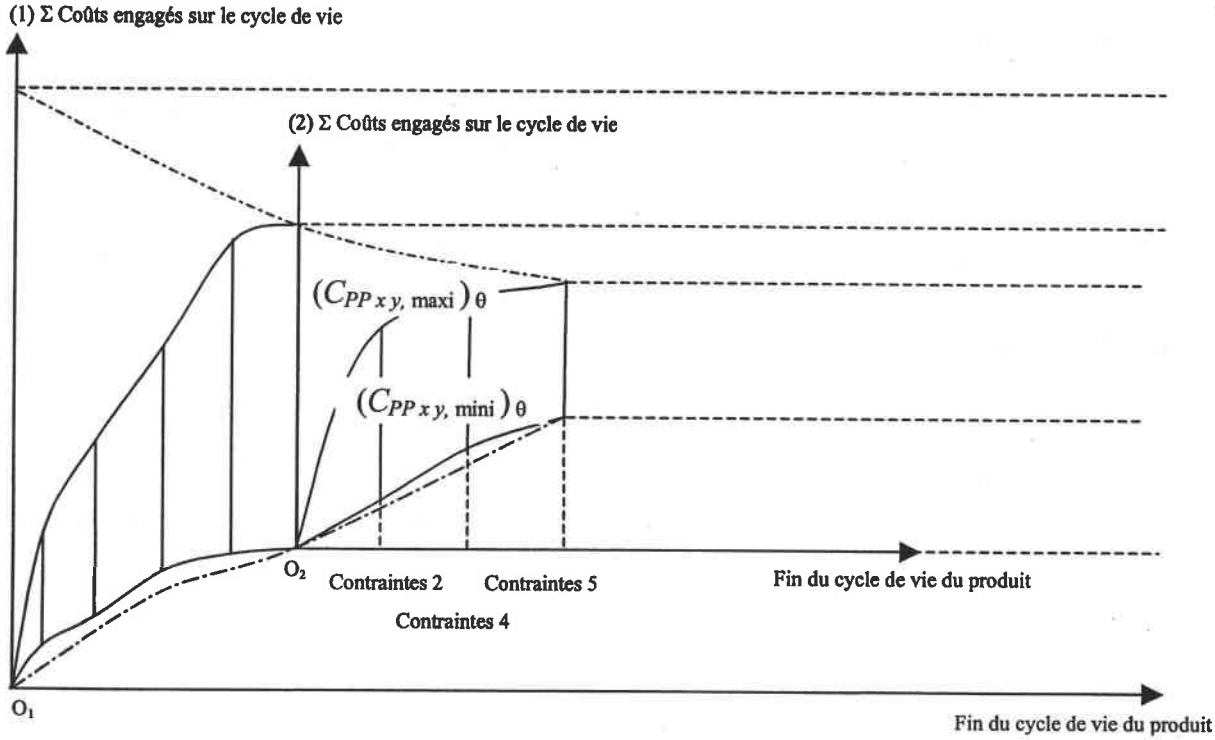


Figure 108. Evolution des bornes de coûts engagés au cours de la phase de conception détaillée

Chaque contrainte reflète une spécification bien déterminée de la conception détaillée. Ainsi, le concepteur peut évaluer le risque de coût engendré par l'introduction d'une nouvelle spécification. Pareillement, dans une démarche d'analyse de valeur, les contraintes de fabrication peuvent être classées par importance fonctionnelle.

4.5.3 En devis

Le repère 3 de la figure 109 présente les deux courbes d'enveloppe au cours de la détermination finale du processus de production. Cela correspond aussi à l'élaboration du

devis. La connaissance complète du produit et le choix plus précis de la machine pour chaque opération, permettent de déterminer progressivement et plus précisément l'intervalle $[(C_{PP\,xy,\,mini})_\theta - (C_{PP\,xy,\,maxi})_\theta]$. Les deux courbes d'enveloppe se situent à l'intérieur de la fourchette des estimations des bornes à la fin de la conception détaillée.

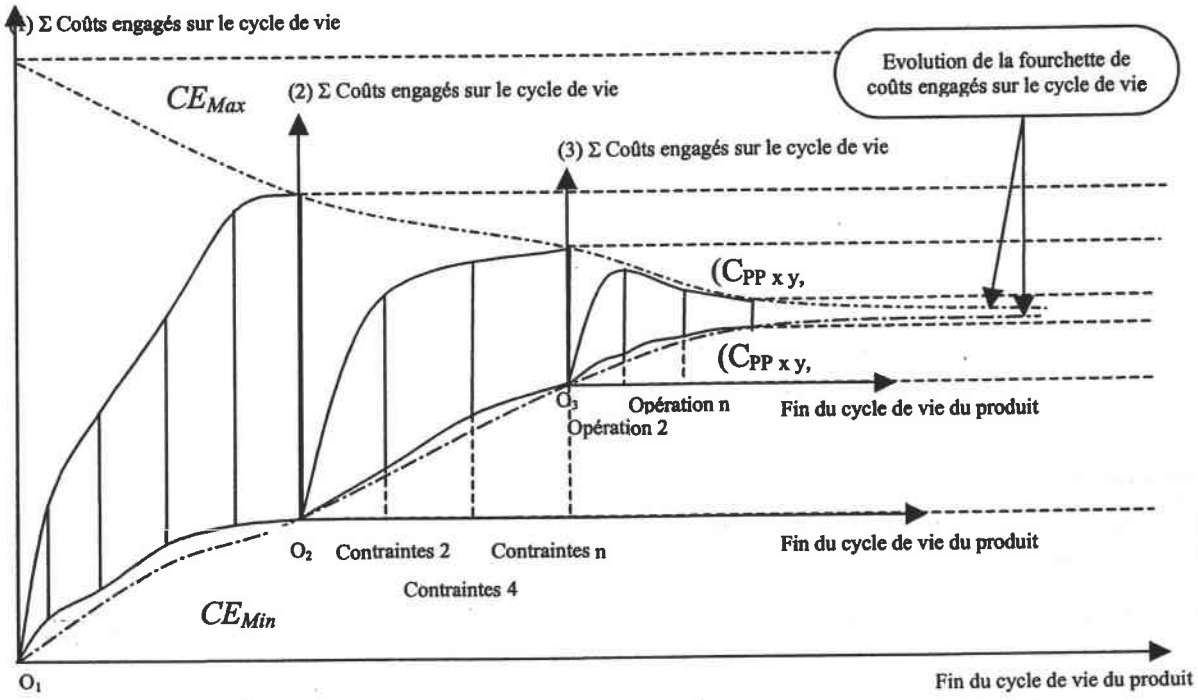


Figure 109. Evolution des bornes de coûts engagés au cours de la phase d'élaboration du devis

Ce travail de projection peut être effectué tout au long du développement du produit. Dès lors, on peut déterminer l'évolution de l'estimation des bornes CE_{Min} et CE_{Max} du cumul des coûts engagés. Cette fourchette converge nécessairement vers le constat (coûts dépensés) qui sera fait en fin de cycle de vie du produit à la date T.

4.6 Conclusion

Le raisonnement d'estimation des coûts de production d'un produit est décomposable en trois phase :

- l'identification des opérations de fabrication,
- l'exploration des processus de production,
- l'extension aux Entités Coût concourantes.

Pour modéliser ces raisonnements, nous avons choisi trois types de représentation :

- les règles « Si-Alors »,
- la modélisation par contraintes,
- la définition de fonctions inducteurs.

Les deux composants essentiels d'une règle sont ses prémisses et ses conclusions. Les prémisses servent à reconnaître ou à identifier l'état de l'entité de fabrication. On utilise les conclusions pour générer les opérations de fabrication correspondantes. A un produit composé d'un ensemble d'entités de fabrication, il lui correspondra un ensemble d'opérations de fabrication.

L'intérêt de cette première présentation est d'évaluer le coût intrinsèque de chaque entité de fabrication et de distinguer de manière suffisamment claire un ensemble de variables de production construits autour de l'identification des opérations de fabrication du produit.

Ces variables sont liées entre elles au travers de contraintes. Des raisonnements élémentaires constituent l'ensemble des contraintes : contraintes de coût, contraintes de fabrication, contraintes de production. Un problème de satisfaction de contraintes est ainsi construit et permet d'explorer les processus de production alternatifs et d'associer les coûts des opérations de fabrication, les coûts de préparation des machines et de manutention correspondant à chaque processus de production solution du problème.

L'intérêt de cette deuxième représentation (modélisation par contraintes) est qu'elle est capable de considérer des variables de valeurs totalement différentes : entière, réelle, floue. Les contraintes établies peuvent faire référence à des domaines discrets (on parle alors de contraintes discrètes), des domaines continus (on parle alors de contraintes continues), des domaines discrets et continus de façon contiguë (on parle alors de contraintes mixtes), ou bien par extension des domaines flous (on parle alors de contraintes flexibles). La modélisation par contraintes permet une extraordinaire hétérogénéité dans l'expression des contraintes et dans la saisie des variables.

Cependant modéliser ne suffit pas, il faut savoir résoudre un problème : c'est à dire déterminer des solutions cohérentes. Une des difficultés réside dans le fait que notre problème est généralement sous-contraint : nous disposons de plus de variables à évaluer que de contraintes. Du fait de cette propriété, le raisonnement conduit à un ensemble de solutions qui correspondent à des combinaisons de valeurs compatibles entre elles au regard de toutes les contraintes.

Pour résoudre le problème, nous avons choisi les techniques de résolution de problèmes par satisfaction de contraintes (CSP). Ces techniques combinatoires proposent deux phases. Tout d'abord, la phase de filtrage qui consiste à éliminer les valeurs des variables qui n'ont aucune chance d'intervenir dans une solution. Ensuite, la recherche des solutions, c'est à dire les combinaisons de valeurs cohérentes, est réalisée par un moteur spécialisé utilisant aussi les techniques de filtrage.

Le raisonnement d'estimation des coûts des processus de production alternatifs d'un produit est donc modélisé par des contraintes et les solutions déterminées par des techniques adaptées à cet effet. Pour satisfaire au mode de raisonnement, nous avons proposé l'expression essentiellement de trois types de contraintes :

- La contrainte de coût, elle porte sur le contrôle du coût des processus de production solution en condamnant celui dépassant un coût maximal admissible fixés dès le départ. Pour ceux acceptés, elle affecte un degré de satisfaction.
- Les contraintes de fabrication, elles portent sur le respect des relations géométriques et topologiques entre les entités de fabrication. De ce fait, elles imposent des précédences et des regroupement en phases entre les opérations des entités. Ce type de contraintes est lié directement aux coûts de préparation des machines et de manutention.
- Les contraintes de production, elles portent sur la prise en compte du facteur de disponibilité des machines lors de l'estimation de coûts.

La formalisation du raisonnement d'estimation des coûts des processus de production alternatifs d'un produit donne lieu à une démarche. Cette démarche consiste à élargir l'estimation de coûts aux Entités Coût concourantes (telles que « programmation MOCN » ou « maintenance ») à partir de l'identification des valeurs des variables, c'est à dire à partir d'un processus de production solution. A chaque Entité Coût concourante considérée, nous avons défini une fonction inducteur I en fonction des variables du problème. Tout processus de production solution génère les valeurs inducteurs des différentes Entités Coût concourantes. La connaissance des différents coûts de production a permis de déterminer le coût total unitaire du produit et de cerner le coût extrinsèque d'une entité de fabrication.

Le modèle obtenu semble pouvoir se prêter à une démarche intégrée d'estimation des coûts. Ainsi, nous avons proposé, en fin du chapitre, une méthodologie de décision intégrée pour l'estimation des coûts en conception préliminaire, conception détaillée et en devis.

Dans le chapitre suivant, nous présentons la maquette logicielle développée sous CostAdvantage et Con'flex. Nous définissons d'abord une pièce mécanique et un atelier pour sa fabrication. Puis, nous spécifions le problème à résoudre afin de valider les concepts et les techniques qui ont été abordés dans les deux chapitres précédents (3 et 4).

Chapitre

5

Maquette de validation : Application à la pièce Termoz

5.1 Introduction

Après avoir présenté dans les deux chapitres précédents les notions d'Entité Coût et de Costgrammes ainsi que leur utilisation dans l'estimation des coûts, nous exposons à présent l'intérêt, d'un point de vue pratique, de notre méthode à travers une pièce appelée Termoz. Face à cet objectif, il est important d'identifier clairement les différentes étapes de la démarche (figure 110) et les composants logiciels utilisés :

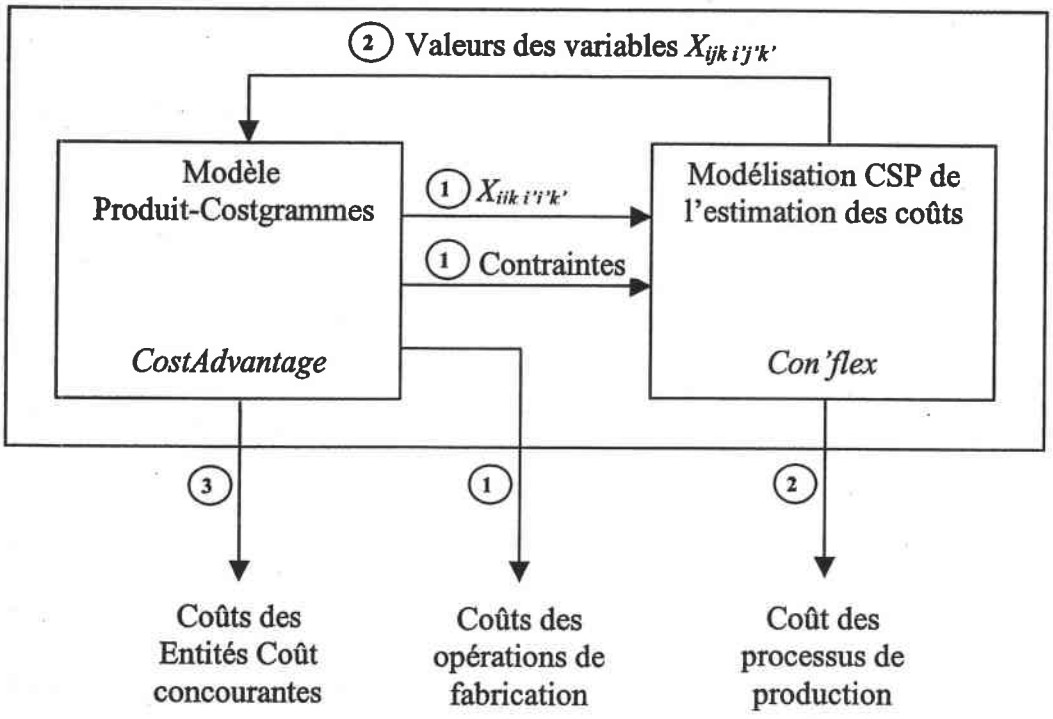


Figure 110. Etapes et composants de la maquette logicielle

- la première étape consiste à générer automatiquement le processus de fabrication de chaque entité de fabrication identifiée dans la pièce. Toute opération dans le processus encapsule l'expertise d'estimation de coût associée en fonction des caractéristiques géométriques de l'entité de fabrication en question et de la machine capable. Ainsi, le coût de l'option k (machine) de l'opération j générée par l'entité de fabrication i est connu : EC_{ijk}.

  Nous avons vu que le générateur de systèmes experts orienté objet CostAdvantage a été employé à cet effet. Les mécanismes d'analyse et d'expertise liés à la fabrication de chaque entité ont été transcrits sous forme de règles. Chaque opération est un *contexte* (objet) ayant comme *caractéristiques* (champs) les machines capables et la formule d'estimation de coût. La notion d'héritage du logiciel permet une représentation naturelle et hiérarchique du Modèle Produit en : (Système mécanique) – Pièce – Entités de fabrication – Opérations de fabrication.

  Cet outil a été adopté aussi pour l'activation des contraintes de fabrication et de production à respecter pour tout processus de production solution. Des règles d'analyse des relations géométriques et topologiques entre les entités de fabrication permettent d'activer les contraintes de fabrication. Le choix dans le Modèle Produit de l'option « planifiée » active les contraintes de production relatives à l'indisponibilité de certaines machines.

- la deuxième étape porte sur la génération du coût des processus de production alternatifs de la pièce Termoz dans l'atelier à disposition. A ce stade, les coûts de préparation des machines et de manutention sont pris en compte. Le problème consiste à chercher les processus solutions respectant toutes les contraintes activées précédemment et de les classer par ordre de satisfaction économique.

  L'environnement de satisfaction de contraintes Con'flex a été employé à cet effet. Trois types de données sont nécessaires à la résolution :

  - La connaissance des coûts $EC^{pr}_{ijk\ i'j'k'}$ et $EC^{m}_{ijk\ i'j'k'}$ relatifs respectivement aux coûts de préparation machine et de manutention si l'option *k'* de l'opération *j'* générée par l'entité de fabrication *i'* suit l'option *k* de l'opération *j* générée par l'entité *i*, ainsi que la connaissance du coût de fabrication relatif à chaque opération $EC^{f}_{i\,j\,k}$. Ces différents types de coûts sont introduits dans le système sous leur forme numérique (valeurs réelles en Euros).
  - Les variables booléennes $X_{ijk\ i'j'k'}$ relatives à la sélection des opérations (*ijk*) dans un processus solution. Chaque variable de ce type prendra la valeur 1 si elle est sélectionnée, 0 sinon. La deuxième variable déclarée, U_{ijk}, est de type entière et correspond au rang de chaque opération (*ijk*). La dernière variable est le coût du processus de production solution *Cpp* (variable réelle en Euros).
  - Enfin, le dernier type de données est la déclaration des contraintes. La contrainte flexible de coût est introduite à ce niveau. Le reste (contraintes de fabrication et de production) est issu de l'analyse précédente sous CostAdvantage.

L'outil informatique développé permettra d'associer à une pièce mécanique, en l'occurrence la pièce Termoz, le coût des différents processus de production réalisables dans l'atelier à disposition. L'intervalle [Cpp_{min} , Cpp_{max}] sera identifié.

Un des buts de nos travaux est de fournir aux estimateurs de coût un outil d'aide basé sur la mise en œuvre des concepts exposés aux chapitres 3 et 4, leur permettant de :

- s'affranchir des tâches routinières,
- vérifier la cohérence de leurs choix,
- prendre en compte simultanément un ensemble de contraintes d'ingénierie.

Conscients de l'impossibilité et du manque d'intérêt d'une automatisation totale de l'estimation des coûts, nous avons orienté nos travaux vers l'aide à la décision. Le principe de la maquette logicielle proposée est de permettre aux concepteurs d'évaluer économiquement leurs choix de conception, aux deviseurs de négocier quasiment en ligne avec les clients sur la base d'un ensemble de coûts possibles relatifs aux processus de production solutions et en

fonction de la qualité du produit, et au gammiste d'élaborer la gamme de fabrication finale en prenant en compte l'aspect économique.

Dans ce chapitre, nous commençons par spécifier le problème à résoudre afin de valider les concepts et les techniques qui ont été abordés dans les deux chapitres précédents. Nous définissons la pièce Termoz et présentons un atelier potentiel pour sa production. Nous présentons ensuite, la conception du Modèle Produit-Costgrammes support de l'estimation des coûts dans une entreprise. Au travers de cet exemple, nous déterminons les coûts de production de la pièce Termoz, ainsi que ceux des Entités coût concourantes. Nous analysons enfin les résultats et nous en tirons un certain nombre de perspectives et conclusions.

5.2 Spécification du problème à résoudre

5.2.1 La pièce Termoz

La pièce pour laquelle nous allons chercher à estimer les coûts de production à l'aide de notre méthode est appelée pièce Termoz (figure 111). Elle a servi à la validation des travaux de Derras, [1998] concernant la génération de gamme de fabrication. La définition complète de Termoz est présentée en figure 112.

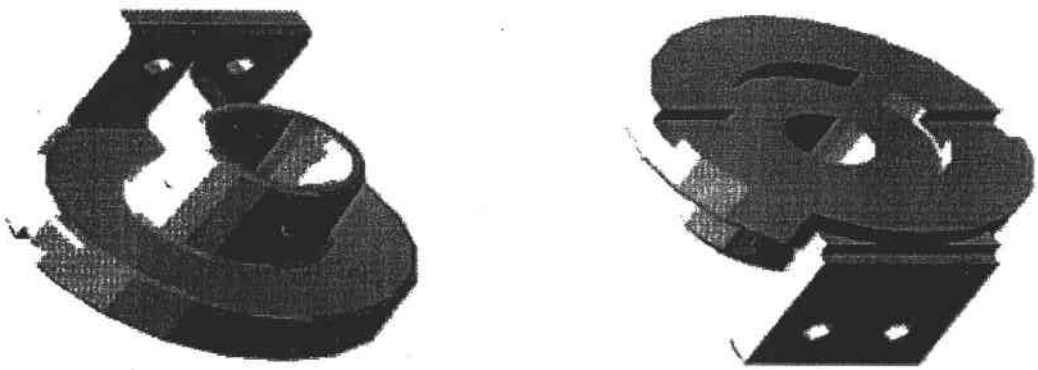


Figure 111. La pièce Termoz

Cette pièce est intéressante dans la mesure où elle permet, de manière didactique, de mettre en évidence les problèmes d'estimation des coûts évoqués précédemment. Elle est modélisable sous la forme d'entités de fabrication (d'usinage) et de relations géométriques et topologiques entre ces entités.

Ces trois éléments de représentation d'une pièce mécanique forment le Modèle Produit et constituent des informations d'entrée relativement à la méthode d'estimation des coûts.

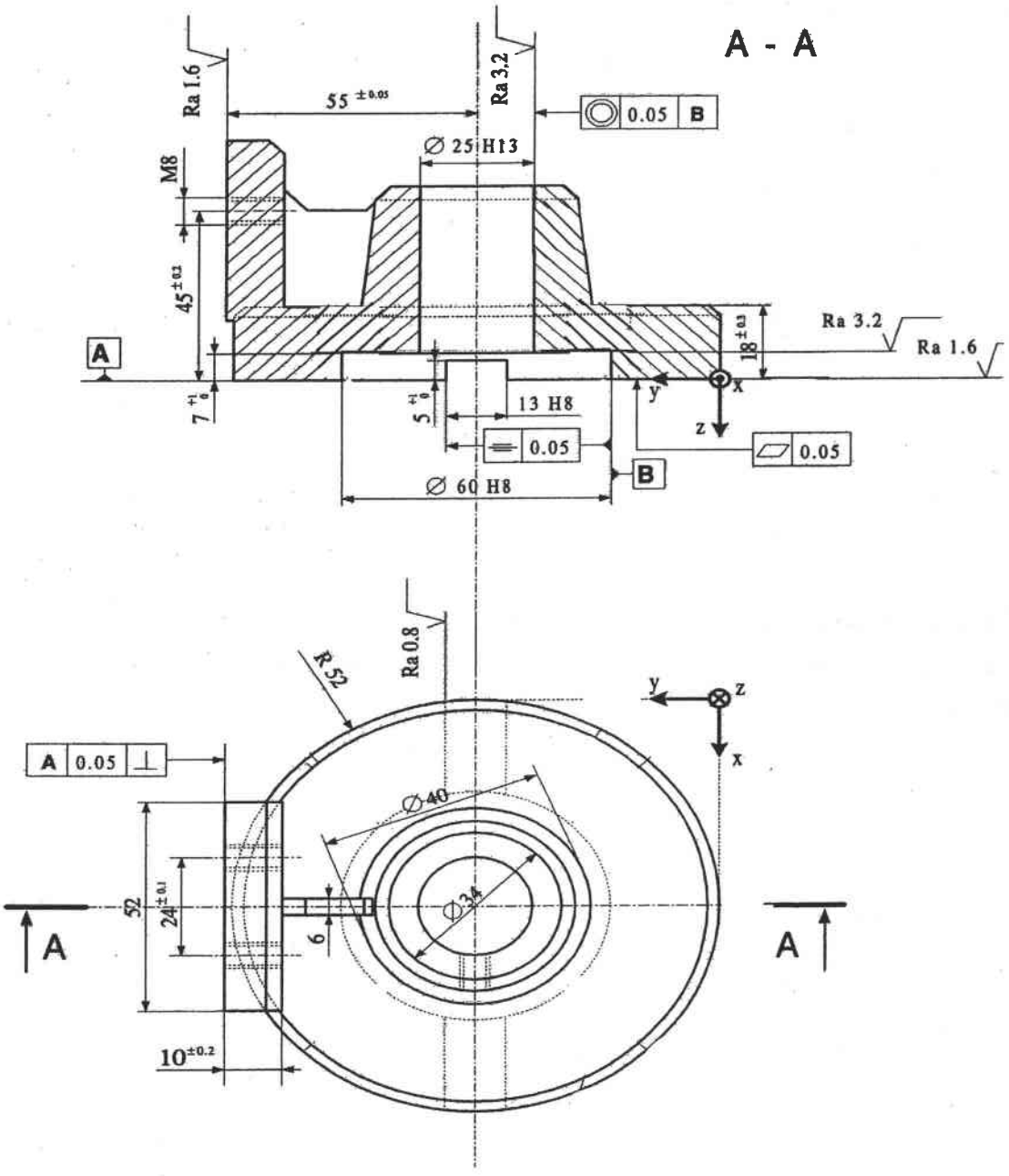


Figure 112. Dessin de définition de la pièce Termoz

Nous pouvons, à travers l'analyse du dessin de définition de la pièce Termoz, établir les entités de fabrication la constituant (Tableau 7, figure 113).

Nom	Type	Informations géométriques nominales	Informations micro-géométriques	Informations topologiques
F1	Surface_circulaire	Ø 104 (X × Y)	Planéité 0.05 Ra 1.6	Supporte A2 et R
F2	Surface_rectangulaire	52 (X) × 42 (Z)	Ra 1.6	Supporte TT
A1	Trou_alésé	Ø 25 (X × Y)	H13 / Ra 3.2, état brut ébauché	Débouche dans A2
A2	Trou_alésé	Ø 60 (X × Y) fond plan (Z)	H8 / Ra 6.3 Ra 3.2 Tolérance : 0,+1 Etat brut ébauché	Commence sur F1
R	Rainure	largeur 13 (Y) profondeur 5 (Z)	H8 / Ra 0.8 Tolérance : 0,+1	Commence sur F1, débouche dans A2
TT (×2)	Trou_taraudé	Ø 8 (X× Z) Entraxe 24	M8 Tolérance : ± 0.1	Commence sur F2

Tableau 7. Informations relatives aux entités de fabrication de la pièce Termoz

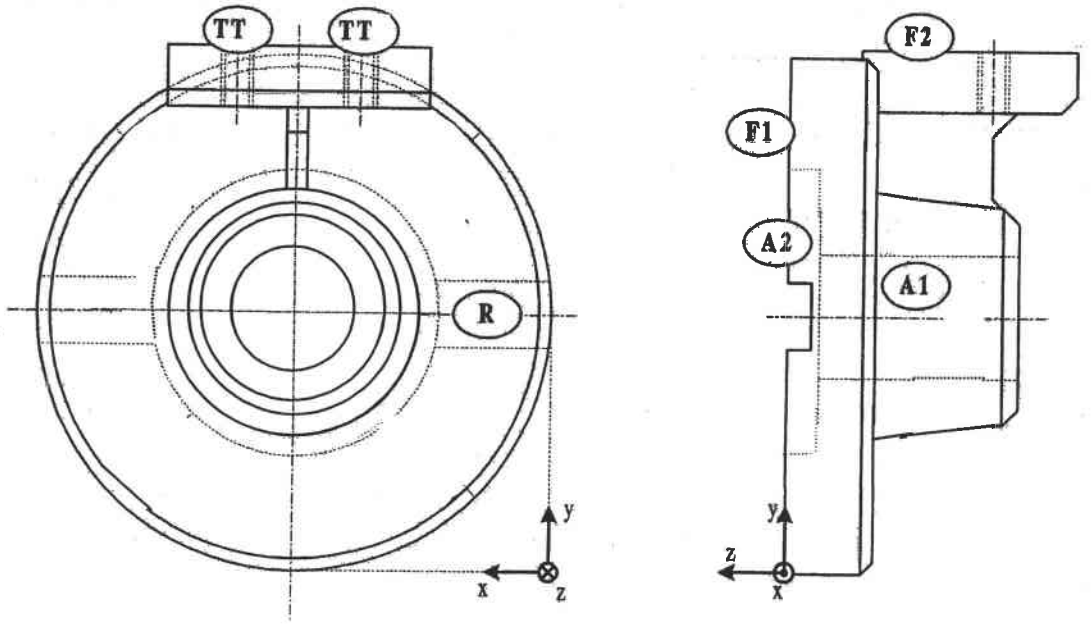


Figure 113. Entités de fabrication de la pièce Termoz

D'autre part, l'analyse du dessin de définition de la pièce Termoz permet d'établir la définition des relations géométriques entre les entités de fabrication (Tableau 8).

Nature	Entité 1	Entité 2	Nom	Valeur
Perpendicularité	F1	F2 référence	$R^{\perp}_{(F2,F1)}$	0.05
Coaxialité	A1	A2 référence	$R^{\Theta}_{(A1, A2)}$	0.05
Symétrie	R	A2 référence	$R^{\equiv}_{(R,A2)}$	0.05
Distance	R	F2	$R_{D(R,F2)}$	55±0.05
Distance	TT	F1	$R_{D(TT,F1)}$	45±0.2

Tableau 8. Les informations relatives aux relations géométriques entre les entités de fabrication

5.2.2 L'atelier de production

Le deuxième type d'informations d'entrée, relativement à notre méthode d'estimation de coûts, concerne les Entités Coût présentes dans l'atelier à disposition pour la production de la pièce.

Nous supposons que nous disposons potentiellement, en terme de machines, d'un centre d'usinage fraisage 4 axes (figure 114.a), d'un autre centre d'usinage fraisage à 3 axes (figure 114.b), d'un centre de tournage à 3 axes (figure 115), ainsi que d'un autre à 2 axes (figure 116). Chaque opération de fabrication réalisée sur l'un de ces quatre centres représente une Entité Coût élémentaire (EC^f) et chaque centre une Entité Coût mère.

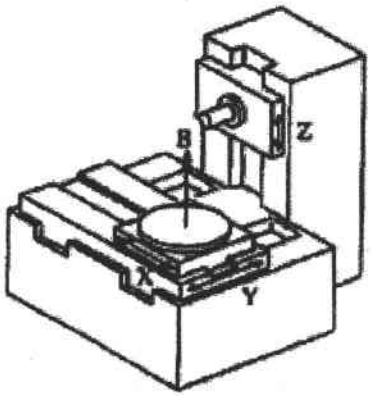


Figure 114a Le centre d'usinage 4 axes (Cu4x)

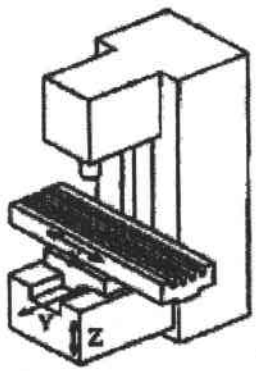


Figure 114b. Le centre d'usinage 3 axes (Cu3x)

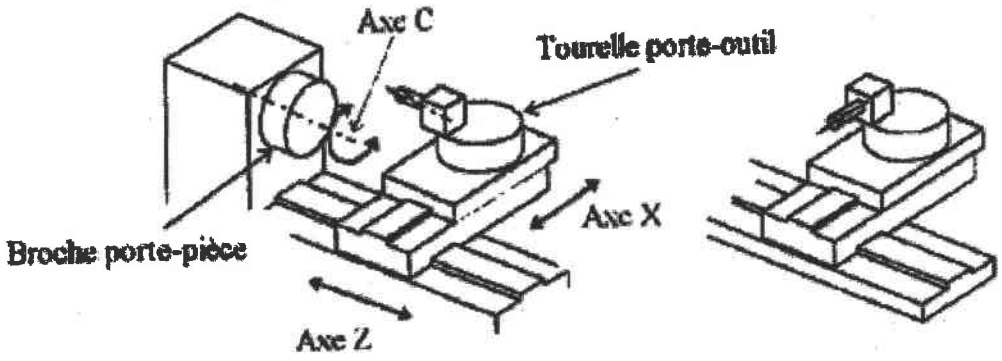


Figure 115. Le centre de tournage 3 axes (Ct3x)

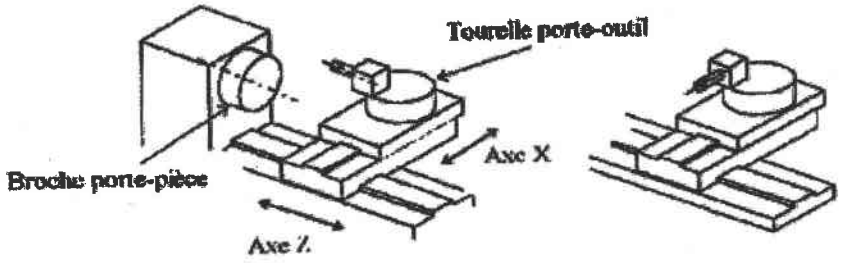


Figure 116. Le centre de tournage 2 axes (Ct)

Le coût de préparation de machine correspond au temps total d'arrêt de sa production, c'est-à-dire à l'intervalle écoulé entre la fabrication de la dernière pièce d'une série et la fabrication de la première pièce de la série suivante (figure 117). Cet intervalle est nécessaire à l'opérateur afin d'adapter son environnement (montage du dispositif du serrage, calibrage des paramètres usinage, etc.) à une nouvelle pièce. Nous associons à cette activité une Entité Coût (EC^{pr}), et nous supposons qu'elle est constante en fonction de chaque type de machine (Tableau 9).

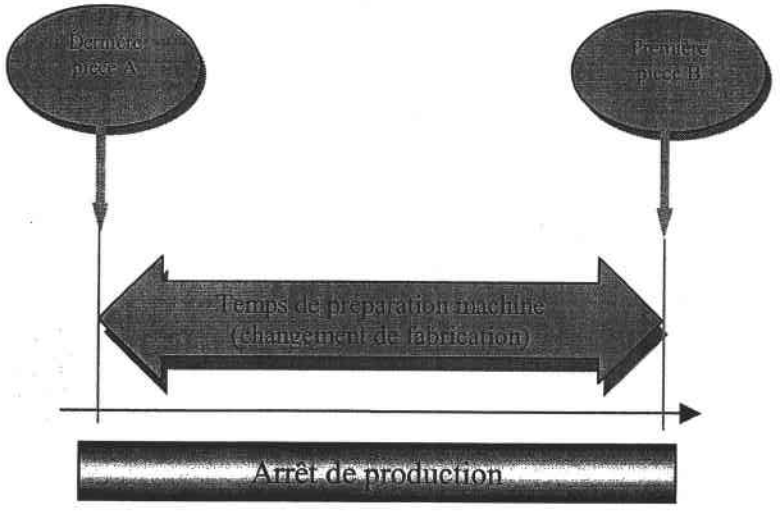


Figure 117. Temps de préparation machine

Machine	Coût de préparation en Euro[12]
Cu4x	7
Cu3x	6.3
Ct3x	5.5
Ct	3.8

Tableau 9. Coûts de préparation machine

En termes de manutention, nous supposons que nous disposons potentiellement d'un chariot électrique à trois roues à fourche avec un conducteur (figure 118) et de containers de stockage. L'ensemble (chariot, conducteur) représente une Entité Coût homogène : l'Entité Coût manutention (EC^m). Si nous voulons réduire sa consommation, il faut que le chariot soit utilisé au mieux pour le transport sur de très courtes distances.

S'il parcourt de longues distances, le nombre de voyages qu'il peut effectuer diminue et les durées augmentent d'autant plus que sa vitesse est faible, donc le coût de manutention augmente. Nous insistons sur ce point, car, bien souvent, lorsqu'un atelier s'agrandit, les trajets des chariots sont mal étudiés et le coût de manutention augmente. Il convient donc d'analyser comment les chariots peuvent effectuer un trajet à coût minimal. L'agencement des machines ainsi que les coûts de manutention correspondants sont donnés dans la figure 119 et le tableau 10.



Figure 118. Chariot électrique à trois roues à fourche avec un conducteur

[12] Valeurs indicatives

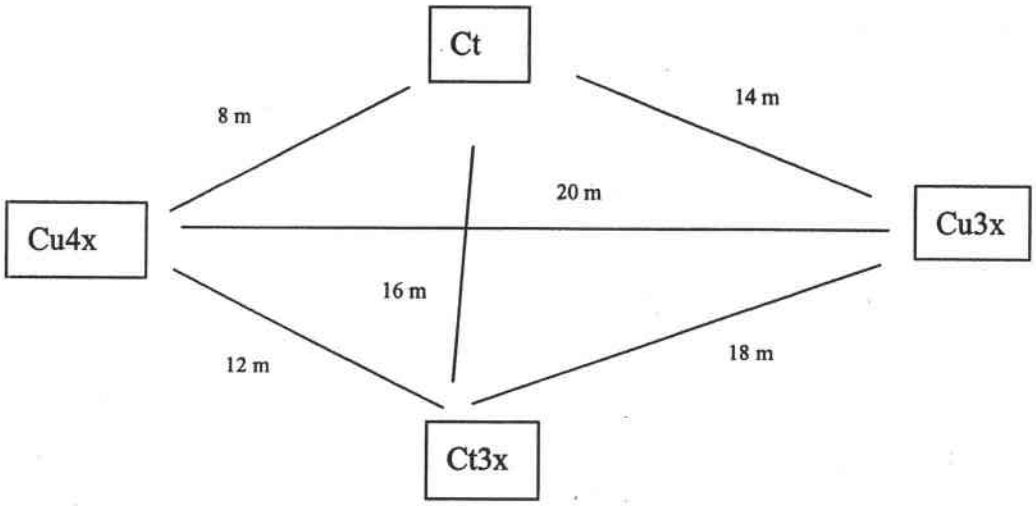


Figure 119. L'agencement des machines dans l'atelier

	Cu4x	Cu3x	Ct3x	Ct
Cu4x	0	1,2	0,4	0,2
Cu3x	1,2	0	0,6	0,4
Ct3x	0,4	0,6	0	0,6
Ct	0,2	0,4	0,6	0

Tableau 10. Coûts de manutention entre machines

Le choix de disposer de ces types de machines et de manutention nous permet de balayer un grand nombre de scénarios utilisés fréquemment dans les ateliers de production mécanique.

5.3 Conception du Modèle Produit – Costgrammes

La maquette logicielle développée sous CostAdvantage a été entreprise afin de concevoir le Modèle Produit-Costgrammes, nécessaire ensuite à l'estimation des coûts d'une pièce mécanique.

Pour des raisons de simplicité, nous ne présentons que très succinctement l'expertise de fabrication en terme de contenu. En effet, notre objectif n'est pas ici de prétendre à l'exhaustivité de l'expertise de ce domaine. Il est plutôt de montrer un (ou des) exemple(s) de critères ainsi qu'une ou plusieurs règles les manipulant et de montrer leur utilisation à des fins d'estimation des coûts.

Le Modèle Produit

Le Modèle Produit de support (figure 120) comporte toutes les entités de fabrication maîtrisées dans l'entreprise. A chaque *contexte* entité est associé l'ensemble des opérations types potentielles sous forme de *sous-contextes* et une base de règles permettant de générer son processus de fabrication effectif en fonction de ses caractéristiques géométriques. Une entité de fabrication identifiée dans un produit particulier est une instance du contexte.

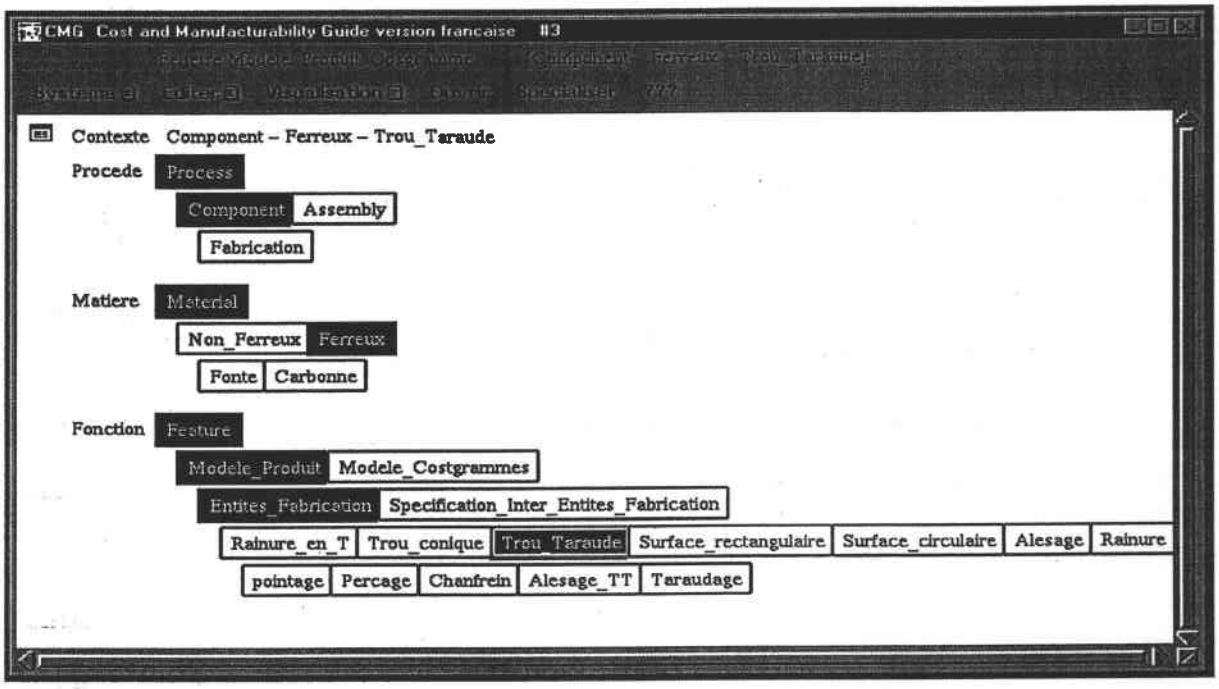


Figure 120. Le Modèle Produit de support

La figure 121 présente un exemple de règle générant l'ensemble des opérations nécessaires à la réalisation de l'entité de fabrication « Trou_Taraudé » en fonction de ses caractéristiques géométriques. L'indice «j » de chaque opération de fabrication s'effectue à ce niveau.

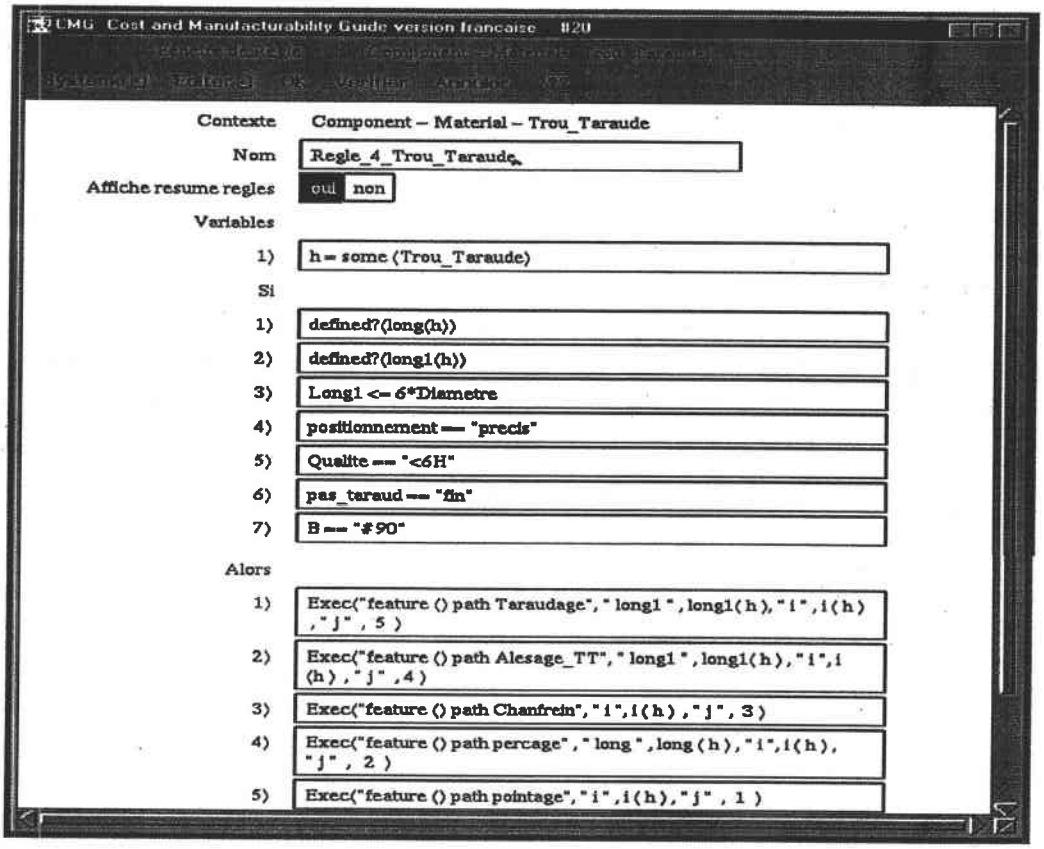


Figure 121. Exemple de règle de génération de processus de fabrication d'une entité de fabrication

Ensuite, au niveau de chaque opération *sous-contexte*, nous affectons l'ensemble des machines capables et une base de règles relatives à l'estimation du coût de l'opération. La figure 122 présente l'affectation des machines Cu4x, Cu3x et du centre de tournage 3 axes à l'opération « Alesage_TT ».

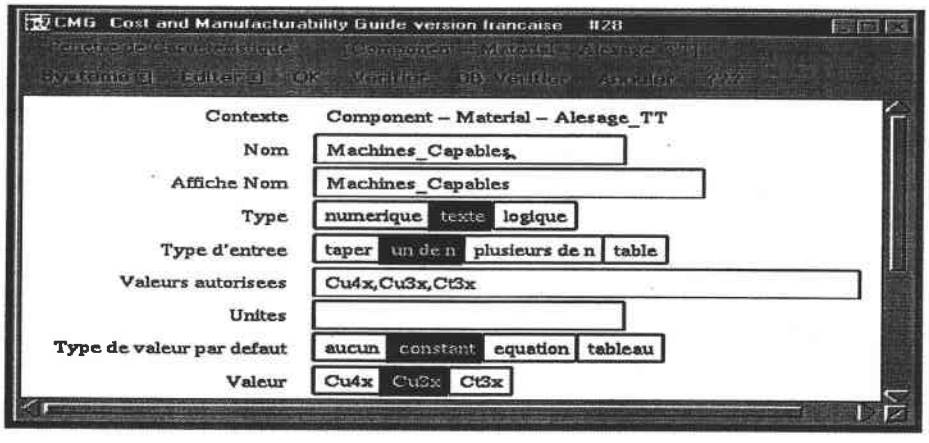


Figure 122. Affectation des machines capables à une opération de fabrication

Le coût de chaque opération est dépendant de la machine employée. L'affection d'une machine bien déterminée à une opération forme l'Entité Coût « opération de fabrication » EC_{ijk}. La règle, permettant d'estimer le coût de l'opération « Alesage_TT », si elle est réalisée

sur le centre de tournage 3 axes, est donnée par la figure 123. VE correspond au volume (surface) à enlever. Cette valeur est déduite directement des dimensions de l'entité de fabrication instance[13]. Les coefficients de consommation et le taux d'imputation de chacune des ressources présentes au niveau de l'Entité Coût (dans ce cas : main d'œuvre, lubrification, machine Ct3x et outil) sont des constantes qui peuvent être mises à jour périodiquement.

L'indice « k » de chaque opération de fabrication s'effectue à ce niveau. Dans cet exemple (figure 123), il égal à 3 (car correspondant à l'option 3). Pour les deux premières machines alternatives, k est égal respectivement à 1 et 2 (indice de l'option).

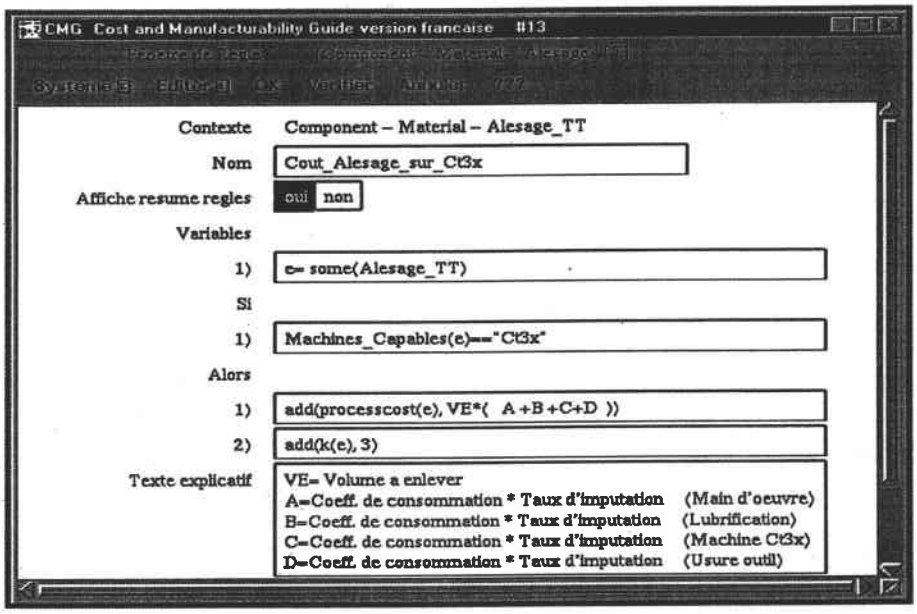


Figure 123. Règle d'estimation de l'Entité Coût élémentaire « Opération de fabrication »

A ce stade, l'application des étapes, présentées ci-dessus à toutes les entités de fabrication réalisables dans l'entreprise, permet de construire le Modèle Produit support. L'exploitation de ce Modèle Produit permet d'identifier et de générer automatiquement toutes les Entités Coût EC^{f}_{ijk} présentes dans une pièce particulière.

Rappel : *EC^{f}_{ijk} : Coût de l'opération de fabrication j réalisée sur la machine k et générée par l'entité de fabrication de valeur i choisie par l'utilisateur.*

[13] Pour le cas de l'opération « Alesage_TT », VE est une surface : VE = Diamètre * π * long1.

Dans la figure 124, suite à la spécification de l'entité de fabrication « Trou_Taraudé » par l'estimateur sous la fenêtre #87, le système a généré automatiquement, sous le fenêtre #83, le processus de fabrication correspondant et le coût de chaque opération sur la machine par défaut. En double cliquant sur l'opération « Alesage_TT », nous obtenons les fenêtres #92, précisant le coût de l'opération sur une machine alternative et les valeurs « i, j, k » correspondant de EC^{f}_{ijk}.

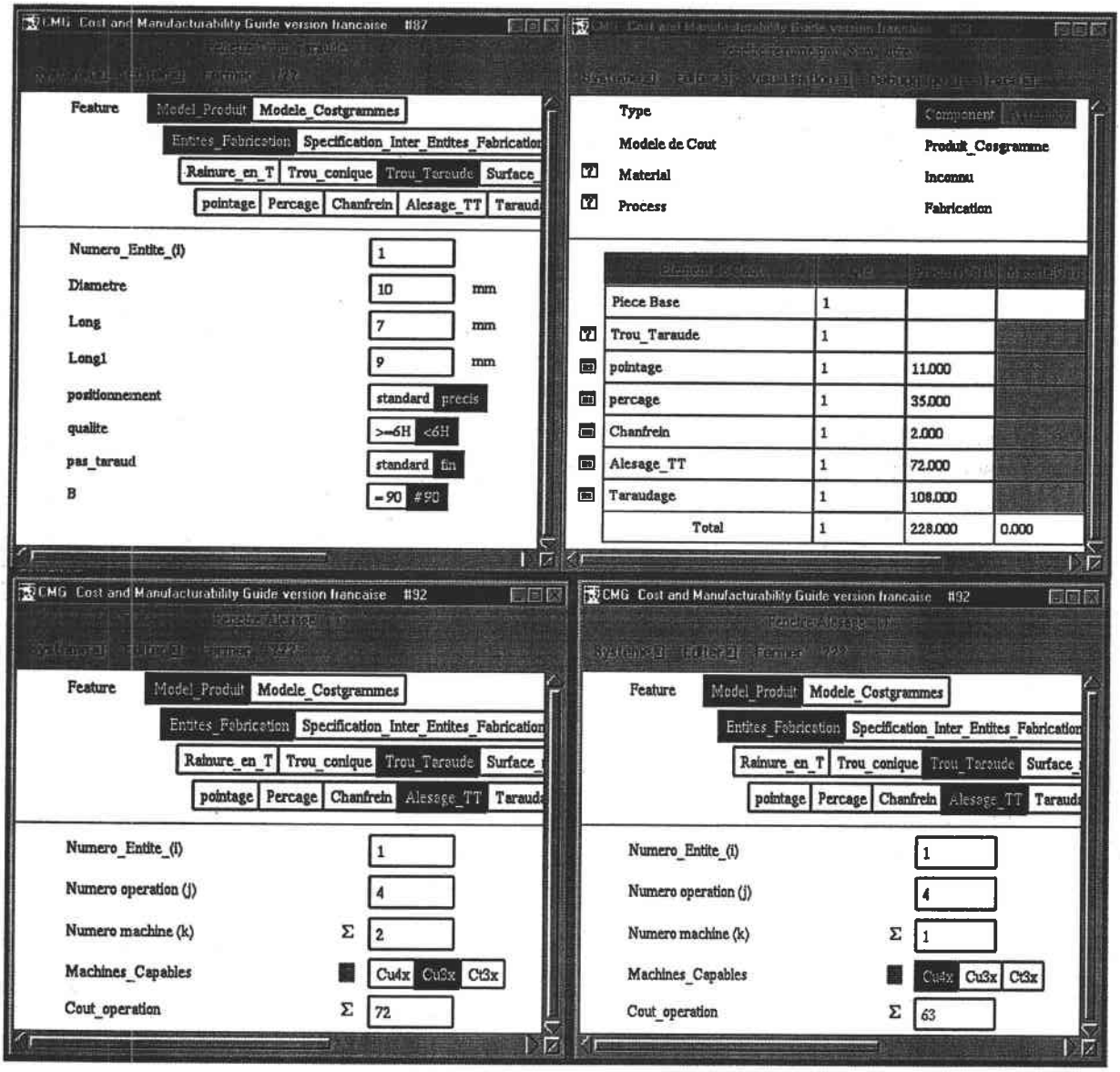


Figure 124. Génération du processus de fabrication de l'entité « Trou_Traudé »

L'activation des contraintes de fabrication

Nous avons associé une base de règles à chaque type de spécifications géométriques et topologiques. Ainsi, après la définition des entités de fabrication présentes dans la pièce, l'utilisateur précise le type de relations existantes entre certaines d'entre elles. Suivant les

caractéristiques des deux entités de fabrication concernées, le système alerte l'utilisateur d'une condition de précédence entre certaines de leurs opérations. Dans la figure 125, la relation topologique « commence sur » entre le «Trou_Taraude » et la «Surface_rectangulaire » a impliqué la condition de précédence entre l'opération surfaçage finition (X_{22k}) et les opérations d'alésage et de taraudage (X_{14k}, X_{14k}) indépendamment de leurs machines de réalisation k. Ce qui se traduit par : $U_{22k} < U_{14k}$ et $U_{22k} < U_{15k}$.

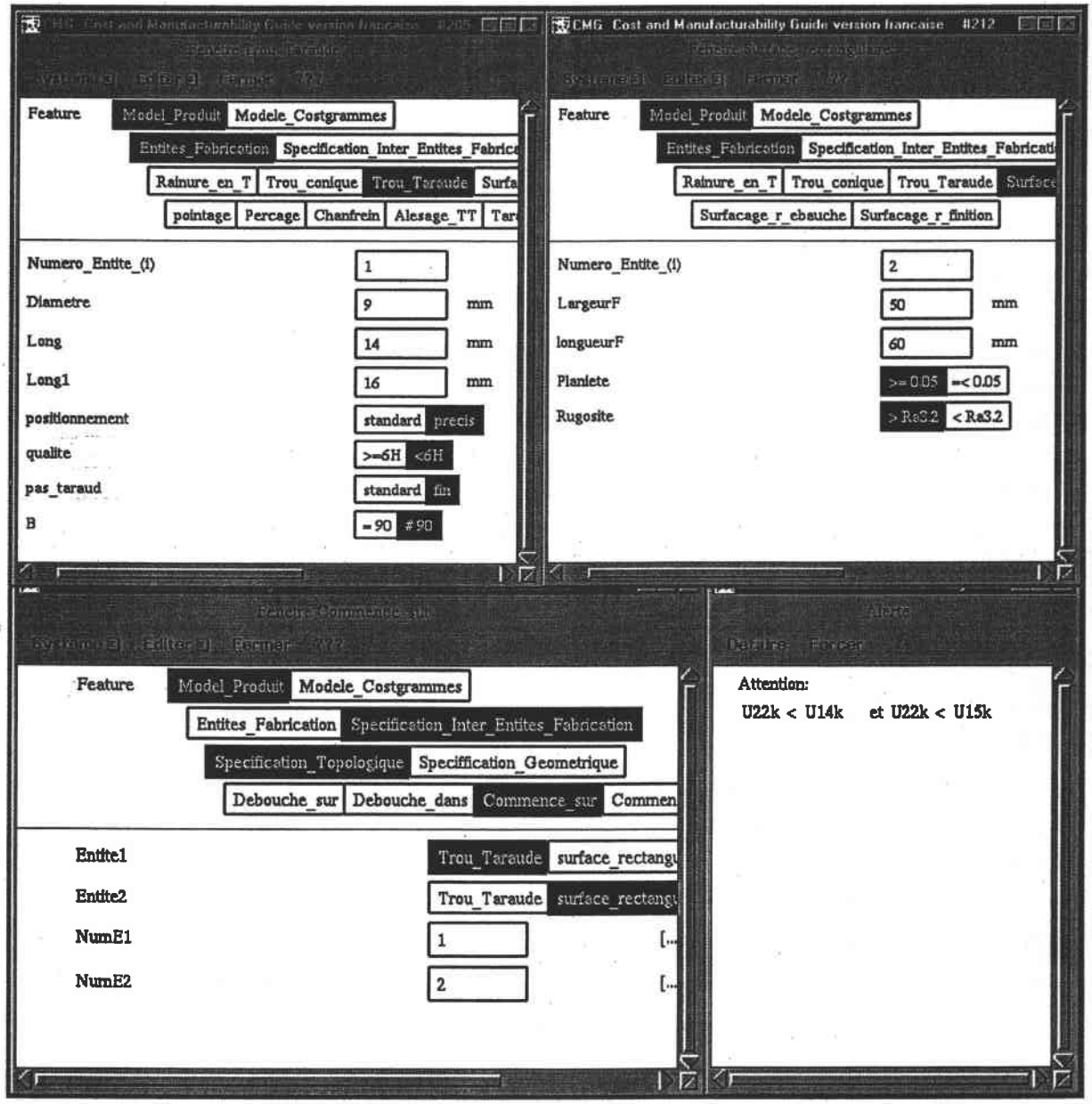


Figure 125. Exemple d'activation des contraintes de fabrication

L'activation des contraintes de production

Nous considérons la fabrication planifiée comme une option de l'estimation des coûts. L'utilisateur évaluera l'utilité de prendre en considération la disponibilité des machines. Pour

ceci, nous ajoutons au Modèle Produit de support développé ci-dessus, le *sous-contexte* « Planifié » au niveau du *Procédé (Process)* et un ensemble de règles portant sur opération de fabrication. Ainsi, pour une sélection d'une (des) machine(s) indisponible(s), le système alerte l'utilisateur sur les opérations impossibles. Dans la figure 126, l'indisponibilité de la machine Cu3x annule les opérations X_{111} et X_{121} concernant la fabrication de l'entité de fabrication « Surface_rectangulaire », ce qui revient à annuler toutes les variables : $X_{111i'j'k'}$ et $X_{121i'j'k'}$.

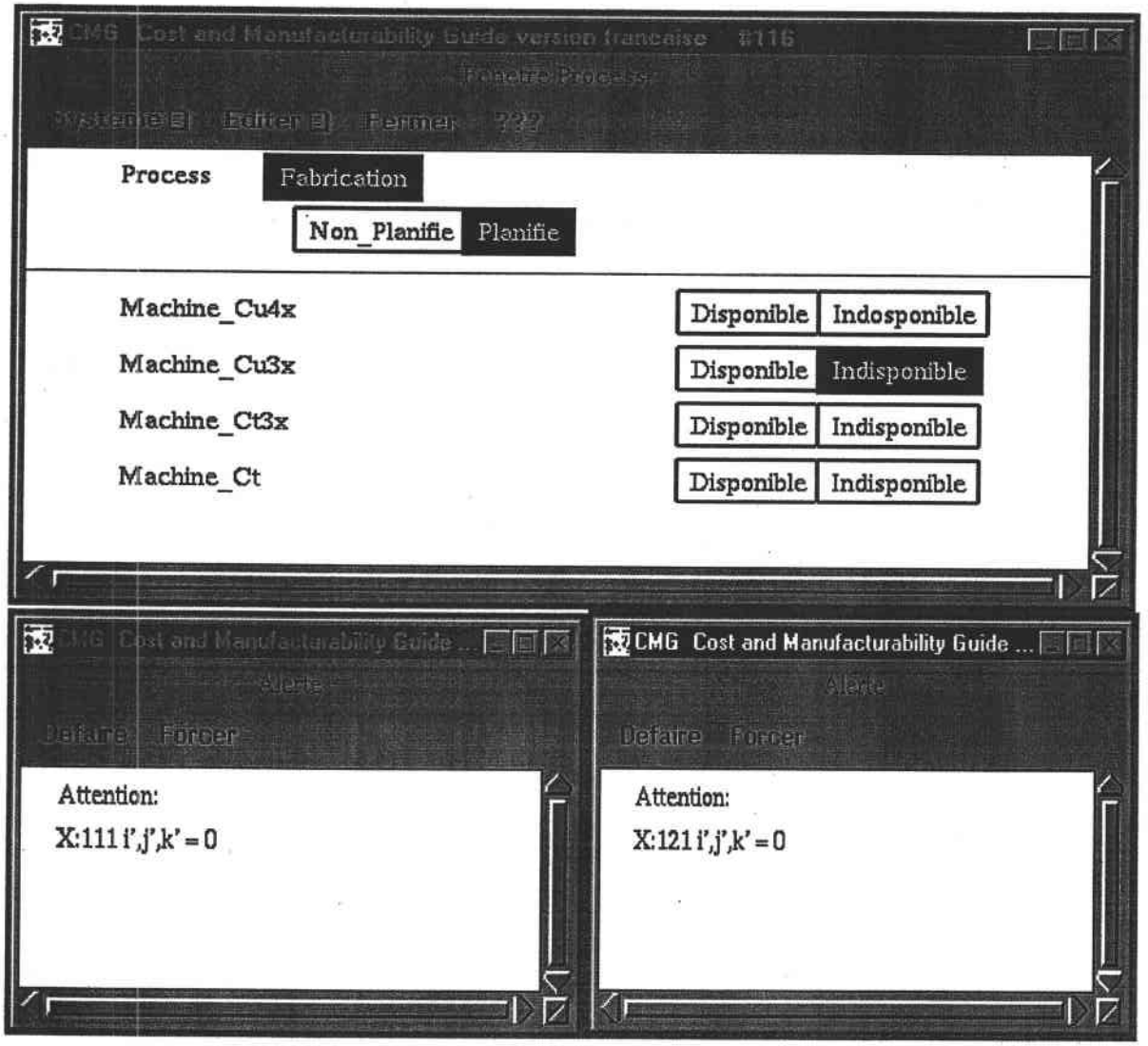


Figure 126. Exemple d'activation des contraintes de production

Le Modèle Costgrammes

Le Modèle Costgrammes (figure 127) comporte toutes les Entités Coût retenues pour l'implantation de la démarche. Elles sont de deux types (section 2.3) : Entités Coût élémentaires et mères. Contrairement aux premières, les Entités Coût mères possèdent des *sous-contextes* relatifs à celles qui la composent, et qui peuvent être élémentaires ou non.

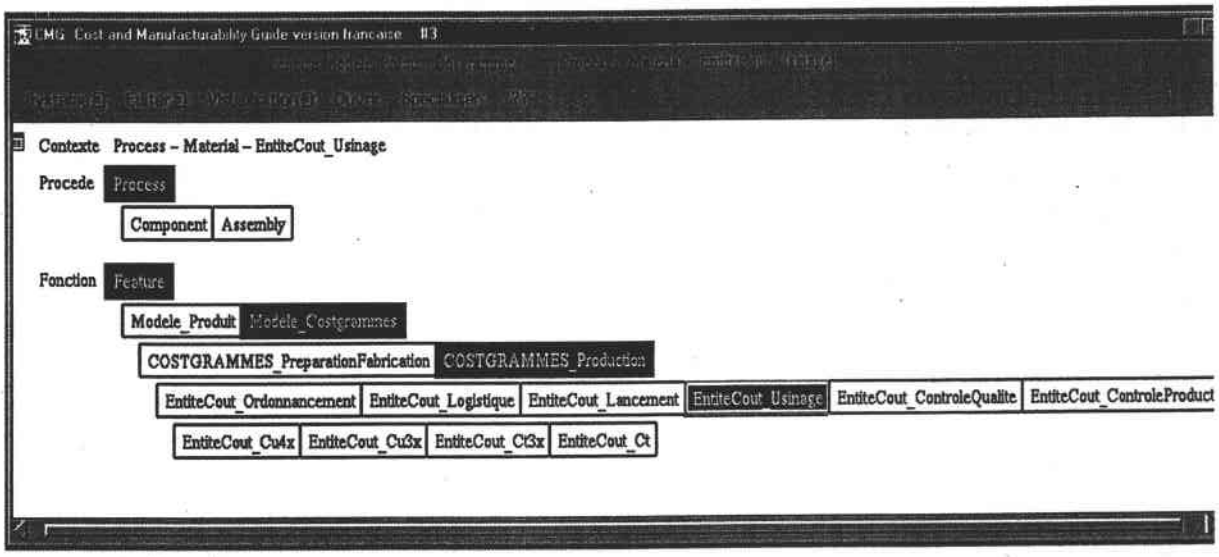


Figure 127. Le Modèle Costgrammes de support

Au niveau de chaque contexte d'Entité Coût, nous avons associé les connaissances suivantes :

- les attributs (type, ressources, etc.),
- la formule d'estimation du coût.

La figure 128 présente les attributs de l'Entité Coût « Ordonnancement ». C'est est un exemple d'Entité Coût non décomposée[14]. Sa formule d'estimation de coût est consignée comme une *caractéristique* dans son *contexte* (figure 129).

[14] Pour les Entités Coût élémentaires, l'inducteur est déterminé de trois manières différentes :
- introduit manuellement par l'estimateur (Exemple : nombre des ordres de fabrication),
- calculé automatiquement par le système (Exemple : Volume à enlever),

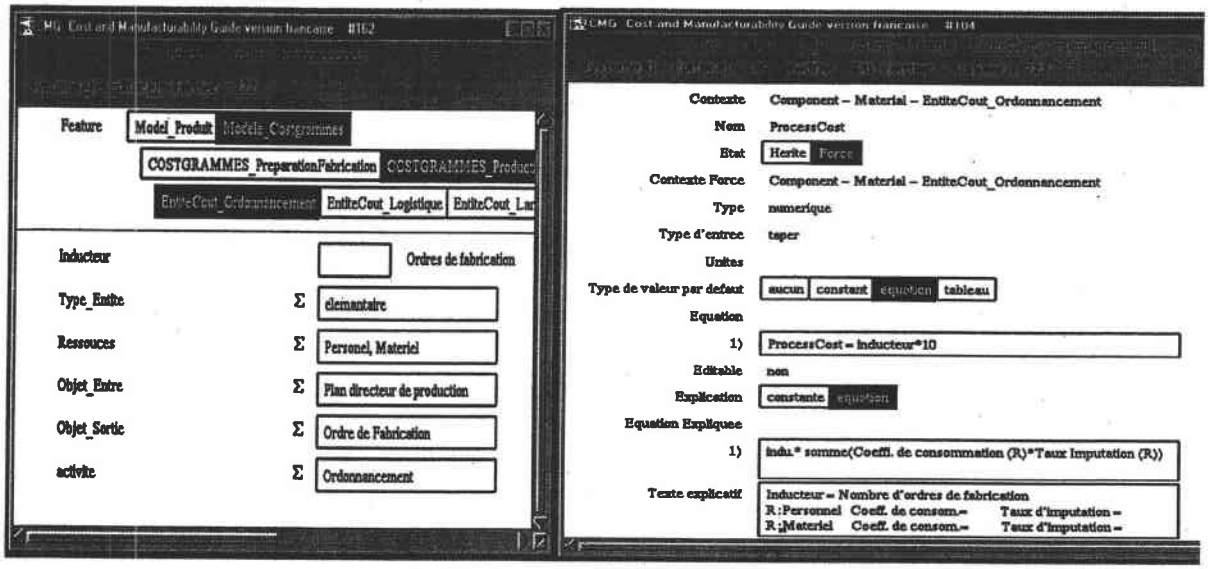


Figure 128. Attributs d'une Entité Coût Figure 129. Formule d'estimation d'une Entité coût élémentaire

Dans le cas d'une Entité Coût mère, la formule d'estimation de coût est consignée sous forme de règles qui somment le coût des Entités Coût élémentaires après vérification de leur instanciation (figure 130).

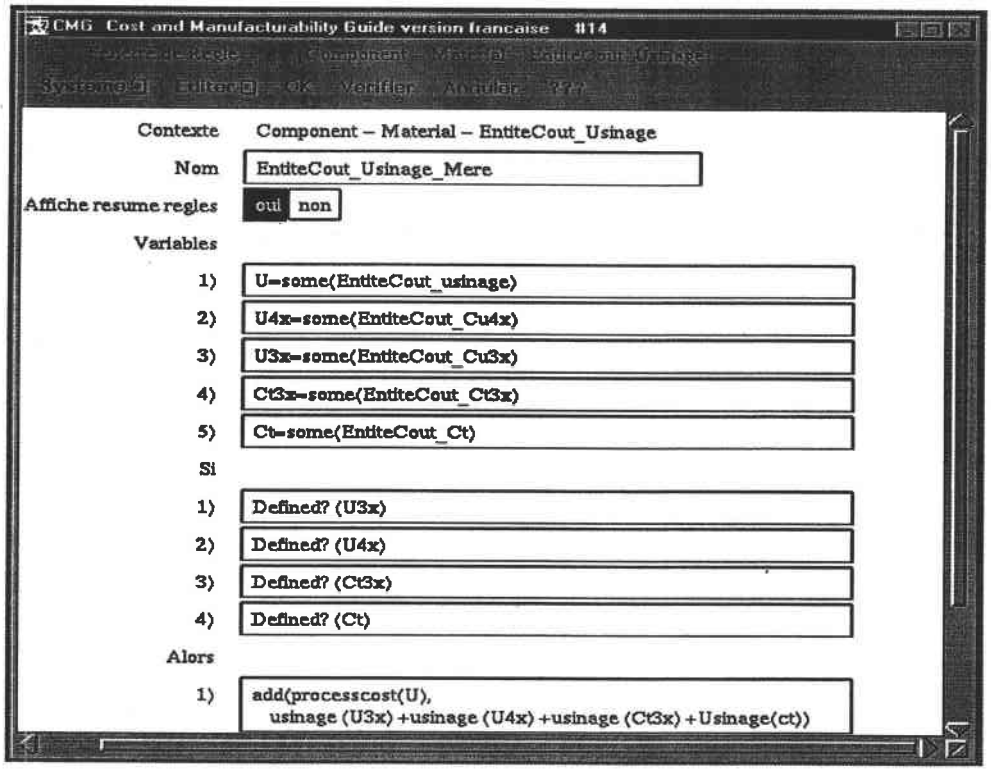


Figure 130. Formule d'estimation d'une Entité Coût mère

Le plus bas niveau du Modèle Costgrammes est l'Entité Coût machine (figure 131). A ce contexte, nous associons un coût de préparation constant en fonction de la machine, un coût

d'usinage correspondant à la somme des coûts des différentes opérations réalisées sur la machine (déduites du Modèle Produit), et l'ensemble des coûts de manutention, de réglage, changement d'outils, de contrôle qualité. Les inducteurs de ce dernier ensemble sont générés après détermination du processus de production final.

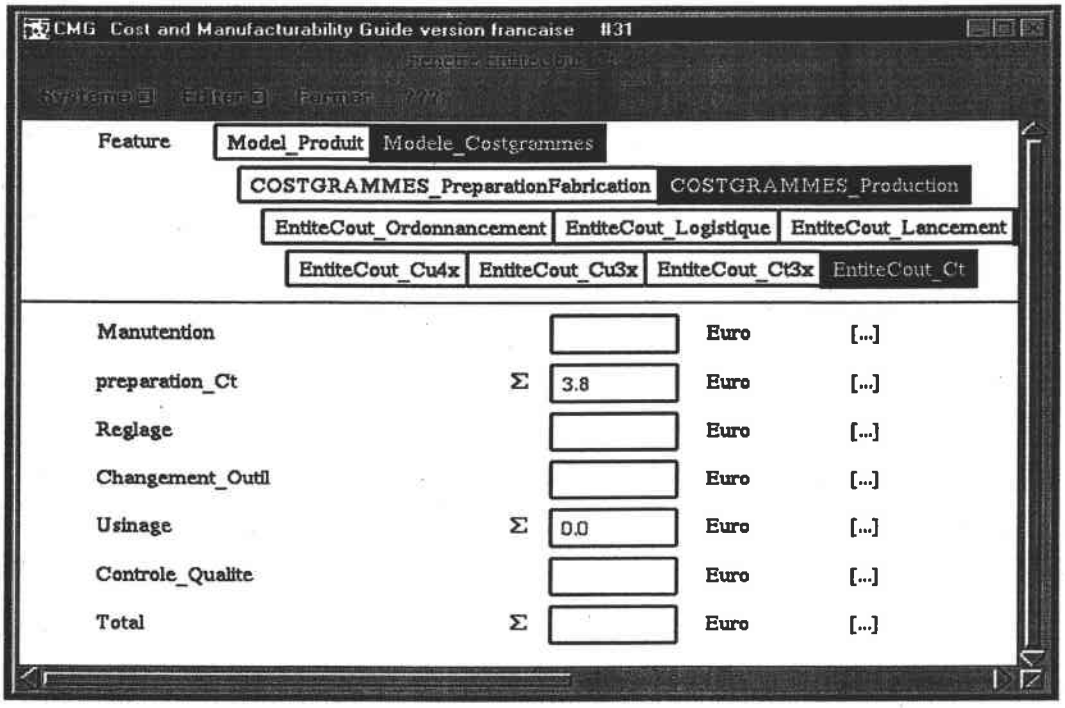


Figure 131. L'Entité Coût Machine

5.4 Génération du coût des opérations de fabrication et activation des contraintes

La recherche des connaissances en expertise de fabrication que nous avons effectuée (interviews, mise en situation, consultation de documents) nous a permis d'identifier les règles conditionnant la génération du processus de fabrication de chaque entité présente dans la pièce Termoz et le coût associé.

La suite de la présentation de la méthode se veut didactique, nous n'avons donc gardé pour chaque entité de fabrication que deux opérations : opération ébauche et opération finition (Tableau 11). Ces deux types suffisent pour exposer la démarche.

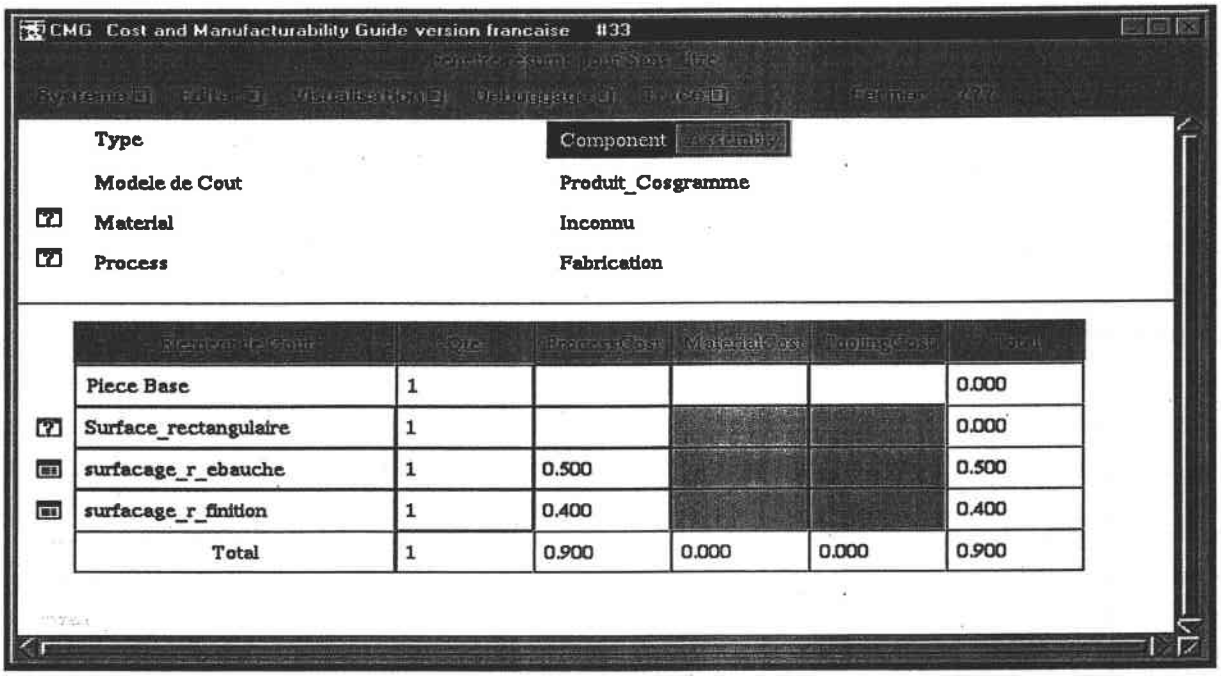
La sélection des entités de fabrication de la pièce Termoz dans le Modèle Produit, suivant l'ordre du tableau, affecte à chaque opération l'indice correspondant (Tableau 11).

Nom	Type Entité de fabrication	Opérations de fabrication	Machines capables	Indices X_{ijk}	Coût[15] (Euro) EC^f_{ijk}
F1	Surface_Circulaire	Opération ébauche	Cu4x	X_{111}	0,6
			Cu3x	X_{112}	0,5
			Ct3x	X_{113}	0,6
			Ct	X_{114}	0,5
		Opération finition	Cu4x	X_{121}	0,5
			Cu3x	X_{122}	0,4
			Ct3x	X_{123}	0,5
			Ct	X_{124}	0,5
F2	Surface_Rectangulaire	Opération ébauche	Cu4x	X_{211}	0,5
			Cu3x	X_{212}	0,4
		Opération finition	Cu4x	X_{221}	0,4
			Cu3x	X_{222}	0,3
A1	Trou_Alésé	Opération ébauche	Cu4x	X_{311}	0,3
			Cu3x	X_{312}	0,2
			Ct3x	X_{313}	0,3
			Ct	X_{314}	0,2
		Opération finition	Cu4x	X_{321}	0,2
			Cu3x	X_{322}	0,1
			Ct3x	X_{323}	0,2
			Ct	X_{324}	0,2
A2	Trou_Alésé	Opération ébauche	Cu4x	X_{411}	0,3
			Cu3x	X_{412}	0,3
			Ct3x	X_{413}	0,3
			Ct	X_{414}	0,2
		Opération finition	Cu4x	X_{421}	0,3
			Cu3x	X_{422}	0,3
			Ct3x	X_{423}	0,3
			Ct	X_{424}	0,2
R	Rainure	Opération ébauche	Cu4x	X_{511}	0,5
			Cu3x	X_{512}	0,4
			Ct3x	X_{513}	0,4
		Opération finition	Cu4x	X_{521}	0,4
			Cu3x	X_{522}	0,4
			Ct3x	X_{523}	0,4
TT	Trou_Taraudé	Opération ébauche	Cu4x	X_{611}	0,3
			Cu3x	X_{612}	0,3
		Opération finition	Cu4x	X_{621}	0,3
			Cu3x	X_{622}	0,2

Tableau 11. Entités de fabrication de la pièce Termoz et les X_{ijk} correspondants

[15] valeurs indicatives

Pour chacune des opérations générées automatiquement, le coût est estimé pour chaque machine capable, définissant ainsi les Entités Coût EC^{f}_{ijk}. Ceux présentés par la figure 132, sont les coûts des opérations sur les machines par défaut.



	Piece Base	1				0.000
?	Surface_rectangulaire	1				0.000
	surfacage_r_ebauche	1	0.500			0.500
	surfacage_r_finition	1	0.400			0.400
	Total	1	0.900	0.000	0.000	0.900

Figure 132. Coût des opérations de fabrication de la pièce Termoz sur les machines par défaut

Suite à la spécification des relations géométriques (Tableau 12) et topologiques (Tableau 13) entre les entités de fabrication, le modèle envoie les alertes correspondantes aux contraintes de fabrication. Ces conditions doivent être respectées par tout processus de production solution.

Relations géométriques	Contraintes de fabrication
$R\perp_{(F2,F1)}$	$U_{12k} < U_{22k}$ (Finition F1 avant Finition F2)
$R^{\Theta}_{(A1, A2)}$	$U_{42k} < U_{32k}$ (Finition A2 avant Finition A1)
$R^{\overline{Z}}_{(R,A2)}$	$U_{42k} < U_{52k}$ (Finition A2 avant finition R)
$R_{D(R,F1)}$	$U_{12k} < U_{52k}$ (Finition F1 avant Finition R)
$R_{D(TT,F1)}$	$U_{12k} < U_{62k}$ (Finition F1 avant Finition TT)

Tableau 12. Relations géométriques et contraintes de fabrication de la pièce Termoz

Relations topologique		Contraintes de fabrication
A1	Débouche dans A2	$U_{31k} < U_{41k}$
A2	Commence sur F1	$U_{42k} < U_{12k}$
R	Commence sur F1, débouche dans A2	$U_{12k.} < U_{52k}$ $U_{41k} < U_{51k}$
TT (×2)	Commence sur F2	$U_{62k} < U_{22k}$

Tableau 13. Relations topologiques et contraintes de fabrication de la pièce Termoz

Nous exploitons le modèle dans un contexte planifié et nous posons l'hypothèse que le centre d'usinage Cu3x est indisponible pour cause de réparation. Le modèle envoi les alertes correspondantes aux contraintes de production (Tableau 14). De même que les contraintes de fabrication, ces conditions doivent être respectées par tout processus de production solution.

Machines indisponibles	Contraintes de production
Cu3x	$X_{ijk112} = 0$ $X_{112\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk122} = 0$ $X_{122\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk212} = 0$ $X_{212\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk222} = 0$ $X_{222\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk312} = 0$ $X_{312\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk322} = 0$ $X_{322\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk412} = 0$ $X_{412\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk422} = 0$ $X_{422\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk512} = 0$ $X_{512\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk522} = 0$ $X_{522\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk612} = 0$ $X_{612\,i'j'k'} = 0$ $X_{ijk622} = 0$ $X_{622\,i'j'k'} = 0$

Tableau 14. Machine indisponible et contraintes de production

A ce stade, toutes les Entités Coût EC^f_{ijk} de la pièce Termoz sont connues, ainsi que les contraintes de fabrication et de production à respecter. Les indices X_{ijk} permettent de déterminer toutes les variables $X_{ijki'j'k'}$ du problème sous Con'flex. La section suivante portera sur la recherche du coût des processus de production solutions de la pièce Termoz.

5.5 Génération du coût des processus de production alternatifs

Le processus de production de la pièce Termoz prend en considération les coûts de manutention $EC^{m}_{ijk\ i'j'k'}$ [16] et de préparation des machines $EC^{pr}_{ijk\ i'j'k'}$, en plus des coûts des opérations de fabrication EC^{f}_{ijk}.

Nous avons dissocié la modélisation sur trois niveaux :

- La déclaration des variables booléennes $X_{ijki'j'k'}$, des variables entières U_{ijk} et de la variable réelle floue *Cpp* (coût d'un processus de production solution),
- La déclaration des contraintes du modèle, des contraintes de fabrication, des contraintes de production et de la contrainte coût (*Cpp* < Coût maximal admissible),
- La déclaration des connaissances EC^{f}_{ijk}, $EC^{m}_{ijk\ i'j'k'}$ et $EC^{pr}_{ijk\ i'j'k'}$.

La recherche d'un processus de production solution se ramène à l'instanciation de l'ensemble des variables. Chaque variable possède un domaine de valeurs possibles. Lorsque le domaine d'une variable est modifié (réduction du domaine, affectation de valeur), les contraintes propagent cette modification aux domaines des autres variables. Une processus de production solution est obtenu lorsque les domaines de toutes les variables ont été réduits à une valeur unique.

La modélisation de l'estimation des coûts de production sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes, permet de répondre à la question suivante : existe-t-il des processus de production de la pièce dans l'atelier à disposition dont le coût est inférieur à une valeur donnée et dont les spécifications géométriques sont respectées ? quel est le coût de chaque solution ?

La réponse à cette question apporte au concepteur une évaluation économique de ces choix techniques.

Nous proposons le scénario de conception suivant :

> La pièce initiale comporte les entités de fabrication F1, F2, A1, TT. Elle est produite par lots de 100 à un coût unitaire de 4,9 Euros. Une fonction supplémentaire de la pièce exige la création de deux nouvelles entités de fabrication : le trou Alésé A2 et la rainure R avec la spécification géométrique $R^{\Xi}_{(R,A2)} = 0.05$ et topologique *R débouche dans A2*. Le coût de production maximal admissible de la pièce est 7.3 Euros / unité.

---

[16] Le coût de manutention entre deux machines est déterminé en fonction de la distance qui les sépare.

Les calculs réalisés sous Con'flex pour l'estimation de coût des processus de production solution dans l'atelier à disposition montre que :

- Pour un degré de satisfaction égale au moins à 0.09 (équivalent aux processus de production où le coût unitaire de la pièce est inférieur à 7.084 Euros) : 49 solutions existent.
- Pour un degré de satisfaction égale au moins à 0.190 (équivalent aux processus de production où le coût unitaire de la pièce est inférieur à 6.844 Euros) : 49 solutions existent.
- Pour un degré de satisfaction égale au moins à 0.290 (équivalent aux processus de production où le coût unitaire de la pièce est inférieur à 6.604 Euros) : 35 solutions existent.
- Pour un degré de satisfaction égale au moins à 0.390 (équivalent aux processus de production où le coût unitaire de la pièce est inférieur à 6.364 Euros) : 3 solutions existent.
- Pour un degré de satisfaction égale au moins à 0.490 (équivalent aux processus de production où le coût unitaire de la pièce est inférieur à 6.124 Euros) : 0 solution existe.

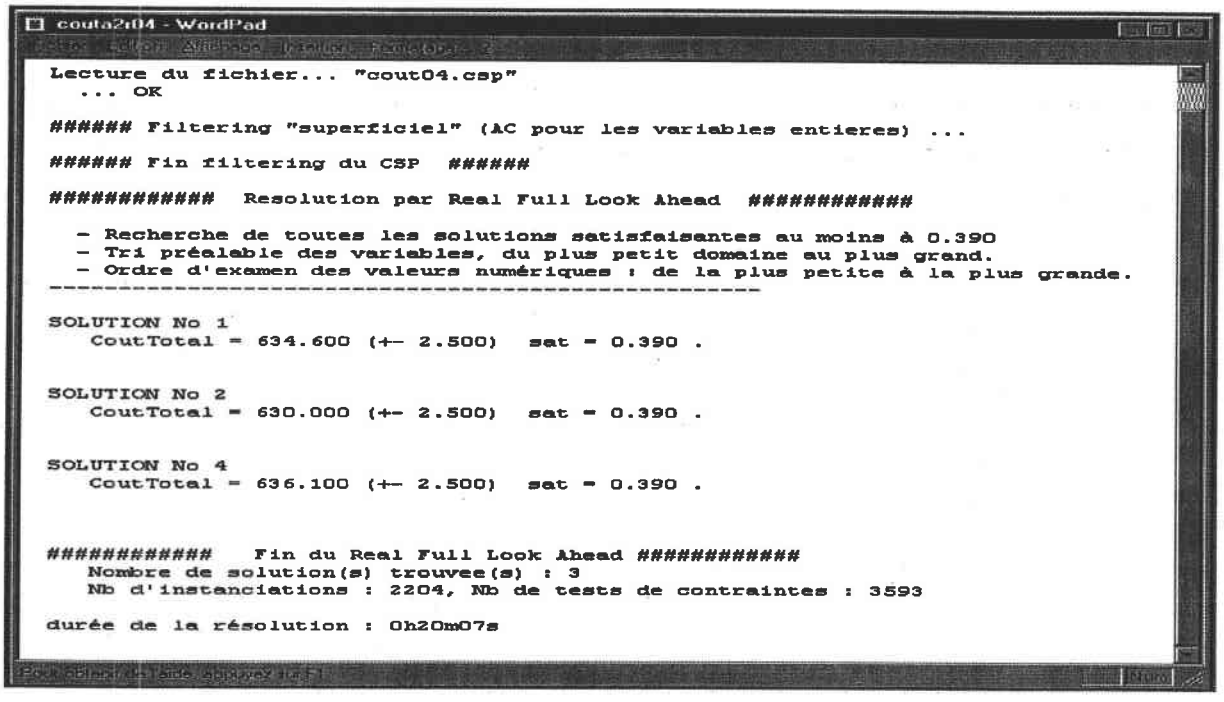


Figure 133. Coûts des processus de production solutions à un degré de satisfaction égale au moins à 0.390

Dans les trois solutions de la figure 133, la valeur « CoutTotal » représente le coût d'un lot de 100 pièces correspondant au processus de production solution. La mention du type « + - 2.500 » signifie, dans Con'flex, que la valeur solution est un intervalle centré sur la valeur affichée et dont la largeur est le pas déclaré de la variable. La valeur « Sat = » est le degré de

satisfaction de la solution. Les indication « Nbr d'instantiations » et « Nbr de tests de contraintes » sont une mesure du chemin (dans la recherche arborescente) qu'il a fallu parcourir pour trouver les solutions.

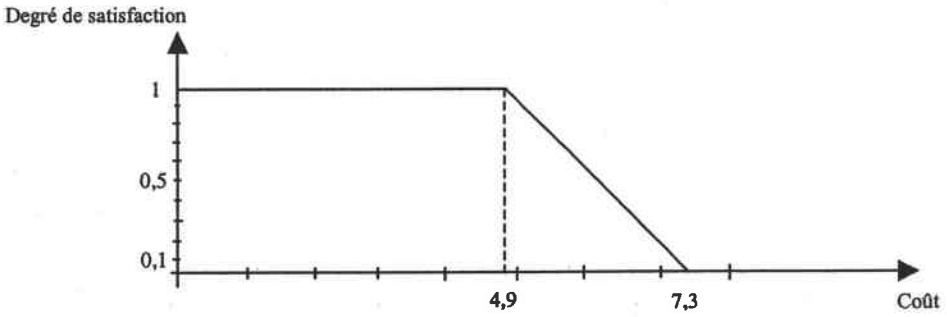


Figure 134. Le sous-ensemble flou [4,9 ; 7,3] du coût total

Les solutions correspondantes au degré de satisfaction minimal (0,09) permettent de déterminer l'intervalle du coût unitaire de la pièce $[C_{pp,\ mini}\ ;\ C_{pp,\ maxi}]$ dans l'intervalle flou [4.9, 7,3] (figure 134). Les valeurs indicatives des coûts mises en application (coûts opérations, préparation machines, manutention) fournissent l'intervalle [6.3, 6.7].

5.6. Choix d'un processus de production et estimation des Entités Coût concourantes

La connaissance des processus de production solutions permet la génération des inducteurs des Entités Coût concourantes. En effet, pour un processus donné la valeur de chacune des variables $X_{ijk\,i'j'k'}$ des fonctions I (voir section 4.4.4.1) est connue (0 ou 1).

Un processus de production possible de la pièce Termoz est le suivant (figure 135) :

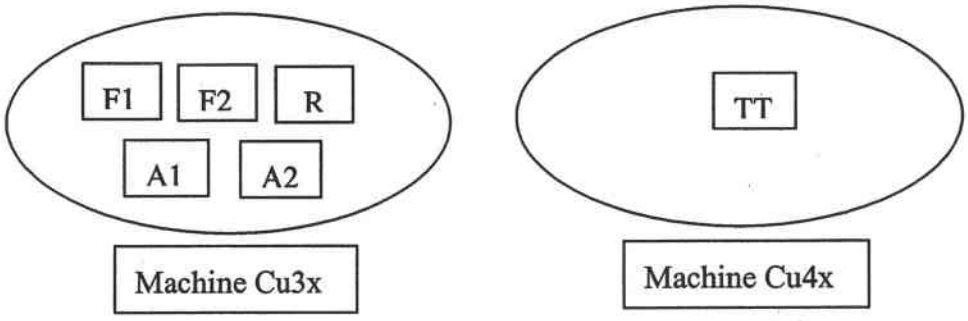


Figure 135. Un processus de production solution de la pièce Termoz

A partir de cette donnée, les inducteurs des Entités Coût concourantes Changement d'outils et Contrôle qualité prennent ces valeurs :

- **Entité Coût Changement d'outils sur les machines Cu3x et Cu4x :**

L'activité changement d'outils augmente si le nombre d'opérations augmente.

Inducteur Changement d'outils sur la machine Cu4x = Nbr d'opérations sur la machine Cu4x

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M)i',ni',k(Cu3x)}$$

$$= 2$$

Inducteur Changement d'outils sur la machine Cu3x = Nbr d'opérations sur la machine Cu3x

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{j'=1}^{ni'} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j\,k(M),i',j',k'(Cu3x)}$$

$$= 10$$

- **Entité Coût Contrôle Qualité à la sortie des machines Cu3x et Cu4x :**

L'activité de contrôle augmente si le nombre d'opérations de finition augmente.

Inducteur contrôle de qualité sur la machine Cu3x = Nbr d'opérations de finition sur Cu3x.

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),i',ni',k(Cu3x)}$$

$$= 5$$

Inducteur contrôle de qualité sur la machine Cu4x = Nbr d'opérations de finition sur Cu4x.

$$= \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{ni} \sum_{k=1}^{nij} \sum_{i'=1}^{n+1} \sum_{k'=1}^{ni'j'} X_{i,j,k(M),i',ni',k(Cu3x)}$$

$$= 1$$

Un traitement similaire peut être effectué pour d'autres Entités Coût concourantes liées directement au processus de production de la pièce. Les formules correspondantes ont été présentées à la section (4.4.4.1).

5.7. Conclusion

Dans ce dernier et cinquième chapitre, nous avons donné un aperçu de l'architecture fonctionnelle de la maquette logicielle qui a été mise en œuvre. Nous avons présenté la conception du Modèle Produit-Costgrammes sous le générateur de systèmes experts CostAdvantage. Ce travail a permis d'expérimenter la possibilité de générer automatiquement un ensemble d'Entités Coût à partir d'une identification d'entités de fabrication dans une pièce donnée, ainsi que l'activation des contraintes de fabrication et de production à respecter pour tout processus de production solution.

Ensuite, au travers d'un scénario de conception de la pièce Termoz, nous avons présenté la mise en œuvre de la modélisation d'estimation des coûts sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes. A cet effet, l'outil Con'flex a été employé. Ceci a permis :

- de déterminer le coût des processus de production solutions,
- d'associer à chacun un degré de satisfaction économique,
- d'offrir un intervalle de coût $[C_{pp,\ mini}\ ;\ C_{pp,\ maxi}]$.

Par ailleurs, nous pouvons constater que pendant l'activité de conception, il est important de laisser le choix des entités de fabrication ainsi que leurs spécifications géométriques et topologiques au concepteur. Le Modèle Produit-Costgrammes proposé a comme but d'assister le concepteur et d'apporter une évaluation économique de ses choix, mais en aucun cas de remplacer son travail d'analyse et de décision. La cohérence du coût des processus de production solutions et le respect des contraintes explicitées dans la description du problème sont assurés par la technique de satisfaction de contraintes.

Conclusion générale

Bilan

L'objectif du travail de recherche présenté dans ce mémoire était de proposer une méthode d'estimation des coûts cohérente avec les évolutions récentes du monde industriel.

Dans un premier temps, après avoir montré la dimension stratégique des fonctions Conception et Devis en raison de l'évolution des marchés et de la concurrence, nous avons défini la problématique d'estimation des coûts dans un cadre d'ingénierie intégrée. Elle est en effet un vecteur d'intégration de par sa présence à chacun des stades de développement d'un produit en permettant une évaluation économique des choix et des décisions techniques. D'autre part, la croissance des coûts indirects dans les systèmes de production rend illusoire l'utilisation de quelques règles normatives simples d'estimation des coûts découlant de vieilles pratiques issues de la comptabilité analytique. En effet, les avancées technologiques en fabrication et l'introduction des nouvelles organisations et méthodes de production ont modifié considérablement le ratio coûts directs/indirects. Dans ce contexte, se limiter seulement à une base volumique (heures main d'œuvre, heures machines, etc.) pour évaluer le coût d'un produit mène inévitablement à des calculs erronés.

Une étude approfondie des méthodes d'estimation des coûts et de chiffrage classiques, telles que la méthode analytique, la méthode analogique et la méthode paramétrique, montre qu'en général la première est très dépendante de la gamme de fabrication et que les deux suivantes fonctionnent en boîte noire et n'apportent pas d'informations sur la structure du coût d'un produit. En outre, les trois méthodes affectent à un produit un coût unique et figé et portent peu d'attention aux coûts indirects. Le développement de nouveaux outils adaptés aux besoins des concepteurs et deviseurs dans un contexte d'ingénierie intégrée et de croissance des coûts indirects est alors indispensable. Tirer avantage de deux notions fondamentales issues de la méthode *Activity Based Costing* (l'inducteur) et de celles des centres d'analyse (l'homogénéité) dans un nouveau concept appelé Entité Coût est un premier élément de réponse.

Une étude détaillée des besoins auxquels doit répondre un système d'estimation des coûts nous a amené à décomposer le domaine en deux : modélisation des connaissances et modélisation des raisonnements.

La modélisation des connaissances a donné lieu au Modèle Produit-Costgrammes comme support nécessaire et préalable à toute estimation des coûts d'un produit. L'objectif

d'intégration en conception et le besoin d'une sémantique élevée pour la représentation d'un produit nous a conduit à retenir le concept connu *d'entité de fabrication*. Ainsi, le Modèle Produit capitalise toutes les entités de fabrication maîtrisées par l'entreprise, et associe à chacune d'elles l'ensemble des opérations de fabrication potentielles. Pour toute opération, nous affectons l'ensemble des machines capables avec l'expertise d'estimation du coût associée. Le Modèle Costgrammes est basé sur le concept d'Entité Coût. Une analyse descendante de l'entreprise permet d'identifier et de retenir les Entités Coût liées à la production du produit sous sa forme informationnelle ou matérielle. A cet effet, nous avons défini les Entités Coût mères et élémentaires. Leur structuration aboutit à la conception du Modèle Costgrammes. L'estimation des coûts d'un produit particulier est effectuée sur la base du Modèle Produit-Costgrammes conçu.

La modélisation des raisonnements d'estimation des coûts d'un produit nous a conduit à identifier trois étapes. La première porte sur l'établissement des relations de causalité existantes entre les spécifications d'une entité de fabrication et les coûts des opérations de fabrication engagées. Nous avons modélisé le raisonnement relatif à cette étape sous forme de règles « Si – Alors ». Nous avons démontré que chaque opération de fabrication n'est qu'une Entité Coût élémentaire, et que la somme de ces dernières correspond au coût du processus de fabrication nécessaire à la réalisation de l'entité de fabrication.

L'intérêt de cette première étape est d'évaluer le coût intrinsèque de chaque entité de fabrication et de distinguer de manière suffisamment claire un ensemble de variables de production construit autour de l'identification des opérations de fabrication du produit.

La deuxième étape porte sur l'estimation du coût des processus de production[17] alternatifs. Une estimation intégrée des coûts doit prendre en considération l'ensemble des contraintes liées à la production du produit. Nous en avons défini trois types : contrainte de coût, contraintes de fabrication et contraintes de production. Elles reflètent le coût limite imposé par le marché et influent directement sur les coûts de préparation des machines et de manutention, et sur les coûts liés à l'indisponibilité de certaines machines pour cause de réparation ou planning.

Les variables construites autour de l'identification des opérations de fabrication du produit sont liées entre elles au travers de contraintes. L'estimation des coûts d'un produit est ainsi modélisée sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes (CSP). Ceci permet d'explorer les processus de production alternatifs et d'associer les coûts des opérations de

[17] Somme des coûts des opérations de fabrication des différentes entités de fabrication, des coûts de préparation des machines et des coûts de manutention.

fabrication, les coûts de préparation des machines et de manutention correspondant à chaque processus de production solution du problème.

La troisième étape porte sur l'élargissement de l'estimation des coûts aux Entités Coût concourantes (telles que « programmation MOCN » ou « maintenance ») à partir de l'identification des valeurs des variables, c'est à dire à partir d'un processus de production solution. Cette étape correspond à l'analyse ascendante (causale) du Modèle Costgrammes. A cet effet, nous avons défini, pour chaque Entité Coût concourante considérée, une fonction inducteur I en fonction des variables du problème. Tout processus de production solution génère les valeurs d'inducteurs des différentes Entités Coût concourantes. La connaissance des différents coûts de production a permis de déterminer le coût total unitaire du produit et de cerner le coût extrinsèque d'une entité de fabrication.

Les différents principes et concepts présentés dans ce mémoire ont été mis en application à travers le développement d'une maquette logicielle. Le système est développé au moyen de deux environnements. En premier, le générateur de systèmes experts orienté Objet CostAdvantage, nous a permis de concevoir le Modèle Produit-Costgrammes. Une base de règles a été constituée au niveau de chaque type d'entité de fabrication permettant de générer automatiquement le coût de chaque opération de fabrication nécessaire à la réalisation de l'entité de fabrication spécifiée. Une deuxième base de règles a été constituée au niveau de chaque type de relation géométrique ou topologique inter–entités de fabrication permettant d'activer les contraintes de fabrication. Toutes les Entités Coût présentes dans le modèle encapsulent des règles ou une méthode relatives à l'expertise d'estimation de son coût. Une option du modèle permet de réaliser une estimation planifiée des coûts, en prenant en compte l'indisponibilité de certaines machines. Dans ce cas, des contraintes de production sont aussi activées.

Ainsi, pour un produit particulier, l'identification des entités de fabrication, des relations géométriques et topologiques inter–entités et des machines indisponibles (option) permet de générer l'ensemble des variables (opérations de fabrication) et des contraintes à satisfaire du problème d'estimation du coût des processus de production alternatifs. L'ensemble[18] ajouté aux connaissances[19] du problème est ensuite introduit dans le deuxième environnement informatique Con'flex. Ce dernier, basé sur les techniques de programmation par contraintes, a permis de générer l'ensemble du coût des processus de production alternatifs. Ainsi, pour un produit particulier, l'intervalle [*Coût mini, Coût maxi*] est déterminé avec une classification par ordre de satisfaction économique. Le choix d'un processus de production déterminé permet de déduire les inducteurs des Entités Coût concourantes. Un exemple didactique d'exploitation de cette maquette logicielle a été présenté au chapitre 5.

---

[18] Variables et contraintes
[19] Coûts de préparation machines et manutention

Dans ce travail de recherche, notre objectif était de proposer une méthode d'estimation des coûts adaptée à l'évolution de l'entreprise. Nous pensons que l'ensemble des concepts et techniques développés contribuent à cette mise à niveau. Le concept Entité Coût permet d'unifier le traitement des coûts directs et indirects. L'établissement des relations de causalité existantes entre les spécifications d'une entité de fabrication et les coûts des opérations de fabrication engagés permettent d'apporter une aide à la décision économique en phase de conception détaillée. La prise en compte de contraintes issues du marché, de la fabrication et de la production montre la capacité d'intégration de la fonction d'estimation des coûts. La génération d'un ensemble de coûts différents relatifs au processus de production alternatifs met à la disposition du deviseur un outil de négociation du rapport Coût/Délai, et au concepteur un intervalle [*Coût mini, Coût maxi*] de contrôle économique des choix techniques. Enfin, des fonctions inducteurs montrent le lien étroit existant entre des variables d'ordre technique et le coût indirect d'un produit.

Le paragraphe suivant présente nos perspectives de travaux futurs. Elles suggère la marche à suivre pour la suite de nos recherches.

Perspectives

Les perspectives que nous envisageons concernant les travaux rapportés dans cette thèse relèvent de plusieurs aspects. Certains d'entre eux concernent des travaux théoriques permettant d'approfondir la méthode proposée afin de la rendre plus efficace. D'autres concernent plutôt les travaux informatiques permettant d'étendre et développer la maquette logicielle proposée.

Théorique

Concernant les machines capables associées à chaque opération de fabrication, nous avons fixé l'hypothèse que l'utilisateur du système d'estimation des coûts est qualifié, en fonction de la géométrie de la pièce, pour juger la capacité de mise en position de chaque machine. Celles qui n'offrent pas une possibilité de posage seront éliminées de l'ensemble des machines capables en activant une contrainte équivalente à celle d'une machine indisponible. Dans ce sens, une étude approfondie de l'appartenance de la direction d'outil nécessaire à la réalisation de l'entité de fabrication au volume d'accessibilité de la machine permettra d'automatiser cette expertise. Les travaux de recherche réalisés sur les problèmes de posage [Paris,1995] [Sabourin, 1995] fournissent des axes de développement.

La présentation de la méthode d'estimation des coûts a été limitée à la production d'un produit. Cependant, son application à un système mécanique composé de plusieurs produits, eux mêmes construits autour d'entités de fabrication et d'entités d'assemblage, est envisageable avec de nouvelles Entités Coût relatives aux opérations d'assemblage.

Une prise en compte des coûts des stocks tampons (les en-cours) entre les machines est possible. En effet, ce type de coût est complètement dépendant du processus de production choisi. L'intégration de la variable temps dans la modélisation réalisée permettra de déterminer le débit de chaque machine et de déduire les stocks intermédiaires.

Dans la suite des travaux de recherche, il nous semble très intéressant d'explorer les possibilités qu'offre la modélisation d'estimation des coûts sous forme d'un problème de CSP flexibles. Dans ce formalisme, les variables peuvent avoir des domaines aux frontières imprécises, les contraintes sont plus ou moins importantes à satisfaire et, par ailleurs, plus ou moins satisfaites par les différentes combinaisons de valeurs des variables. Enfin, on peut admettre une solution qui ne satisfait que partiellement l'ensemble des contraintes. Une piste de recherche à développer consiste à rechercher les variables, les domaines et les contraintes permettant d'évaluer la solution de conception par un degré de satisfaction Qualité / Coût.

Informatique

L'interfaçage entre les deux environnements employés (CostAdvantage, Con'flex) peut être largement amélioré en terme d'intégration.

Un interfaçage du système d'estimation des coûts avec un logiciel GPAO pourrait permettre la sélection automatique des machines indisponibles.

Enfin, une perspective majeure et fort intéressante, à la fois théorique et informatique, serait l'intégration de l'approche proposée d'estimation des coûts dans un outil CAO. Au moyen d'alertes associées aux formes géométriques et aux spécifications, on pourrait signaler au concepteur les coûts induits, et lui fournir une estimation plus fine de l'intervalle de coûts correspondant à une étape de la conception.

Les recherches à venir dans le domaine de l'estimation des coûts doivent tirer profit de l'intersection entre les disciplines du génie mécanique, de l'informatique et de l'évaluation de performance économique, ce qui souligne une fois de plus l'intérêt du Génie Industriel.

Glossaire

Activité de support et de soutien	Activité qui profite à l'organisation, mais pas à un objet de coût.
Activity-Based Costing (ABC) / Comptabilité à base d'activité	Méthode pour mesurer le coût et la performance des activités et des objets de coût. Assigne les coûts aux activités en se basant sur leur usage des ressources, et assigne les coûts aux objets de coûts en se basant sur leur usage des activités. ABC reconnaît les relations de causalités des inducteurs de coût sur les activités.
Activity-Based Management (ABM) / Gestion à base d'activités	Discipline focalisée sur la gestion des activités en tant que voie d'amélioration continue de la valeur reçue par les clients et du profit acquis en fournissant cette valeur. Cette discipline inclut l'analyse des inducteurs de coût, l'analyse des activités, et l'analyse de performance. La gestion à base d'activité (ABM) puise dans la comptabilité à base d'activité (ABC) ses sources d'informations.
Analyse des coûts	Simulation des opportunités de réduction des coûts. L'analyse des coûts aide à sélectionner les opportunités qui aboutissent aux meilleures améliorations. Elle aide également à obtenir l'adhésion de tous aux actions d'amélioration et aide enfin à communiquer les enseignements recueillis à travers ces améliorations.
Causalité des coûts	C'est la propriété qui permet de remonter, dans le réseau d'analyse, la cause de l'existence d'un coût particulier. Selon la pénétration de l'analyse causale, ça peut être un ensemble de produits, un produit ou une caractéristique du produit.
Contexte (CostAdvantage)	Un contexte définit les caractéristiques statiques (champs) et fonctionnelles (méthodes) d'un ensemble d'objets. Cette notion est équivalente à une classe d'objet. Elle correspond à un modèle générique qui permet l'instanciation d'objets similaires appelés instances de contexte.
Contrainte coût	La contrainte coût élimine tout processus de production solution éloigné des objectifs économiques. Elle exprime un degré de satisfaction sur toute solution retenue.

Contraintes de fabrication Les contraintes de fabrication décident les précédences à respecter entre les opérations effectives des entités de fabrication et les regroupements en phases de certaines d'entre elles.

Contraintes de production Les contraintes de production influent de manière restrictive principalement sur le choix des machines, selon que celles ci peuvent être ou non utilisées ou en panne (indisponibilité).

Coût Charge ou dépense supportée par un intervenant économique par suite de la production ou l'utilisation d'un produit ou de l'ensemble des deux. Il ne faut pas confondre le coût et le prix. Ce dernier est égale au majoré de la marge de l'entreprise [NF X 50-150].

Coût d'un processus de fabricaion Somme des coûts des opérations de fabrication de l'entité de fabrication.

Coût d'un processus de production Somme des coûts des opérations de fabrication des différentes entités de fabrication, des coûts de préparation des machines et des coûts de manutention.

Entité Un groupement sémantique (atome de modélisation) caractérisé par un ensemble de paramètres, utilisés pour décrire un objet indécomposable manipulé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et l'utilisation des produits et des systèmes de production [Tollenaere, 1998].

Entité Coût (EC) Un groupement de coûts associés aux ressources consommées par une activité. La condition fondamentale de cohérence du concept repose sur l'homogénéité des ressources consommées par l'Entité Coût, ce qui permet de leur associer un inducteur.

Entité Coût Mère En l'absence d'homogénéité des ressources, l'EC est considérée comme EC mère. Sa décomposition en Entités Coût respectant la condition d'homogénéité (EC filles) est obligatoire. Les paramètres (ressources, activité, objets d'entrée-sortie) et le coût de l'Entité Coût mère sont respectivement l'union des paramètres et la somme des coûts des Entités Coût qui la composent.

Entité de fabrication Un ensemble de spécifications associées à une forme géométrique ou un ensemble de formes géométriques paramétrées, qui combinées entre elles représentent un élément d'une entité fonctionnelle dont la pièce fait partie. Cette forme est associée à un processus de

	fabrication qui exprime l'ensemble des opérations types nécessaires à sa réalisation.
Inducteur d'activité (Activity Driver)	Une unité d'œuvre permettant de répartir les coûts des activités entre les productions d'une entreprise (exemple : heures de main d'œuvre directe, nombre de séries fabriquées, nombre de commandes, type de clientèle servie, etc.) [Bescos et Mendoza, 1994].
Inducteur de coût (Cost Driver)	Un facteur influençant le niveau de performance d'une activité et sa consommation de ressources (exemple : la qualité des matières premières reçues par un atelier de fabrication, formation et expérience d'une équipe de consultants, etc.) [Bescos et Mendoza, 1994].
Inducteur de ressource (Resource Driver)	Une clé de répartition utilisée pour ventiler les coûts des ressources entre les activités (exemples : nombre d'heures consacrées à chaque activité pour la répartition des salaires [Bescos et Mendoza, 1994]).
Maintenance	Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé [NF X 60-110].
Objet de coût	La raison pour laquelle les activités sont réalisées. Les produits et les clients sont les principales raisons d'être des activités. Les objets de coûts peuvent inclure les produits, les services, les clients, les projets, les contrats, etc.
Opération élémentaire	Pour la réalisation d'une surface donnée, il apparaît souvent que certaines opérations ne sont pas exécutables en une seule fois et nécessitent plusieurs passes successives avec le même outil et avec les mêmes conditions de coupe. Les passes d'une même opération de fabrication sont appelées opérations élémentaires.
Opération type	Une opération type est définie comme étant la réunion de plusieurs opérations élémentaires consécutives réalisant la même surface. Chaque opération type est caractérisée par le couple Opération/Machine et définie par un triplet Outil/Matière/Machine mm^2 donnant un débit (mm^3/min ou /min).
Opération potentielle	A chaque type d'entité de fabrication, il lui correspond un ensemble $\mathcal{T}$ d'opérations *potentiellement* nécessaires à sa réalisation.

Opération effective Des critères, essentiellement d'ordre technologique (la qualité à obtenir), conditionnent les décisions permettant d'associer à une entité de fabrication donnée les opérations *effectives* correspondantes, formant ainsi l'ensemble t avec $t \in \mathcal{T}$.

PARETO Wilfredo PARETO (1848-1923) a montré que dans une large majorité des situations, un petit nombre de facteurs a une influence majeure sur les résultats. C'est la loi dite de Pareto des 80-20, où 20% des facteurs expliquent 80% des résulats. Cette répartition inégale se retrouve souvent et permet de distinguer les problèmes importants de ceux qui le sont moins. Cette priorisation des problèmes a pour but de choisir les actions prioritaires à effectuer et donc de concentrer son attention sur les phénomènes importants à résoudre. L'analyse PARETO met en œuvre une méthode bien défini.

Prix Equivalent monétaire d'un produit lors d'une transaction commerciale. Le prix qui est le même pour l'acheteur et pour le vendeur, devient un élément de coût pour l'acheteur [NF X 50-150].

Relations géométriques Les relations géométriques expriment des tolérances géométriques d'orientation et de position liant deux à deux des entités de fabrication différentes du produit.

Relations topologiques Les relations topologiques expriment des relations de voisinage liant deux à deux des entités de fabrication différentes du produit.

Système de coûts Un système de coûts est le résultat des efforts déployés pour fournir aux gestionnaires les moyens de « savoir, de comprendre et d'agir sur les consommations de ressources ». Ceci se traduit concrètement par la production d'une série d'instruments visant à assurer la traçabilité des ressources, à identifier les causalités des consommations et à cerner les responsabilités. C'est cet ensemble instrumental que l'on désigne sous le terme de système de coûts » [Mévellec, 1994].

Traçabilité des coûts C'est la propriété qui permet de suivre, dans le réseau d'analyse, le cheminement des coûts, depuis l'enregistrement des coûts dépensés en comptabilité générale jusqu'à leur incorporation aux produits ou services.

Unité d'œuvre Unités de mesure dans un centre d'analyse servant notamment à imputer le coût de ce centre aux coûts des produits.

Bibliographie

[Alting et Zhang, 1998] **L. Alting, H. Zhang** "Computer Aided Process Planning : The state-of-the-art survey" *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 4, pp. 553-585, 1989.

[Alting, 1993] **L. Alting** "Life-cycle design of products : a new opportunity for manufacturing entreprises" *In Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques*, ed. Wiley, 1993.

[Anselmetti, 1995] **B. Anselmetti** " Génération automatique de Devis pour l'usinage sur MOCN " *Revue d'Automatique et de Productique Appliquée*. Vol 8, No. 1, pp. 81-100, 1995.

[Asiedu et Gu, 1998] **Y. Asiedu and P. Gu** "Product life cycle cost analysis: state of the art review" *International Journal of Prod. Res.*, Vol. 36, No. 4, pp. 883-908, 1998.

[Barthès *et al.*, 1999] **J. P. Barthès, R. Dieng, G. Kassel** Mémoire d'entreprise, Dossier n° 36, Association Française pour l'intelligence artificielle, 1999.

[Barthès *et al.*, 1995] **J.P. Barthès, M. Grundstein** Discussion Summary, 3rd International Symposium on the management of Information and Corporate Knowledge (ISMICK'95), Institut International pour l'Intelligence Artificielle, Octobre 23-24, Compiègne, France, 1995.

[Bellut, 1990] **S. Bellut** *la compétitivité par la maîtrise des coûts, conception à coût objectif et analyse de la valeur*, AFNOR Gestion, 1990.

[Bescos *et al*, 2000] **L. Ravignon, P.L. Bescos, M. Joalland, S. Le Bourgeois, A. Malejac** *Gestion par activités : la méthode ABC/ABM*, les Editions d'Organisation, 2000.

[Bescos et Mendoza, 1994] **P. L. Bescos, C. Mendoza** *Le management de la performance,* Editions Comptables Malesherbes, Paris, 1994.

[Bhimani et Pigott, 1992] **A. Bhimani, D. Pigott** "Implementing ABC: A case of study of organizational behavioural consequences" *Management Accounting Research,* Vol. 13, pp. 29-37, 1992.

[Blondaz, 1999] **L. Blondaz** Prise en compte de la fabricabilité, en conception intégrée de produits mécaniques, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble, 1999.

[Bodin, 1975] **M. Bodin** *Technique du devis en fabrication mécanique,* Entreprise Moderne d'Edition, Paris, 1975.

[Boerma, 1990] **J. R. Boerma** The design of fixtures for prismatic parts, Ph.D. Thesis, University of Twente, Netherlands, 1990.

[Boothroyd, 1982] **G. Boothroyd** "Economics of assembly Systems" *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 72-76, 1982.

[Bottecchia, 1984] **T. Bottecchia** *Guide pratique pour l'établissement rapide des devis,* Technique et Documentation (Lavoisier), 1984.

[Bouquin, 1997] **H. Bouquin** *La Comptabilité de Gestion,* Que sais-je ? Presses Universitaires de France, 1997.

[Brissaud, 1992] **D. Brissaud** Système de conception automatique de gammes d'usinage pour les industries manufacturières, Thèse de doctorat, Université J. Fourier- Grenoble 1, 1992.

[Brodier, 1994] **J. P. Brodier** Méthode de la VAD (Valeur ajoutée directe), Les devis en fabrication mécanique, Journée technique CETIM, Novembre 1994.

[Burbidge, 1975] **J. L. Burbidge** *The Introduction of Group Technology,* Wiley, New York, 1975.

[Carter et Baker, 1991] **D. Carter, B.S. Baker** *Concurrent Engineering*, New-York, Addison-Wesley WA, 1991.

[Chang, 1990] **T. C. Chang** *Expert Process Planning for Manufacturing,* Addison-Wesley, USA, 1990.

[Chen *et al.*, 2000] **K.-Z. Chen, X.-A. Feng and X.-C. Chen** A framework of design for life-cycle cost, Conference on Engineering Design and Automation, EDA2000, Orlando, Florida, USA, 2000.

[Chep, 1992] **A. Chep** Modèle de représentation et d'utilisation des connaissances nécessaires à la conception d'un processus de fabrication : application à la génération automatique de gammes d'usinage en tournage, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, LURPA, 1992.

[Cognition, 2000] **Cognition** *CostAdvantage, Modeler's Guide,* Société Cognition, Cognition Europe, 1 allée Jean Image, 77200 Torcy France.

[Cooper et Kaplan, 1989] **R. Cooper & R. S. Kaplan** "Mesurez vos coûts pour prendre les bonnes décisions" *Havard-Expansion*, été 1989.

[Cooper et Slagmulder, 1997] **R. Cooper, R. Slagmulder** "Target costing and value engineering" *Productivity Press, Portland & the IMA Foundation for Applied Research*, Montvale, 1997.

[Cooper, 1990] **R. Cooper** " Le contrôle de gestion ne répond plus", *Havard-Expension*, Eté 1990.

[Corbett, 1986] **J. Corbett** "Design for Economic manufacture", *Annals of CIRP*, Vol. 35, No. 1, 1986.

[Creese et Moore, 1990] **R. C. Creese & L. T. Moore** "Cost modeling for concurrent engineering" *Cost Engineering*, Vol. 32, pp. 23-27, 1990.

[Daschbach et Apgar, 1988] **J. M. Daschbach, H. Apgar,** "Design analysis through techniques of parametric cost estimation" *Engineering Costs and Production Economics,* Vol. 14, pp. 87-93, 1988.

[Debaene, 1981] **Debaene** "Analyse des coûts" *Techniques de l'ingénieur*, T4 200, Volume AG 6, Octobre 1981.

[Deneux, 1993] **D. Deneux** Méthodologie de reconnaissance de caractéristiques

d'usinage. Contribution à l'ingénierie simultanée, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 1993.

[Derras, 1998] **C. Derras** Formalisation de l'imprécision informationnelle et des incertitudes décisionnelle de connaissances expertes pour la génération de processus de fabrication, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.

[Dewhurst et Boothroyd, 1998] **P. Dewhurst, G. Boothroyd** "Early cost estimating in product design" *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 183-191, 1998.

[Duverlie, 1996] **P. Duverlie** Etude et proposition d'une méthode d'estimation du coût technique appliquée à la production mécanique et basée sur le raisonnement à partir de cas, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 1996.

[Ehrlenspie, 1987] **R. Ehrlenspiel** "Reduction of product costin west germany" *Proceedings of the 1987 international Conference on Engineering Design,* 16, 1987.

[Eversheim et Schneewind, 1993] **W. Eversheim, J.Schneewind** "Computer Aided Process Planning. State of the art and future development" *Robotics and Computer integrated manufacturing,* Vol. 10, No. 1-2, pp. 65-70, 1993.

[Evraert et Mévellec, 1990] **S. Evraert, P. Mevellec** "Calcul des coûts : il faut dépasser les méthodes traditionnelles" *Revue Française de Gestion*, mars-avril-mai, 12-24, 1990.

[Farineau, 2001] **T. Farineau** Etude et définition d'outils d'analyse économique en phase d'avant-projet appliques à la production mécanique : Application aux coûts d'usinage, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2001.

[Farreny et Ghallab, 1987] **H. Farreny, M. Ghallab** *Eléments d'Intelligence Artificielle*, Editions Hermès, Paris, 1987.

[Feng et Kusiak, 1995] **C. X. Feng, A. Kusiak** "Constraint-based design of part", *Computer-Aided-Design*, Vol. 27 , pp. 343-352, 1995.

[Feng *et al.*, 1996] **C. X. Feng, A. Kusiak, C. C. Huang** "Cost evaluation in design with form features" *Computer-Aided-Design*, Vol. 28 No. 11, pp. 879-885, 1996.

[Fievez et Chabanas, 1999] **J. Fievez, C. Chabanas** *"La méthode UVA : un système de gestion du profit"* Revue Française de Comptabilité, No. 316, 1999.

[Fievez *et al.*, 1999] **J. Fievez, J. P. Kieffer, R. Zaya** *La méthode UVA: du contrôle de gestion à la maîtrise du profit: une approche nouvelle en gestion,* Dunod, 1999.

[Fischer, 2000] **X. Fischer** Stratégie de conduite du calcul pour l'aide à la décision en conception mécanique intégrée application aux appareils à pression, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Bordeaux, 2000

[Fouet, 1997] **J. M. Fouet** *connaissances et savoir-faire en entreprise, intégration et capitalisation,* Hermès, 1997.

[Fry *et al.*, 1998] **T. D. Fry, D. C. Steele and B. A. Saladin** "The use of management accounting systems in manufacturing" *International Journal of Prod. Res.*, Vol. 36, No. 2, pp. 503-525, 1998.

[Gama, 1990] **Groupe Gama** *La gamme automatique en usinage,* Hermès, Paris, 1990.

[Gardoni, 1999] **M. Gardoni** Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation de savoir et savoir-faire en Ingénierie Intégrée : Cas d'étude Aérospatiale, Thèse de doctorat, Université de Metz, 1999.

[Gautier et Giard, 2000] **F. Gautier, V. Giard** Vers une meilleure maîtrise de coûts engagés sur le cycle de vie, lors de la conception de produits nouveaux, Cahier de recherche IAE-Paris, GREGOR, 2000/01, 2000.

[Gero, 1989] **J. S. Gero** *Artificial Intelligence in Design,* Computational Mechanics Publications, Spring Verlag, Southampton, UK, 1989.

[Gronnier et Hédin, 1999] **S. Gronnier and N. Hédin** "L'activity based costing pour une gestion stratégique de coûts" *Réflexions*, No. 63, septembre 1999.

[Halevi, 1999] **G. Halevi** "Relational CAPP (Computer Aided Process Planning) System" International Journal for Manufacturing Science & Production, Vol. 2, No. 4, pp. 171-187, 1999.

[H'mida *et al.*, 2001a] **F. H'mida, P. Martin, F. Vernadat** L'Estimation des Coûts : Un vecteur d'Intégration. Proposition d'une Approche, 7ème Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée (AIP-PRIMECA 2001), La Plagne, France, pp. 433-440, Avril 2001.

[H'mida *et al.*, 2001b] **F. H'mida, P. Martin, F. Vernadat** Développement d'un Cadre d'Estimation du Coût en Production Mécanique Basé sur le Concept Entité Coût, 3ème Conférence Francophone de MOdélisation et Simulation (MOSIM'01), Troyes, France, Volume 1, pp. 303-308, Avril 2001.

[H'mida *et al.*, 2001c] **F. H'mida, P. Martin, F. Vernadat** Cohérence entre Structure de l'Entreprise et Structure du Système de Coûts, 4ème Congrès International de Génie Industriel (GI2001), Aix-Marseille, France, pp. 627-636, Juin 2001.

[H'mida *et al.*, 2001d] **F. H'mida, P. Martin, F. Vernadat** Concept of a Cost Entity for Cost Estimation in Mechanical Production, IFIP International Conférence (FEATS 2001), Valenciennes, France, (CD-ROM), Juin 2001.

[H'mida *et al.*, 2001e] **F. H'mida, P. Martin, F. Vernadat** A Cost Entity Approach for Cost Estimation in Mechanical Production engineering, 5th International Conference on Engineering Design and Automation, (EDA2001) Las Vegas, Nevada, U.S.A, (CD-ROM), August 2001.

[H'mida *et al.*, 2002f] **F. H'mida, P. Martin, F. Vernadat** Structure et Analyse des coûts en Production Mécanique, Problèmes et Eléments de réponse, 2ème Conférence Internationale JTEA'02, Sousse, Tunisie, pp. 350-358, Mars 2002.

[Ham, 1982] **I. Ham** *Group technology,* In Handbook of Industrial Engineering, Chapter 7-8, Wiley, New York, 1982.

[Hauser et Clausing, 1988] **J. R. Hauser, D. Clausing** "The house of quality" *Havard Business Review*, Vol. 66, No. 3, pp. 63-73, 1988.

[Hayes et Wright, 1989] **C. C. Hayes, P. Wright** "Automating process planning : using feature interactions to guide search" *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-14, 1989.

[Helfer et Milot, 1996] **J. P. Helfer et J. P. Milot** Les principaux débats comptables, Cahier de recherche IAE-Paris, GREGOR, 1996/13, 1996.

[Hiromoto, 1988] **T. Hiromoto** "Another Hidden Edge – Japanese management accounting" *Havard Business Review*, pp. 22-26, 1988.

[Jonhson et Kaplan, 1987] **H. T. Jonhson, R. S. Kaplan** *Relevance lost, The rise and fall of managment accounting,* Havard Business School Press, 1987.

[Kato *et al.*, 1995] **Y. Kato & G. Bôer & C. W. Chow** "Target costing: An integrative management process" *Journal of Cost Mmanagement*, Vol. 9, No. 1, pp. 39-51, 1995.

[Kieffer et Iarozinsky, 1994] **J. P. Kieffer, A. Iarozinsky** Méthode des unités d'effort de production Les devis en fabrication mécanique, Journée technique CETIM, Novembre 1994.

[Kiritsis et Xirouchakis, 1996] **D. Kiritsis and P. Xirouchakis** A software prototype for cost estimation of process plans of machined parts, ISATA, 1996.

[Kiritsis et Xirouchakis, 1998] **D. Kiritsis and P. Xirouchakis** An incremental part manufacturing cost estimation algorithm using Petri Nets, Proceedings of DETC, Atlanta, Georgia, 1998.

[Kiritsis, 1993] **D. Kiritsis** A Review of knowledge-based expert systems for process planning, methods and problems, International report, Imeco, LCAO, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, March, 1993.

[Lacoste et Toledo, 1997] **G. Lacoste, C. Escobar-Toledo** La gestion du risque et le management de l'incertitude vers une approche méthodologique, 2ème Congrès International Franco-Québécois, Albi (France), 3-5 Septembre, 1997.

[Lallemand, 1998] **H. Lallemand** Méthodes de chiffrages et indicateur de la fonction DEVIS, Le Devis au cœur de la performance, Journée technique CETIM, Octobre 1998.

[Lebas, 1991] **M. Lebas** "Comptabilité analytique basée sur les activités" *Revue Française de Comptabilité*, septembre 1991.

[Leibl *et al.*, 1999] **P. Leibl, M. Hundal and G. Hoehne** "Cost calculation with a feature-based CAD system using modules for calculation, comparison and forecast" *Journal of Engineering Design*, Vol. 10, No. 1, pp. 93-102, 1999.

[Levant et de la Villarmois, 2000] **Y. Levant, O. de la Villarmois** Origine et développement d'une méthode de calcul des coûts : la méthode des Unités de Valeur Ajoutée (UVA), 6èmes Journées d'Histoire de la comptabilité et du management, 2000.

[Leveaux, 1992] **F. Leveaux** Contribution à la spécification géométrique des pièces mécaniques par simulation algorithmique du contrôle tridimensionnel, Thèse de Doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris 1992.

[Lorino, 1991] **P. Lorino** *Le Contrôle de Gestion Stratégique*, Dunod, 1991.

[Meisl, 1988] **C. J. Meisl** "Techniques for cost estimating in early program phases" *Engineering Cost and Production Economics*, Vol. 14, pp. 95-106, 1988.

[Mer *et al.*, 1995] **S.Mer, S.Tichkiewitich, A. Jeantet** *Les objets intermédiaires de la conception : Modélisation et communication* Le communicationnel pour concevoir, Editions Europia Production, 1995.

[METACOST, 1995] **METACOST**. Project ESPRIT EP P 4545 Contract BREU CT 91-0510, Deliverable Task 1-11, 1995.

[Mévellec, 1993] **P. Mévellec** "Plaidoyer pour une vision française de l'ABC" *Revue Française de Comptabilité* No. 251, décembre 1993.

[Mévellec, 1994] **P. Mévellec** De la nature des systèmes de coûts, Congrès EAA, Anvers, Avril, 1998.

[Milkoff, 1996] **R. Milkoff** Le concept de comptabilité de gestion à base d'activités, Rapport de recherche GREGOR, IAE Paris, 1996.

[Monteiro, 2001] **T. Monteiro** Conduite distribuée d'une coopération entre entreprise, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.

[Mony, 1992] **C. Mony** Un modèle d'intégration des fonctions conception-fabrication dans l'ingénierie de produit, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1992.

[Noble et Tanchoco, 1990] **J. S. Noble and J. M. A. Tanchoco** "Concurrent design and economic justification in developing a product" *International Journal of Prod. Res.*, Vol. 28, No. 7, pp. 1225-1238, 1990.

[Noreen, 1991] **E. Noreen** "Conditions under which ABC systems provide relevant costs" *Journal of management Accounting Research*, pp. 159-168, Fall 1991.

[O'Learny, 1998] **D. E. O'Learny** "Using AI in Knowledge Bases and ontologies" *IEEE Intelligent systems,* Vol. 13, No. 3, pp. 34-39, 1998.

[Oger, 1994] **B. Oger** *La gestion par l'analyse des coûts,* Presses Universitaires de France, 1994.

[Oh et Park, 1993] **C. J. Oh and C. S. Park** "An economic evaluation model for product design decisions under concurrent engineering" *The Engineering*

Economist, Vol. 38, No. 4, pp. 275-297, 1993.

[Ostwald, 1992] **P. Otswald** *Engineering cost estimating,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Niew Jersey, 1992.

[Ou-Yang et Lin, 1997] **C. Ou-Yang, T. S. Lin** "Developing an Integrated Framework for feature-based early manufacturing cost estimation" *International Journal of Advances Manufacturing Technology,* Vol. 13, pp. 618-629, 1997.

[Padilla et Thèly, 1978] **P. Padilla, A Thély** *Guide des fabrications mécaniques,* Editions DUNOD, 1978.

[Pallot, 1988] **B. Pallot** Prédétermination des temps d'usinage relatifs aux séries limitées, application au tournage numérique, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 1998.

[Paris, 1995] **H. Paris** Contribution à la conception automatique des gammes d'usinage : le problème du posage et du bridage des pièces, Thèse de doctorat, Université J. Fourier Grenoble 1, 1995.

[Park et Kim, 1995] **C. S. Park, G. T. Kim** "An economic evaluation model for advanced manufacturing systems using activity-based costing" *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 6, pp. 439-451, 1995.

[Pesqueux, 1990] **Y. Pesqueux** Le coût, mesure ou évaluation ?, Cahier de recherche du groupe HEC, CR 352/1990, 1990.

[Porter, 1986] **M. Porter** *L'avantage concurentiel,* Inter Edition, 1986.

[Pugh, 1974] **S. Pugh** Manufacturing cost information : the needs of the engineering designer, Proceedings of information systems for designers, Southampton, Paper 12, 1974.

[Ramarapu *et al.*, 1997] **N. Ramarapu, M. Raisinghani, M. Frolic, S. S. Prabhu** "Integration of case-based reasoning with object-oriented database management systems for efficient management of large case bases" *International Journal of Material and Product Technology,* Vol. 12, NR 4-6, pp. 298-306, 1997.

[Rellier, 1996] **J. P. Rellier** *Con'flex Manuel de l'utilisateur,* INRA- Laboratoire BIA, Toulouse, France, 1996.

[Sabourin, 1995] **L. Sabourin** L'expertise en conception de gammes d'usinage: approche par entités et propagation de contraintes, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 1995.

[Seddiki, 1995] **A. Seddiki** Elaboration d'une interface logiciel d'étude de devis des pièces usinées sur tour à commande numérique, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Ars et Métiers, Chalons sur Marne, 1995.

[Senechal, 1996] **O. Senechal** Proposition d'une méthodologie pour l'aide à l'estimation des performance physico-économiques des systèmes de production dans une approche concourante. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 1996.

[Slade, 1991] **S. Slade** "Case based reasoning: a research paradigm" *AI magazine*, Vol. 12, No. 1, pp 42-55, 1991.

[Steels, 1993] **L. Steels** Corporate knowledge management, Proceedings of ISMICK'93, pp. 9-30, Compiègne, France, 1993.

[Stewart *et al.*, 1995] **R. D. Stewart, R. M. Wyskida, J. D. Johannes** *Cost estimator's : Reference manual,* John Wiley & Sons, USA, 1995.

[Subbaraman *et al.*, 1998] **M. Subbaraman, R. Paramaguru, S. Anand, P. C. Quo** CAD directed on line cost estimation using activity based costing, Proc. Of 5th Industrial Engineering Research Conference, pp. 781-786, 1998.

[Subrahmanyam et Wozny, 1995] **S. Subrahmanyam & M. Wozny,** "An overview of automatic feature-recognition techniques for computer-aided process planning" *Computers in Industry*, Vol. 26, No. 1, pp. 1-21, 1995.

[Talbi *et al.*, 1999] **A. Talbi, A. Hammouche, C. Tahon** Vers une modélisation de l'intégration des fonctions de l'entreprise basée sur le concept de la technologie de groupe, 2ème Conférence francophone de MOdélisation et Simulation (MOSIM'99), Annecy, Octobre 1999.

[Tollenaere, 1998] **PRIMECA** *Conception de Produits Mécaniques : Méthodes, Modèles et Outils,* sous la direction de M. Tollenaere, Editions Hermes, 1998.

[Tseng et Jiang, 2000] **Y.-J. Tseng, B. C. Jiang** "Evaluating multiple feature-based machining methods using an activity-based cost analysis model" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, pp. 617-623, 2000.

[Ulrich et Fine, 1990] **K. T. Ulrich & C. H. Fine** Cost estimation tools to support product design, The ASME Manufacturing International Conference, March, 1990.

[Vacossin et Padilla, 1994] **B. Vacossin, P. Padilla** "Personnalisez votre fonction Devis" *CETIM-Informations*, No. 139, Juin 1994.

[Vacossin, 1994] **B. Vacossin** Les différentes méthodes utilisables en devis, Les devis en fabrication mécanique, Journée technique CETIM, Novembre 1994.

[Vargas, 1995] **C. Vargas** Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques : Mise œuvre basée sur la propagation de contraintes, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 1995.

[Veeramani et Joshi, 1996] **D. Veeramani, P. Joshi** "Methodologies for rapid and effective response to requests for quotqtion (RFQs)" *IIE Transactions*, Vol. 29, pp. 825-838, 1996.

[Venkateswara et Park, 1995] **S. V. Venkateswara, C. S. Park** "Economics of product design" *Engineering Design and Automation*, John Wiley & Sons, Inc, Vol. 1, No. 4, pp. 223-238, 1995.

[Vernadat, 1999] **F. Vernadat** *Techniques de modélisation en entreprise: applications aux processus opérationnels,* Economica, 1999.

[Villeneuve, 1994] **F. Villeneuve** "Génération automatique de gamme: état de l'art et perspectives futures" *Mécanique Industrielle et Matériaux*, Vol. 47, No.

5, Décembre 1994.

[Wei et Egbelu, 2000] **Y.Wei, P. J. Egbelu** "A framework for estimating manufacturing cost from geometric design data" *International Journal Computer Integrated Manufacturing,* Vol. 3, No. 1, pp. 50-63, 2000.

[Westney, 1983] **R. E. Westney** "Computer-aides design – A new tool for the cost engineer?" *Engineering Costs and Production Economics*, Vol. 7, pp. 205-212, 1983.

[Wierda, 1988] **L. S. Wierda** "Product cost-estimation by the designer" *Engineering Costs and Production Economics*, Vol. 13, pp. 189-198, 1988.

[Wierda, 1990] **L. S. Wierda** "Design-oriented cost information : The need and the possibilities" *Journal of Engineering Design*, Vol. 1, No. 2, pp. 147-167, 1990.

[Wierda, 1991] **L. S. Wierda** "Linking design, process plannind and cost Information by feature-based modelling" *Journal of Engineering Design*, Vol. 2, No. 1, pp. 3-19, 1991.

[Wong *et al.*, 1996] **C. C. Wong, V. Chalermdamrichai, D. Veermani** QUESTER: a computer-integrated system for virtual shopping through the internet, Proceedings of the Industrial Engineering Research Conference, Minneapolis, pp. 758-763, 1996.

[Zhang *et al.*, 1996] **Y. F. Zhang, J. Y. H. Fuh, W. T Chan** "Feature-Based Cost estimation for packaging products unsing neural networks" *Computers in Industry*, Vol. 32, pp. 95-113, 1996.

ANNEXE : LA METHODE UVA

Construction de la méthode UVA®

I. La méthode UVA® vise dans un premier temps à mesurer toutes les activités de l'entreprise avec une seule unité de référence [Fievez *et al.*, 1999].

Cette unité, appelée UVA (Unité de Valeur Ajoutée), correspond aux consommations de ressources nécessaires à la réalisation d'un produit ou d'un service représentatif de l'activité de l'entreprise. Le montant de ces consommations est le taux de l'UVA.

La construction de la méthode UVA® consiste à valoriser en UVA les postes UVA, les gammes opératoires, les produits, les services apportés aux clients.

Un Poste UVA est un ensemble homogène de moyens matériels et humains. Le rapport entre les ressources consommées par un poste UVA et celles consommées par l'unité de référence (le taux de l'UVA) nous donne l'indice UVA (par Unité d'Œuvre) de ce poste UVA.

L'entreprise est constituée d'une somme de postes UVA.

Une gamme opératoire est une suite d'opérations, réalisées sur des postes dans un temps donné. Chaque opération génère des UVA en fonction de l'indice du poste et des unités d'œuvre consommées (généralement du temps). La somme de toutes les UVA de toutes les opérations correspond à l'équivalent UVA de la gamme opératoire.

L'entreprise fonctionne comme un réseau de gammes opératoires.

Un produit est une somme de gammes opératoires pour le concevoir, l'industrialiser, le fabriquer, le contrôler, ... Un produit vaut ***a*** UVA.

Un service client est une somme de gammes opératoires pour le commercial, le traitement de la commande, la livraison, ... C'est un service fourni par l'entreprise au client au sens le plus large. Un service client vaut ***b*** UVA.

La méthode UVA® permet de mesurer toutes les UVA générées par l'activité de l'entreprise pendant une période (Schéma 1) : *les UVA produites*. C'est la somme des valeurs en UVA des produits fabriqués ($A_{uva} = \sum *a_{uva}$) plus la somme des valeurs UVA des services apportés aux clients ($B_{uva} = \sum *b_{uva}$).

$$UVA\ produites = A_{uva} + B_{uva} = P$$

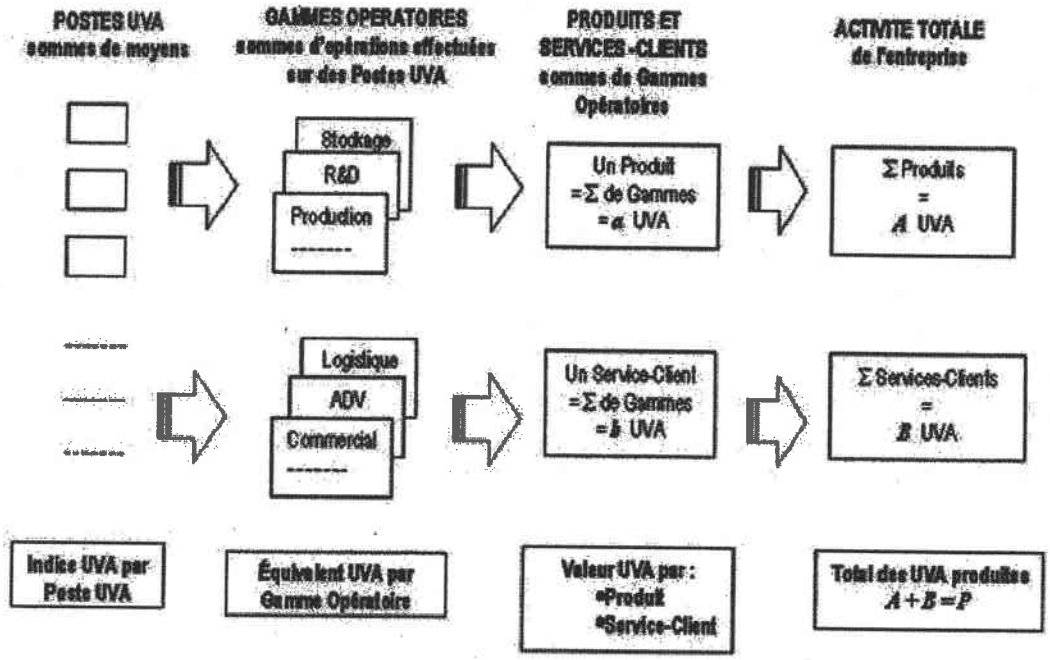


Schéma 1 : Les UVA produites

II. La méthode UVA s'attache, dans un deuxième temps à calculer le résultat généré par chaque vente.

Ainsi, après avoir valorisé toute l'activité de l'entreprise en UVA, procède-t-elle au calcul du coût de l'UVA.

Le coût de l'UVA s'obtient par la division des charges de la comptabilité générale pour une période donnée (déduction faite des achats externes) par le total des UVA produites pour cette même période.

Le calcul du coût se fait pour une période de 12 mois glissant dans le but de lisser les variations de ce dernier qui pourraient survenir d'un mois à l'autre. Cette période devant correspondre à un cycle complet de l'activité de l'entreprise, la durée de 12 mois n'est qu'indicative quoique la plus fréquemment utilisée dans la réalité.

Ce calcul permet d'obtenir le coût monétaire des produits et des services-clients par une multiplication entre la valeur du produit ou service-client (c'est-à-dire une quantité d'UVA) et le coût de l'UVA.

Le coût d'une vente est composé des coûts des produits constituant la vente et des services-client qu'elle a consommés.

Le résultat d'une vente est la différence entre le montant facturé et les coûts engendrés par cette vente, c'est-à-dire les coûts liés aux produits et aux services apportés au client (schéma 2).

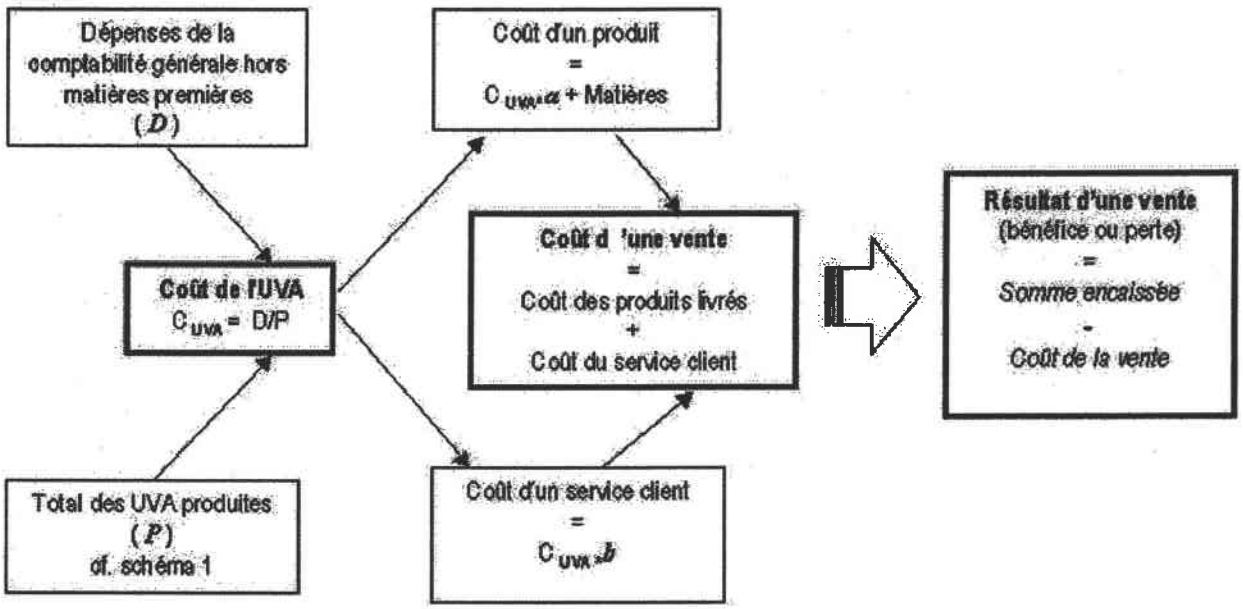


Schéma 2 : Résultat d'une vente

Exploitation de la méthode UVA®

I. La méthode UVA développe des outils appropriés pour le pilotage de l'entreprise :

- des tableaux de bord pour le suivi de la production/productivité, l'évolution des coûts ...
- la courbe de rentabilité des ventes : une information synthétique sous forme graphique présentant les ventes à perte et les ventes bénéficiaires (Schémas 3,4).

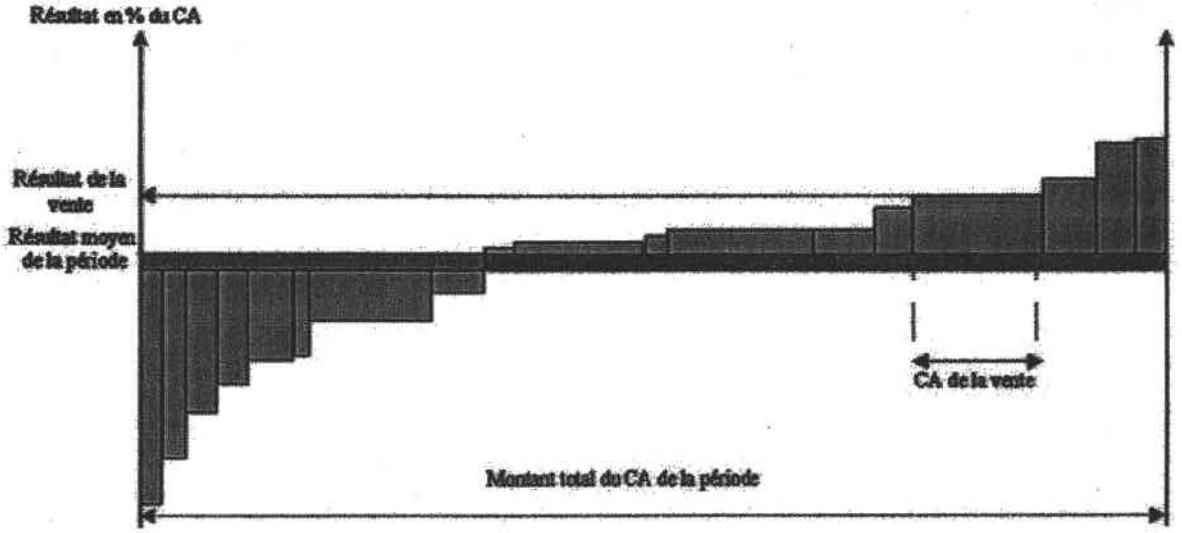


Schéma3 : Exemple de construction de la courbe de rentabilité des ventes

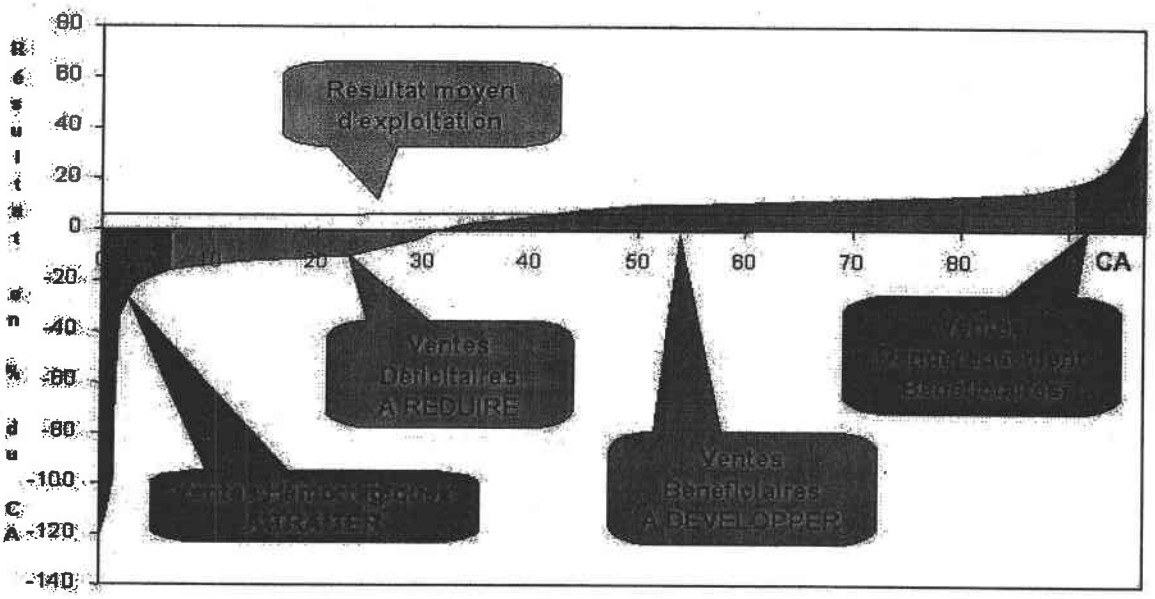


Schéma 4 : Exemple d'analyse de la courbe de rentabilité des ventes

La méthode UVA® permet de :

- Mesurer toute l'activité de l'entreprise;
- Tracer la courbe de rentabilité des ventes par client, marché, zone géographique…;
- Identifier et quantifier les différents types de ventes;

Titre : Contribution à l'estimation des coûts en production mécanique : L'approche Entité Coût appliquée dans un contexte d'ingénierie intégrée

Résumé :

Les coûts estimés guident les orientations et les décisions de deux fonctions stratégiques de l'entreprise manufacturière : la Conception et le Devis. Le rôle économique de la conception est primordial. Elle conditionne 70 à 80 % des coûts d'un produit. En devis, un coût sous-estimé se traduit par des pertes, un coût sur-estimé empêche l'entreprise d'être compétitive lors d'une soumission.

Les outils d'estimation actuels ne permettent pas une analyse causale des coûts qui est nécessaire à des modifications éventuelles ciblées en conception. D'autre part, la croissance des coûts indirects rend illusoire l'utilisation de règles normatives issues de la comptabilité analytique. Face à cette problématique, une nouvelle approche d'estimation des coûts en production mécanique est proposée dans un cadre d'ingénierie intégrée et dans le contexte actuel de croissance des coûts indirects. Le nouveau concept *Entité Coût* employé permet de formaliser l'expertise d'estimation des coûts liés aux diverses activités de production. L'objectif, qui est d'établir autour du produit estimé un lien étroit entre les variables techniques (entités de fabrication) et les variables économiques (Entités coût), nous a amené à la modélisation des connaissances et des raisonnements du domaine d'estimation des coûts.

Les modèles produit et costgrammes présentés capitalisent ces connaissances. Le premier porte sur la construction du produit sur la base des entités de fabrication et le deuxième permet d'avoir une vue globale de toutes les Entités Coût concernées par le traitement du produit. Le raisonnement relatif à l'estimation des coûts des processus de production alternatifs d'un produit a été modélisé sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes. Nous avons défini trois types de contraintes : contraintes de fabrication, contraintes de production et contraintes de coût. Les solutions du problème sont classées par ordre de satisfaction économique. A chaque processus de production solution, il lui correspond une estimation de coûts ascendante dans le modèle costgrammes. Notre objectif à travers cette démarche est de cerner les causalités et d'assurer la traçabilité des coûts. L'implantation sur une plate-forme informatique de la méthode proposée fournit un prototype original d'aide à la décision économique en conception détaillée et l'assistance à l'élaboration de devis.

Mots clés : Estimation des coûts, Ingénierie intégrée, Entité Coût, Entité de fabrication, Conception, Devis, Systèmes experts, Problèmes de satisfaction de contraintes (CSP).

Title: Contribution to cost estimation in mechanical production: The Cost Entity approach applied to the integrated engineering context

Abstract:

Estimated costs condition the orientations and decisions of two strategic functions of manufacturing companies: Design and Quotation. The economic role of design is of paramount importance. It conditions up to 70 to 80 % of the product costs. Regarding quotation, under-estimating costs results in losses, over-estimating costs prevents the company to be competitive for calls for tenders.

The current estimation tools do not allow a causal analysis of the costs, which is required to analyse possible targeted modifications in design. Moreover, the growth of indirect costs makes the use of simple normative rules resulting from cost accounting systems an illusion. To face this problem, a new approach for cost estimation in mechanical production is proposed within the framework of integrated engineering and in the current context of indirect cost growth. A new concept, called *Cost Entity*, is proposed as a unified process of direct and indirect costs. It allows us to formalise cost estimation expertise related to the various production activities. The objective, which is to establish, on the basis of the estimated product, a close link between technical variables (manufacturing features) and economic variables (Cost Entities), has led us to model the knowledge and the reasoning of cost estimation.

The product and costgramme models presented capitalise this knowledge. The first model is based on manufacturing features and the second model allows us to have a global view of all Cost Entities concerned by the product processing. The cost estimation reasoning for the alternative production processes of a product has been modelled as a Constraint Satisfaction Problem (CSP). Three types of constraints have been defined: manufacturing constraints, production constraints and cost constraints. The solutions of the problem are ranked by economic satisfaction order. To each solution production process corresponds a bottom-up estimation of costs in the costgramme model. Our objective is to determine the causalities and to ensure the traceability of the costs. The development of a software environnement for the suggested method provides an original prototype of an economic decision support system during detailed design and for the assistance to quotation activities.

Key-words: Cost estimation, Integrated engineering, Cost Entity, Manufacturing features, Design, Quotation, Expert systems, Constraint Satisfaction Problems (CSP)