

ASSEMBLAGE

soudage

$$\Delta = t \sqrt{\lambda_1 \Delta r^2 + \lambda_2 \varepsilon_p^2 + \lambda_3 \Delta y^2 + \lambda_4 \Delta u^2 + \lambda_5 \delta T^2 + \lambda_6 (\dot{a} \Delta F)^2}$$

Fabrication avancée et méthodes industrielles

Tome 1

Du dossier produit au dossier fabrication

fonderie

USINAGE

Christian
Mascle
Walery
Wygowski



Christian
Masclé
Walery
Wygowski

**Fabrication
avancée
et méthodes
industrielles
Tome 1**

Du dossier produit au dossier fabrication



PRESSES INTERNATIONALES
POLYTECHNIQUE

Fabrication avancée et méthodes industrielles – Du dossier produit au dossier fabrication, tome 1
Christian Mascle, Walery Wygowski

Équipe de production

Coordination éditoriale et production : Luce Venne-Forcione
Correction d'épreuve : Nicole Blanchette
Couverture : Cyclone Design
Mise en pages : Martine Aubry

Pour connaître nos distributeurs et nos points de vente, veuillez consulter notre site Web à l'adresse suivante :
polymtl.ca/pub

Courriel des Presses internationales Polytechnique : pip@polymtl.ca

Nous reconnaissons l'aide financière du gouvernement du Canada par l'entremise du Fonds du livre du Canada pour nos activités d'édition.

Gouvernement du Québec – Programme de crédit d'impôt pour l'édition de livres – Gestion SODEC.

Tous droits réservés

© Presses internationales Polytechnique, 2012

On ne peut reproduire ni diffuser aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit, sans avoir obtenu au préalable l'autorisation de l'éditeur.

Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2012
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
Bibliothèque et Archives Canada

ISBN 978-2-553-01551-9 (version imprimée)
ISBN 978-2-553-01630-1 (version pdf)
Imprimé au Canada

Notes biographiques

Christian Mascle est professeur titulaire au Département de génie mécanique de l'École Polytechnique de Montréal. Il a obtenu son premier diplôme d'ingénieur en microtechnique de l'École d'ingénieurs du Locle (Suisse) en 1978, son baccalauréat en génie mécanique de l'École Polytechnique de Montréal en 1982 et son doctorat ès sciences en microtechnique de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) en 1990. Il a acquis son expérience initiale à l'occasion de différents stages dans l'industrie des turbines hydrauliques, du polissage de pièces et du raffinage pétrolier; par la suite, il a travaillé successivement comme associé de recherche en biomécanique à l'École Polytechnique de Montréal, comme professeur adjoint à l'École Polytechnique de Thiès (Sénégal), comme assistant professeur à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, puis il a obtenu un poste de professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières, avant de revenir à son *alma mater*, l'École Polytechnique de Montréal. Au cours de sa carrière universitaire, il a enseigné l'industrialisation des produits, la fabrication industrielle, la conception et les méthodes d'assemblage, la méthodologie du design, les éléments de machines et les systèmes hydrauliques. Ses intérêts en recherche comprennent la détermination de gammes et de ressources en fabrication et en assemblage, la modélisation et la conception des produits pour l'ensemble de leur cycle de vie, le traitement des produits en fin de vie et la méthodologie de conception, tant dans le domaine de l'aérospatiale que dans ceux de l'automobile, du matériel informatique et de la microtechnique. Il est membre de l'Ordre des ingénieurs du Québec (OIQ) et du Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG).

Walery Wygowski est enseignant au Département de génie mécanique et au Service de la formation continue de l'École Polytechnique de Montréal. Il cumule plus de 40 ans d'expérience pédagogique en enseignement du génie mécanique dans plusieurs universités à travers le monde. Il a travaillé comme maître de conférences, puis comme professeur à l'Université technique d'État de Moscou Bauman (Russie); il a aussi été professeur à l'École normale supérieure technique de Laghouat (Algérie) ainsi que professeur et chef de la section fabrication à l'Institut Polytechnique Gamal A. Naser de Conakry (Guinée). Il a obtenu ses diplômes d'ingénieur mécanicien (1961) et de docteur ès sciences techniques (1966) de l'Université technique d'État de Moscou Bauman de même qu'un doctorat en sciences appliquées de l'École Polytechnique de Montréal (2005). Ses intérêts en recherche comprennent la conception, la fabrication et l'industrialisation de produits dans les domaines de l'aérospatiale, du nucléaire et d'autres industries de produits complexes. Il est l'auteur principal du livre *Technologie des réacteurs nucléaires* (publié en russe par Atomizdat, Moscou, en 1992) et du *Dictionnaire français-russe – russe-français de la technologie de pointe* (publié par ETS, Moscou, en 1997) qui comporte plus de 120 000 termes. Il a aussi élaboré les notes des cours *Processus de fabrication mécanique*, *Technologie de construction mécanique* et *Éléments de machines* de l'École Polytechnique de Montréal. Il est membre de l'Ordre des ingénieurs du Québec.

Avant-propos

Objectifs

Lorsqu'on entend le mot « innovation », on pense souvent « nouveau produit ». Mais pour être compétitif, un industriel pense plutôt « amélioration de la productivité, de la qualité, de l'adaptabilité et de la responsabilité ». Cette innovation est donc parfois dans le produit, mais de manière beaucoup plus courante, pour un chef d'entreprise, elle est surtout dans les moyens de production, c'est-à-dire les procédés et les méthodes de fabrication de pointe.

Comment comprendre la réalité de la fabrication industrielle et du travail du bureau des méthodes? Comment transformer des matières premières minérales en produits fabriqués fonctionnels? Enfin, comment élaborer le dossier de fabrication à partir du dossier produit issu du bureau d'études? C'est ce que le lecteur apprendra en parcourant les différents chapitres de ce livre consacré à la fabrication et aux méthodes de pointe.

Le présent ouvrage répond à un besoin dans la formation en industrialisation du produit, une formation de spécialité en ingénierie, souvent négligée dans le cursus et pourtant essentielle à la formation. Il fournit les fondements théoriques et de nombreux exemples d'applications nécessaires à la bonne compréhension des disciplines suivantes :

- fabrication mécanique avancée;
- assemblage et production automatisée;
- fabrication assistée par ordinateur et machines-outils;
- contrôle dimensionnel;
- réingénierie des systèmes mécaniques.

Les objectifs recherchés sont avant tout pédagogiques : il s'agit de mettre à la disposition des étudiants en génie un ouvrage donnant les bases du cycle complet de l'industrialisation des produits, c'est-à-dire le passage des données de la maquette numérique du dossier produit au dossier de fabrication. C'est le travail qu'exécute en général le bureau des méthodes d'une entreprise. L'ouvrage, qui sera suivi d'un autre traitant d'études de cas, convient très bien aux ingénieurs de la pratique industrielle qui désirent compléter ou consolider leurs connaissances, qu'ils soient issus du domaine du génie mécanique, du génie industriel ou du génie des matériaux; il comporte une mine de renseignements pour tout ingénieur confronté aux problèmes d'industrialisation d'un produit et de fiabilité des machines de production.

Description

Jusqu'à maintenant, il n'existait pas de livres en français couvrant l'ensemble de la fabrication, de l'élaboration d'un brut à l'assemblage d'un produit. Non seulement ce livre propose-t-il une description de l'ensemble des procédés, mais il présente aussi, dans de nombreux cas, les moyens de calculer les principaux paramètres d'élaboration ou de contrôle des pièces.

L'ouvrage, divisé en deux tomes, a pour objet la fabrication industrielle et l'industrialisation des produits des génies mécanique et industriel. Dans le premier tome, l'introduction à la compétitivité industrielle et à l'importance de la seconde transformation des métaux constitue une entrée en matière et une sensibilisation aux grands enjeux de la survie d'une entreprise. L'analyse de la qualité d'un produit, l'introduction à ISO 9000 et la conception des gabarits de contrôle des pièces établissent un lien nécessaire entre la fonctionnalité numérique, la fabrication et la fonctionnalité réelle qui n'a rien de virtuel. Ce lien permet l'indispensable vérification de l'industrialisation du produit.

Toute fabrication de produit commence par un certain nombre de procédés d'obtention de pièces brutes. Ces pièces doivent avoir, à l'état brut, des formes qui dépendent étroitement de leur procédé d'obtention.

Le lecteur apprendra à connaître les différentes technologies industrielles disponibles et les règles de conception permettant de définir les formes des bruts et d'en calculer les dimensions et les tolérances.

Le comportement fonctionnel des pièces et l'apparence générale du produit imposent que les pièces soient finies, et parfois polies, à l'aide de procédés d'usinage. Les différents types de machines-outils, leur précision et ses paramètres, les opérations d'usinage et les outils utilisés sont décrits en détail.

De même, le comportement fonctionnel des pièces, leur usure et leur fiabilité dépendent de leur conception et du soin apporté à leur fabrication. L'obtention d'un bon état de surface et la problématique de la fiabilité technologique des pièces et des machines-outils sont abordées dans une perspective d'amélioration continue de la qualité et de la fiabilité.

La compétitivité d'une entreprise industrielle exige une amélioration de la productivité, de la qualité, de l'adaptabilité et de la responsabilité vis-à-vis du public et des générations futures. Dans le deuxième tome, nous abordons donc la productivité, qui est certainement le paramètre dont on entend le plus parler à tous les échelons de l'activité publique et industrielle. Pour améliorer la productivité, il faut être capable de la mesurer et savoir comment l'accroître. Dans l'industrie, l'ingénieur se préoccupe du coût de fabrication, du coût de production, du prix de revient, ou coût unitaire, et du coût technologique, selon le contexte. Ce contexte-là est déterminé par la stratégie ou la tactique de l'entreprise. Nous présentons trois définitions appropriées aux notions qui reflètent les difficultés de l'estimation des coûts.

Ayant abordé les procédés d'usinage, le lecteur voudra approfondir ses connaissances et s'enquérir des montages d'usinage disponibles pour positionner une pièce et la brider. L'ouvrage l'amènera à comprendre les fondements de l'isostatisme et, pour les cas limites, le calcul des forces de serrage.

Vient ensuite la question de la séquence des opérations : dans quel ordre et au cours de quelle phase une surface donnée doit-elle être usinée? C'est là le domaine des processus d'usinage et de l'analyse de fabrication. À l'aide des renseignements contenus dans l'ouvrage, le lecteur pourra établir la charte de tolérances lui permettant de calculer les dimensions des cotes opérationnelles.

Enfin, les pièces doivent être assemblées; c'est l'objet de l'avant-dernier chapitre du livre, dans lequel il est surtout question des procédés de soudage. Quant au dernier chapitre, il amènera le lecteur à parcourir un domaine, qui tout en sortant parfois du génie mécanique, traite malgré tout des procédés d'élaboration d'une pièce ou de sa finition. Il y sera question des procédés d'usinage non conventionnels, des revêtements par plasma et de l'ébavurage.

Chacun des chapitres se termine par une auto-évaluation qui contient des questions ou des problèmes accompagnés ou non de réponses partielles ou complètes, avec ou sans commentaires.

Remerciements

Cet ouvrage n'a pu être conçu que grâce à l'appui et au travail de nombreux professeurs et enseignants qui se sont succédé dans l'enseignement des cours *Procédés de fabrication mécanique* et *Fabrication et métaux*; nous pensons en particulier à MM. Claude Morel et Luc Baron, qui ont contribué à l'élaboration, à l'amélioration et à la correction des notes de ces cours, mais aussi à nos collègues du Laboratoire de recherche en fabrication virtuelle pour le soutien qu'ils nous ont apporté, tant par leur aide que par leurs conseils et leurs idées.

Les auteurs tiennent aussi à remercier M. André Wygowski pour la préparation des figures et son aide désintéressée dans la résolution de problèmes informatiques de toute nature.

Enfin, les auteurs remercient toute l'équipe des Presses et ses collaborateurs, dont M^{me} Nicole Blanchette, qui a effectué la révision et la correction d'épreuves du texte avec beaucoup de professionnalisme, M^{me} Martine Aubry, qui a fait la saisie des corrections et la mise en pages du manuscrit et, bien sûr, M^{me} Luce Venne-Forcione chargée, entre autres, de notre projet; elle nous a conseillé et a effectué les révisions des révisions, tout en essayant de concilier nos frustrations et les raisons d'État de l'édition, mais aussi les multiples notes manuscrites des réviseurs et des auteurs.

Table des matières

Notes biographiques	III
Avant-propos	V
Remerciements	VII
Liste des principaux symboles et abréviations	XIII
Introduction	XV
Chapitre 1 Fabrication industrielle	1
1.1 Introduction	1
1.2 Compétitivité des entreprises	1
1.2.1 Qualité	3
1.2.2 Productivité	5
1.2.3 Adaptabilité	5
1.2.4 Responsabilité environnementale	7
1.3 Phases d'élaboration d'un produit	8
1.3.1 Service commercial (phases 1 et 5)	9
1.3.2 Bureau d'études (phase 2)	11
1.3.3 Bureau des méthodes (phase 3)	12
1.3.4 Production (phase 4)	15
1.3.5 Flux d'activités dans l'entreprise	16
1.4 Dossier produit	19
1.4.1 Dessins de définition	19
1.4.2 Nombre de pièces commandées	20
1.4.3 Délais de fabrication	21
1.4.4 Travail en succession ou travail en parallèle	21
1.4.5 Matière d'œuvre	22
1.4.6 Présentation des bruts	22
1.5 Rôles du bureau des méthodes	24
1.6 Conclusion	27
Autoévaluation	28
Chapitre 2 Modèle qualité	31
2.1 Introduction	31
2.2 Concept de qualité totale	31
2.3 Modèle qualité et techniques associées	33
2.3.1 AMDEC	38
2.3.2 Méthode de Taguchi	40
2.3.3 Qualité six sigma	42
2.4 Normes ISO 9000	43
2.5 Structure de la série ISO 9000	43
2.5.1 ISO 9001:2000 et ISO 9004:2000	43
2.5.2 Documentation	45
2.6 Choix d'un modèle qualité	45
2.7 Implantation d'un modèle qualité	46
2.7.1 Manuel qualité (ISO 9001:2000, paragraphe 4.2.2)	47
2.7.2 Procédures organisationnelles et responsabilités	47
2.7.3 Instructions de travail	48
2.7.4 Échéancier	49

2.8	Certification.....	50
2.8.1	Registres.....	50
2.8.2	Processus de certification	51
2.9	Conclusion.....	54
	Autoévaluation.....	55
	Réponses	56
Chapitre 3 Gabarit.....		57
3.1	Introduction	57
3.2	Norme de tolérancement géométrique.....	57
3.2.1	Lacunes du tolérancement dimensionnel.....	58
3.2.2	Classes et symboles	60
3.2.3	Système de références	61
3.2.4	État virtuel et état résultant.....	63
3.2.5	Règles d'interprétation	66
3.3	Construction des gabarits	69
3.3.1	Classification	69
3.3.2	Calcul de calibres tolérancés avec ajout d'une surépaisseur d'usure pour le contrôle dimensionnel	70
3.3.3	Calcul de calibre (gabarit) tolérancé fonctionnel de position (calibre d'assemblabilité)	75
3.4	Conclusion.....	88
	Autoévaluation.....	88
	Réponses	90
Chapitre 4 Procédés d'obtention d'une pièce brute.....		95
4.1	Introduction	95
4.2	Choix du procédé d'obtention d'une pièce brute	95
4.3	Laminage.....	96
4.4	Forgeage libre.....	100
4.5	Estampage à chaud et autres opérations de déformation.....	107
4.5.1	Technologie des bruts estampés	107
4.5.2	Règles applicables aux bruts estampés.....	112
4.6	Roulage et fluotournage	116
4.7	Formage à haute énergie.....	120
4.7.1	Formage par explosion	120
4.7.2	Formage électrohydraulique.....	121
4.7.3	Formage électromagnétique	123
4.8	Moulage.....	125
4.8.1	Moulage en sable.....	129
4.8.2	Moulage en carapace (<i>croning</i>).....	131
4.8.3	Moulage à la cire perdue	136
4.8.4	Moulage en coquille	142
4.8.5	Moulage sous pression	144
4.8.6	Règles simples de conception de pièces moulées.....	148
4.8.7	Surépaisseur d'usinage et tolérancement du brut	152
4.9	Conclusion.....	159
	Autoévaluation.....	160
	Réponses	163
Chapitre 5 Procédés d'usinage conventionnels		167
5.1	Introduction	167
5.2	Matériaux de la partie active des outils	167

5.3	Tournage	170
5.4	Fraisage	174
5.5	Perçage et alésage	179
5.6	Filetage et taraudage	185
5.6.1	Filetage	186
5.6.2	Taraudage	188
5.6.3	Machines-outils	189
5.7	Brochage	190
5.8	Taillage des engrenages	193
5.9	Rectification	199
5.10	Conclusion	203
	Autoévaluation	204
	Réponses	204
Chapitre 6 Précisions de fabrication et d'assemblage		207
6.1	Introduction	207
6.2	Précision d'usinage	207
6.2.1	Précisions dimensionnelle et géométrique	208
6.2.2	Mesure de la précision	215
6.2.3	Estimation de la précision par méthode statistique	223
6.2.4	Erreurs primaires de la précision d'usinage	230
6.2.5	Stratégie de diminution des erreurs primaires d'usinage	287
6.2.6	Modèles de calcul de la précision d'usinage	294
6.3	Précision en prototypage rapide	312
6.4	Précision d'assemblage	314
6.5	Conclusion	329
	Autoévaluation	329
	Réponses	336
Chapitre 7 État de surface et facteurs appropriés		337
7.1	Introduction	337
7.2	État de surface	337
7.2.1	Influence de l'état de surface sur le fonctionnement des pièces	342
7.2.2	Influence des facteurs technologiques sur l'état de surface	350
7.2.3	Mesure de l'état de surface et de la contrainte résiduelle	360
7.3	Augmentation technologique de la durée de vie des produits	365
7.4	Mise au point pour la fiabilité des produits spéciaux	367
7.4.1	Complexité de conception des produits spéciaux	367
7.4.2	Stratégie moderne	369
7.5	Conclusion	374
	Autoévaluation	375
	Réponses	377
Annexe A Présentation des aciers finis à froid		379
Annexe B Précision d'usinage et qualité		387
Bibliographie		419
Index		425

Liste des principaux symboles et abréviations

Symbole ou abréviation	Définition
ΔI	Méthode de sommation arithmétique des distorsions de cotes ($\pm$ <i>Worst Case</i>)
AC	Approche basée sur la charte de tolérances et la méthode EP avec la sommation probabiliste des erreurs primaires
AF	Assemblage automatique par machine à transfert libre
AFNOR	Association française de normalisation
AI	Assemblage automatique par machine à indexage synchronisé
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AP	Assemblage programmable par unités de travail multispécialisées
AR	Acier rapide / Assemblage robotisé
ARS	Acier rapide supérieur
AS	Assemblage symbiose (manuel/automatique)
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
BD	Balance de dimensions
BÉ	Bureau d'études
BM	Bureau des méthodes
CALS	Normes en matière d'échanges de données établies par le <i>United States Department of Defense (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support)</i>
CAO	Conception assistée par ordinateur
CN	Commande numérique
CNC	Commande numérique par calculateur
Co	Cote outil
CSA	Association canadienne de normalisation (<i>Canadian Standard Association</i> ; ancienne appellation française : ACNOR)
CT	Classe de tolérances de moulage
CU	Compensation d'usure
DI	Dépenses indirectes de production ou frais généraux indirects (y compris les dépenses administratives et d'amortissement)
E	Module d'Young
EM	Méthode basée sur le calcul d'écart minimal quadratique du contour réel par rapport au contour moyen
EP	Méthode basée sur l'analyse des erreurs primaires avec la sommation probabiliste des erreurs aléatoires et systématiques, ainsi que la sommation $\pm$ /Méthode de sommation probabiliste des erreurs primaires
ÉV	État virtuel
F	Cote de dessin de définition
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
FGL	Fonte à graphite lamellaire
FGLA	Fonte à graphite lamellaire à faible résistance

XIV Liste des principaux symboles et abréviations

FGS	Fabrication en grande série
FGV	Fabrication à grande vitesse/Fraisage à grande vitesse
FM	Fabrication de masse
FPS	Fabrication en petite série
FS	Fabrication en série
FU	Fabrication unitaire
HB	Dureté Brinell (<i>Brinell Hardness</i>)
HP	(Machine-outil) à haute précision
HRC	Dureté Rockwell (<i>Rockwell Hardness</i>)
HV	Dureté Vickers (<i>Vickers Hardness</i>)
ISO	Organisation internationale de normalisation (<i>International Organization for Standardization</i>)
IT	Intervalle de tolérance
LMC	Minimum de matière (<i>Least Material Condition</i>)
LOM	Objet manufacturé laminé (<i>Laminated Object Manufacturing</i>)
LT	Lien technologique
MA	Surépaisseur d'usinage
MFCs	Moteur-fusée à combustion solide
MMC	Maximum de matière (<i>Maximum Material Condition</i>)
MMT	Machine à mesurer tridimensionnelle
MNP	Moule non permanent
MO	Machine-outil
MOCN	Machine-outil à commande numérique
MOD	Main-d'œuvre directe
MP	Moule permanent
P	Pénalisation
PO	(Machine-outil) à précision ordinaire
PR	Prix de revient / Prototypage rapide
PS	Paramètre de sortie
Qu	Qualité
R	Cote de dessin du brut
RFS	Sans égard à la cote (<i>Regardless of Feature Size</i>)
SA	Sous-assemblage
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAS	Système d'assemblage
SR	Surface de référence
ST	Système technologique
STL	Format de fichier basé sur une facettisation des surfaces par des triangles orientés vers l'extérieur de la matière et jointifs bord à bord (<i>Stereolithography</i>)
TD	Tolérance dimensionnelle
TF	Tolérance de fabrication
TG	Tolérance géométrique
TG(F)	Tolérance géométrique de forme
TG(P)	Tolérance géométrique de position relative
TTh	Traitement thermique
UGV	Usinage à grande vitesse
VD	Méthode basée sur le calcul du vecteur du centre de masse du contour réel

Introduction

L'expression « procédés de fabrication mécanique » désigne les moyens mécaniques imaginés et mis en œuvre par l'homme pour transformer, par le travail, la matière en produits utiles. On peut facilement concevoir que l'homme exploita d'abord des moyens manuels, d'où le terme « manufacturer » (de *manus*, « main » et *factus*, « faire »), employé aujourd'hui pour désigner le fait de fabriquer des biens avec des moyens mécaniques.

L'évolution dans ce domaine, tout comme dans les autres sphères de l'activité humaine, fut lente et hésitante. Ce n'est qu'au cours du XVIII^e siècle, à l'ère de la révolution industrielle, que la mécanisation, puis l'automatisation des procédés de fabrication, tels que nous les connaissons de nos jours, ont réellement commencé à s'accélérer. Aujourd'hui, l'éventail des procédés de fabrication et des matériaux, qui continue d'ailleurs à s'élargir, est tellement vaste que l'exploitation rationnelle des uns et des autres, de même que celle de la force ouvrière, au sens noble du terme, nécessite une planification rigoureuse si l'on veut en optimiser le rendement. C'est au bureau des méthodes qu'incombe généralement cette responsabilité.

Les machines, avec lesquelles on fabrique les produits, coûtent de plus en plus cher, ainsi que la main-d'œuvre qui les utilise. Les machines se compliquent grandement, elles possèdent plus d'axes, elles ont des commandes numériques et sont souvent équipées d'appareillage automatique coûteux, tels les changeurs d'outils, les évacuateurs de copeaux, etc. Il est donc important d'immobiliser ces systèmes de production et cette main-d'œuvre le moins de temps possible. Pour ce faire, il faut faire subir à une pièce le nombre minimal d'opérations de montage/démontage sur des machines différentes. Le bureau des méthodes va jouer un rôle fondamental à cet égard.

Au bureau des méthodes, le travail s'effectue selon les principes et les règles de l'organisation scientifique du travail (OST). Science industrielle de la production optimale, l'OST vise à économiser la santé des travailleurs et à obtenir des productions de la meilleure qualité possible pour le coût le plus économique possible. Cette science s'est constituée à partir :

- des principes et des méthodes de travail énoncés par les savants des XVI^e et XVII^e siècles;
- des modèles de travail scientifique utilisés par les chercheurs des XVIII^e et XIX^e siècles, qui conduisirent à l'énoncé des principes et des règles particulières au domaine industriel;
- des connaissances industrielles que la mise en pratique méthodique de ces règles et principes par les industriels depuis la fin du XIX^e siècle a permis d'accumuler.

Les principaux personnages de l'histoire qui contribuèrent soit directement, soit indirectement, à l'édification de cette science sont :

- **Eli Whitney (1765-1825).** Cet Américain, inventeur entre autres de la machine à égrener le coton, fut le premier en 1798, semble-t-il, à reconnaître l'importance d'établir une méthode quelconque assurant un degré raisonnable de précision et d'uniformité des pièces fabriquées en plusieurs exemplaires. Il posait ainsi les bases de l'interchangeabilité des pièces mécaniques. Cela lui permit d'obtenir un contrat du gouvernement américain pour fabriquer 10 000 fusils. Ce fut probablement la première grande série de pièces interchangeables.
- **Charles Renard (1847-1905).** Cet officier et ingénieur militaire français imagina une série de nombres à utiliser, de préférence à tous les autres, dans le but de rationaliser et de standardiser les équipements et les outillages. C'est ce qu'on appelle les séries « Renard ».
- **F. W. Taylor (1856-1915).** Ce chercheur américain consacra 25 ans de sa vie à l'étude de la coupe des métaux dont il dégagera un certain nombre de lois qui régissent la vitesse de coupe, la nature, la forme et les conditions d'emploi des outils. Il découvrit les aciers rapides au tungstène. Il fit intervenir dans ses

expériences, comme source d'économie, un nouveau facteur : la vitesse d'exécution, et luttait contre les multiples causes de gaspillage du temps. Il énonça le principe suivant qu'il appliqua dans ses travaux :

Diviser une difficulté globale en plusieurs difficultés élémentaires, puis étudier une à une ces difficultés élémentaires.

De plus, il énonça cinq autres principes :

- 1. Pour chaque travail, étudier une technique rationnelle remplaçant les anciennes méthodes empiriques.*
- 2. Transmettre systématiquement cette technique à l'exécutant pour qu'il l'applique intégralement.*
- 3. Séparer la fonction préparation de celle d'exécution du contrat.*
- 4. Spécialiser chacune de ces fonctions.*
- 5. Répartir équitablement les bénéfices résultant de l'augmentation du rendement.*

• **F. Gilbreth (1868-1924).** Les travaux de cet autre chercheur américain sont à la base de l'étude de la simplification du travail. Avec la collaboration de son épouse, il se consacra à l'étude des mouvements des travailleurs afin d'aboutir au meilleur rendement possible avec le minimum de fatigue. Ils énoncèrent les trois principes suivants relatifs à la formation des apprentis :

- 1. Les mouvements sont les premiers éléments à considérer pour l'apprentissage d'un métier manuel quelconque;*
- 2. Dès le début, il faut enseigner avec méthode et exiger les mouvements corrects;*
- 3. La qualité correcte est le résultat de mouvements corrects exécutés à la vitesse standard.*

• **Henry Ford (1863-1947).** Ce remarquable industriel américain, fondateur de la plus grande fabrique d'automobiles du monde, la « Ford Motor Company », et inventeur de l'automobile qui porte son nom, fut le premier à appliquer de façon intensive les principes et les règles de l'OST. Le plan d'organisation de ses usines, célèbre dès le début sous le nom de « système Ford », s'est particulièrement distingué par :

- 1. la rationalisation poussée à l'extrême du travail (travail à la chaîne);*
- 2. un aménagement des salaires destiné à accroître, autant que possible, le rendement (association des ouvriers aux bénéfices, travail des malades et des infirmes);*
- 3. l'introduction de la semaine de cinq jours de huit heures chacun.*

Cette courte présentation, outre son aspect historique, avait surtout comme objectif d'illustrer l'état d'esprit dans lequel il convient de réaliser le travail en bureau des méthodes. Assurément, retenir des noms, savoir qui a fait quoi ou se rappeler qui a énoncé tel principe ou telle règle a une certaine importance, mais ce sont les principes, les règles et les méthodes de travail scientifique que les savants et industriels ont énoncés et mis en pratique qui constituent la ligne directrice de l'organisation scientifique du travail à mettre en œuvre.

Organiser scientifiquement le travail, c'est identifier, inventorier, grouper, choisir, ordonner, spécifier pour fabriquer et pour contrôler, dans un temps minimal, à un coût minimal et à la qualité imposée.

Le passage à la fabrication industrielle a aussi été caractérisé par un effort de systématisation des expériences manufacturières. C'est ce à quoi se sont employés certains chercheurs, dont I. Dwigoubski, professeur à l'Université de Moscou, dans son livre *Bases initiales de technologie* publié en 1807.

Les découvertes de la révolution industrielle ont fait bondir la production depuis le milieu du XIX^e siècle, tant du point de vue du nombre de biens produits que de celui de leur diversité. Mais, si les avantages de ce nouveau mode de production et du mode de consommation qui s'est ensuivi sont nombreux au regard du confort et de la simplification de la vie quotidienne, on prend de plus en plus conscience d'un certain nombre

de leurs impacts latéraux, lesquels viennent jeter quelques ombres sur ce tableau à première vue idéal. En effet, les précurseurs de l'OST, dont l'objectif était d'augmenter la productivité, la qualité des biens produits et l'adaptabilité des moyens de production, sous-pondéraient les conséquences environnementales et sociales du système qu'ils préconisaient.

Depuis les années 1960, le mouvement écologiste – suivi de la communauté scientifique – a mis en lumière la détérioration de l'environnement planétaire due à notre mode de vie et à nos pratiques industrielles, qui pourrait même compromettre l'avenir à long terme de la Terre et de la vie qu'elle héberge. Par ailleurs, les grandes inégalités sociales entre les États du nord et ceux du sud, mais également les inégalités chroniques qui se creusent à l'intérieur même des États développés, ne cessent d'être médiatisées et dénoncées. Les consommateurs, de plus en plus sensibilisés aux répercussions de leurs habitudes d'achat sur l'environnement et le développement des pays, désirent faire des choix responsables non seulement écologiquement, mais également socialement.

La réglementation évolue, elle aussi, dans le sens d'un développement plus respectueux des environnements humains et naturels. Par exemple, les grands émetteurs finaux de gaz à effet de serre (les industries qui en produisent plus de 10^5 t/an), tels que les entreprises des secteurs de la fabrication, les centrales thermiques et les industries minières, pétrolières et gazières, sont actuellement tenus de réduire leurs émissions polluantes, mais ces exigences s'étendront petit à petit à l'ensemble des entreprises.

Il est alors impératif de faire du développement durable une part intégrante de l'organisation de la production industrielle. Un développement peut être qualifié de durable s'il reconnaît l'interdépendance des différentes sphères de l'activité humaine et s'il respecte les limites d'assimilation et de régénération de nos ressources sociales et naturelles. Le développement durable tend vers un équilibre entre les moyens que l'on prend pour subvenir aux besoins de tous et les impacts qu'ont ces façons de faire sur les plans environnemental, social et économique.

Aussi, l'ingénieur se doit-il aujourd'hui de recommander des équipements et des procédés qui consomment moins d'énergie et émettent moins de polluants dans l'atmosphère, dans les eaux et dans le sol, tout en tenant compte des aspects sociaux et économiques.

Pour toutes les raisons évoquées ci-dessus, les entreprises doivent adapter leur production à ce courant ascendant d'une nouvelle consommation. La fabrication ne saurait échapper à ces changements. En tenant compte de l'état actuel du secteur manufacturier, on peut formuler une définition de la technologie de pointe (TP) :

La technologie de pointe fait appel à de nouveaux procédés de fabrication et à de nouvelles machines, auxquels sont associées la technologie de l'information, la micro-électronique et de nouvelles méthodes organisationnelles inhérentes à ces processus.

La TP constitue un atout pour les entreprises qui cherchent à atteindre des objectifs de performance (productivité, qualité, coût) à l'échelle internationale dans les conditions de mondialisation des marchés.

Chapitre 1

Fabrication industrielle

1.1 INTRODUCTION

La compréhension de la fabrication industrielle et du travail du bureau des méthodes passe par la connaissance des facteurs fondamentaux qui influent sur la compétitivité des entreprises, des phases d'élaboration d'un produit, du contenu du dossier produit ainsi que du rôle et des défis du bureau des méthodes. Dans ce chapitre, nous examinerons chacun de ces aspects de la fabrication industrielle.

1.2 COMPÉTITIVITÉ DES ENTREPRISES

En raison de la mondialisation des marchés, la compétitivité d'une entreprise est devenue un facteur déterminant de son succès ou de son échec.

Par compétitivité, on entend la capacité d'une entreprise de faire face aux autres entreprises, lors de la production et de la vente d'un produit à un marché. Bien entendu, c'est la demande du marché qui déterminera directement le succès ou l'échec commercial d'un produit. En général, on attribue ce succès ou cet échec à au moins six facteurs fondamentaux :

1. la qualité;
2. la productivité;
3. l'adaptabilité;
4. la responsabilité environnementale;
5. l'adéquation du produit;
6. la mise en marché.

Une entreprise compétitive maîtrise bien ces six facteurs fondamentaux. L'adéquation du produit, c'est la capacité du cahier des charges de répondre à un besoin réel du marché. La mise en marché permet de faire connaître le produit et contrôle jusqu'à un certain point la perception que le marché a du produit. Ces deux facteurs ne sont habituellement pas sous la responsabilité directe des ingénieurs. En revanche, les quatre premiers le sont et nous en ferons l'étude dans cette section.

La compétitivité d'une entreprise donnée se mesure en comparaison de celle des autres entreprises qui travaillent dans le même domaine (fig. 1.1). L'acheteur, que ce soit le consommateur final ou le donneur d'ordre, est roi. C'est lui qui détermine le produit ou le service qu'il veut acheter. Pour une gamme de prix donnée, il exige :

- un niveau de qualité élevé,
- des délais de livraison courts,
- des produits plus ou moins personnalisés.

Pour assurer sa compétitivité, l'entreprise doit répondre adéquatement aux questions posées à la figure 1.2 lors de la conception d'un produit (une automobile dans l'exemple présenté).

La plupart des produits offerts sur le marché actuel font appel à des technologies ou à des matériaux qui étaient encore inexistantes il y a 30 ans (par exemple, les matériaux composites, les transmissions optiques, le prototypage rapide).

Il y a deux voies possibles pour la conception d'un nouveau produit :

- on peut améliorer un produit existant afin de parvenir à satisfaire les besoins du marché. C'est la modification d'un produit A de la figure 1.3a;
- on peut concevoir un nouveau produit qui surpasse la performance du produit A existant en considérant le besoin global pour obtenir une réponse plus pertinente. C'est le produit B de la figure 1.3a.

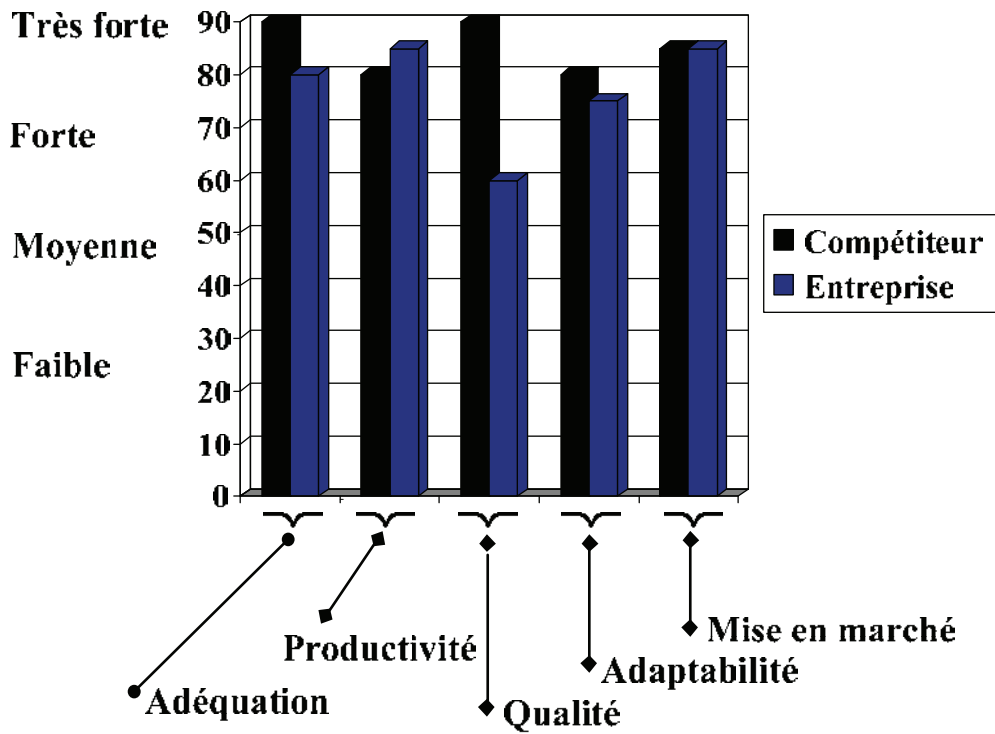


Figure 1.1 Compétitivité de l'entreprise.

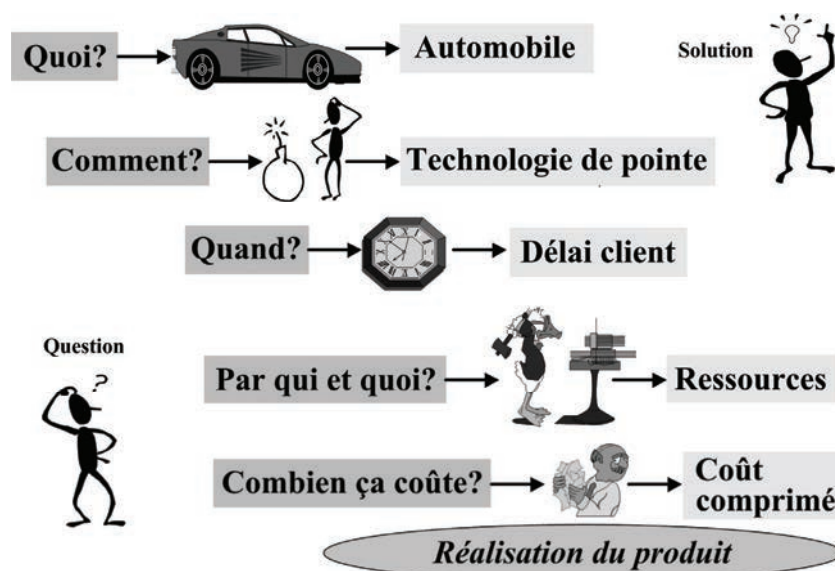


Figure 1.2 Questions et solutions lors de la conception d'un produit.

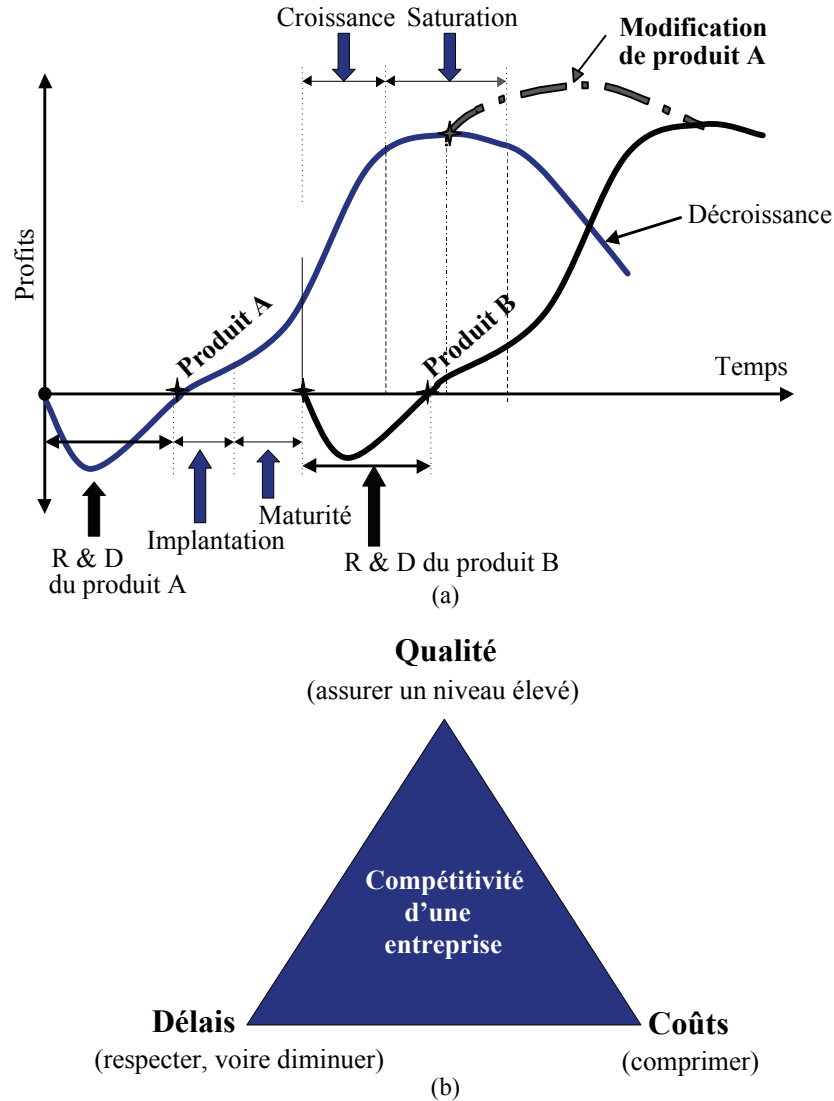


Figure 1.3 Conception d'un nouveau produit et compétitivité d'une entreprise : a) cycle de vie d'un produit; b) triangle qualité-délais-coûts.

1.2.1 Qualité

La défaillance d'un produit peut avoir des conséquences très graves. À ce titre, on peut mentionner les catastrophes aériennes ou maritimes, les accidents dans les centrales électriques et nucléaires, dans les usines chimiques, etc. La qualité d'un produit se mesure de différentes façons et sous différents aspects. Dans cet ouvrage, nous définissons la qualité comme la conformité instantanée du produit réalisé avec les spécifications du cahier des charges pour un prix donné. Le succès potentiel du produit dépend donc très fortement des spécifications du cahier des charges. Le succès effectif de ce même produit résultera non seulement de la conformité du produit avec les spécifications, mais aussi d'une foule de facteurs tels que le contexte économique, la perception des clients et les nouveaux produits de la concurrence. Par exemple, un sondage mené par l'Association canadienne des automobilistes (*Canadian Automobile Association*, CAA) en 1991 a révélé que les constructeurs automobiles pouvaient obtenir des taux d'insatisfaction très faibles pour leurs meilleurs modèles et, en même temps, des taux d'insatisfaction élevés pour le service après-vente de leurs concessionnaires et pour d'autres modèles (tabl. 1.1).

Chapitre 2

Modèle qualité

2.1 INTRODUCTION

La production industrielle de produits et de services nécessite une structure organisationnelle efficace et une conformité aux normes généralement reconnues.

En 1987, le comité technique 176 de l'Organisation internationale de normalisation, qui porte en anglais le nom de International Standards Organisation (ISO), a publié la première version de la série 9000 des normes ISO sur la qualité. Conçues originellement pour harmoniser l'immense éventail de normes nationales et internationales concernant les modèles qualité, ces normes donnent les orientations pour la sélection, la mise en place et le maintien d'un système qualité. Le comité regroupait au départ les organismes nationaux de normalisation de cinq pays, soit :

- l'Association française de normalisation (AFNOR), France;
- l'*American National Standards Institute* (ANSI), États-Unis;
- le *British Standards Institute* (BSI), Angleterre;
- le *Nederlands Normalisatie Institute* (NNI), Pays-Bas;
- l'Association canadienne de normalisation (*Canadian Standards Association*, CSA), Canada.

Depuis, plus d'une centaine de pays, notamment les cinq membres du comité 176 ainsi que le Japon, l'Allemagne, la Suède, etc., ont fait des normes ISO 9000 leurs normes nationales. Ces normes sont de plus en plus présentes sur le marché mondial pour garantir la qualité des biens et des services dans les relations fournisseurs-clients. On estime qu'à la fin de décembre 2005, au moins 776 608 certificats ISO 9001:2000 avaient été délivrés dans 161 pays et économies.

Dans ce chapitre, nous définirons en premier lieu le concept de qualité totale, ou système qualité. Nous verrons ensuite les niveaux de modèles qualité et les techniques qui y sont associées. De là, nous examinerons la raison d'être et la structure des normes de la série ISO 9000. Nous présenterons en détail un plan d'implantation de ces normes, notamment en regard du manuel qualité, des procédures organisationnelles, des instructions de travail et de l'échéancier. Enfin, nous décrirons le processus de certification.

2.2 CONCEPT DE QUALITÉ TOTALE

L'organisation mise en place pour obtenir la qualité totale est parfois appelée système qualité. Tous les secteurs de l'entreprise coopèrent dans le concept de qualité totale (fig. 2.1).

- La conception doit développer/concevoir l'assurance qualité (fiabilité, maintenabilité, disponibilité, coûts) et la planification (contrôle qualité, production).
- Avant la production, on sélectionne le personnel (choix, formation, motivation).
- En production, on réalise le contrôle des achats et des matériaux, le contrôle du processus, l'inspection finale et le contrôle de la logistique (emballage, stockage, manutention et transport).
- Après la production, il convient de surveiller la banque de données (concurrence, client, maintenance), l'analyse des coûts qualité, les actions correctives et le contrôle d'après-vente (compétence des vendeurs, accueil).
- Pendant la proposition et la préparation, il est nécessaire de planifier la politique qualité, l'organisation du travail, la législation et la sécurité du travail.

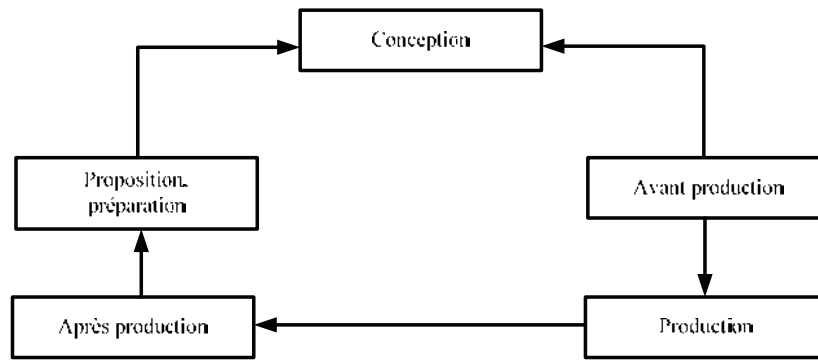


Figure 2.1 Concept de qualité totale.

W. E. Deming, économiste et scientifique américain, a introduit la notion de qualité au Japon dans les années 1950. Aujourd'hui, il y fait figure de prophète. Il existe même au Japon un prix Deming récompensant le produit qui montre la meilleure qualité. Dans le but d'aider les responsables du management à améliorer la qualité des produits, Deming a énoncé 14 préceptes.

1. Toujours chercher à améliorer le produit ou le service et investir dans le futur. Être toujours compétitif.
2. Adopter la philosophie du temps présent : pas de défaut, pas de délai, pas d'erreur, un personnel compétent et accueillant.
3. Ne plus dépendre du contrôle de masse et préférer le contrôle du processus.
4. Améliorer la qualité des matériaux, des composants et des équipements achetés.
5. Rechercher continuellement les défauts (gaspillage) et les insuffisances du système mis en place (conception, achats, qualification) et toujours chercher à l'améliorer.
6. Introduire et utiliser des méthodes modernes de travail.
7. Introduire et utiliser des méthodes modernes de supervision ou d'encadrement.
8. Éliminer la crainte et la peur : peur du changement, peur de s'informer, de justifier de mauvais résultats.
9. Abattre les barrières et les cloisons entre les services de l'entreprise.
10. Éliminer l'usage des objectifs chiffrés, se débarrasser des slogans : des procédures, des investissements et de meilleurs outils sont plus efficaces que les affiches prônant le zéro défaut.
11. Éliminer les standards de travail des quotas numériques.
12. Susciter et créer une satisfaction ou une fierté dans le travail.
13. Mettre en œuvre des programmes d'éducation et de qualification.
14. Créer une organisation appropriée à une politique visant la qualité.

Des documents soutiennent les actions opérationnelles de gestion de la qualité (fig. 2.2).

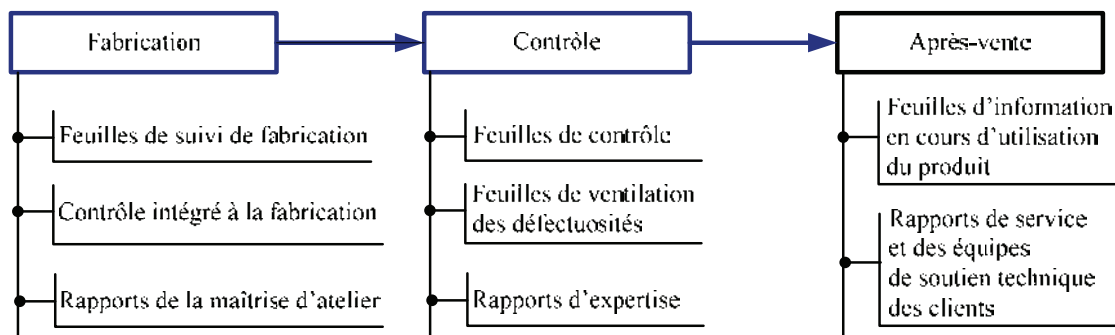


Figure 2.2 Documents attribués aux actions opérationnelles de la gestion de la qualité.

2.3 MODÈLE QUALITÉ ET TECHNIQUES ASSOCIÉES

On distingue essentiellement quatre niveaux de modèles qualité (fig. 2.3).

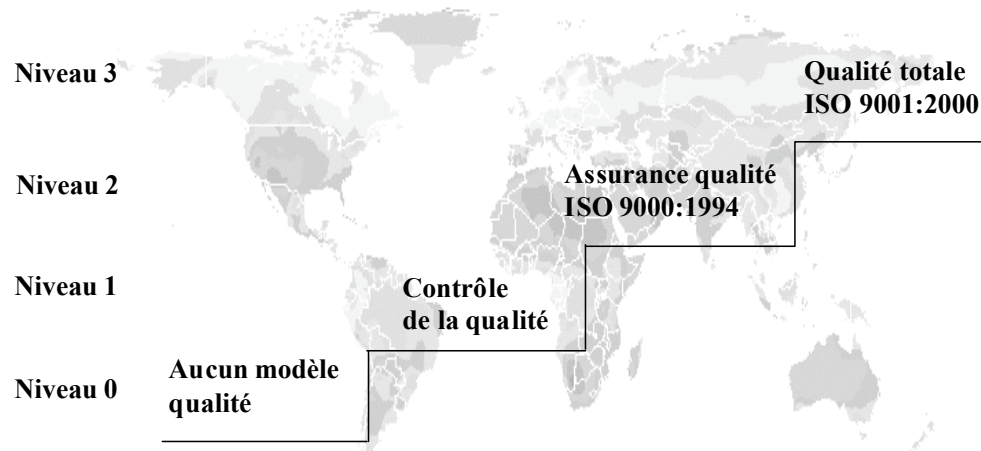


Figure 2.3 Différents niveaux de modèles qualité.

Niveau 0 : Aucun modèle qualité. Les entreprises ayant un modèle qualité de niveau 0 ne possèdent, en fait, aucun modèle qualité. Autrement dit, elles ne procèdent à aucun contrôle de la qualité sur les produits distribués, et encore moins sur les moyens de production de ces mêmes produits.

Niveau 1 : Contrôle de la qualité. Les entreprises ayant un modèle qualité de niveau 1 possèdent un système permettant le contrôle de la qualité des produits finis, mais pas le contrôle de la qualité des moyens de production de ces produits.

Niveau 2 : Assurance qualité. Les entreprises ayant un modèle qualité de niveau 2 possèdent un système de contrôle de la qualité des produits finis et des moyens de production. La norme ISO 9000:1994 correspondait à ce niveau de modèle qualité.

Niveau 3 : Qualité totale. Les entreprises ayant un modèle qualité de niveau 3 mobilisent la totalité de leurs activités dans un processus continu d'amélioration afin d'obtenir une meilleure satisfaction du client au moindre coût. L'édition d'ISO 9001:2000 ne comporte plus le terme « assurance de la qualité ». Cela illustre le fait que les exigences relatives au système de management de la qualité spécifiées dans cette nouvelle édition concernent encore l'assurance de la qualité du produit, mais visent également à accroître la satisfaction des clients.

La qualité du produit dépend de nombreuses composantes. Si l'une d'elles ne donne pas satisfaction, il y a automatiquement non-qualité avec toutes les conséquences qui peuvent s'ensuivre : réclamation, annulation de commande, perte de clientèle, atteinte à l'image de marque de l'entreprise, etc. La figure 2.4 présente les principales composantes de la qualité.

Bien souvent, le modèle qualité va de pair avec des techniques telles que l'amélioration continue, la réingénierie des processus, le Kaizen, le juste-à-temps, le Kanban, le SMED (*Single minute exchange of die*), le déploiement de la fonction qualité (QFD, *Quality function deployment*) et la maintenance préventive totale.

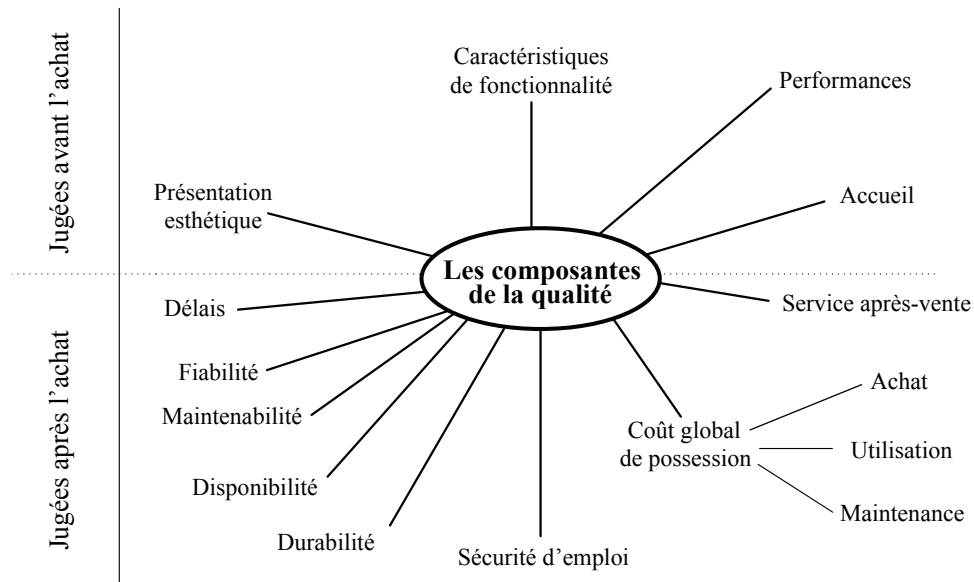


Figure 2.4 Principales composantes de la qualité (adapté de Fanchon, 1994).

L'approche Kaïzen peut s'appliquer aux opérations quotidiennes comme la mise en œuvre de projets à plus long terme, par exemple l'élaboration d'un nouveau produit ou la modification d'un processus de fabrication. « Kaïzen » ou « Kaisen » vient d'un mot japonais qui signifie « amélioration progressive et continue ». Cette notion englobe diverses techniques de qualité (fig. 2.5).

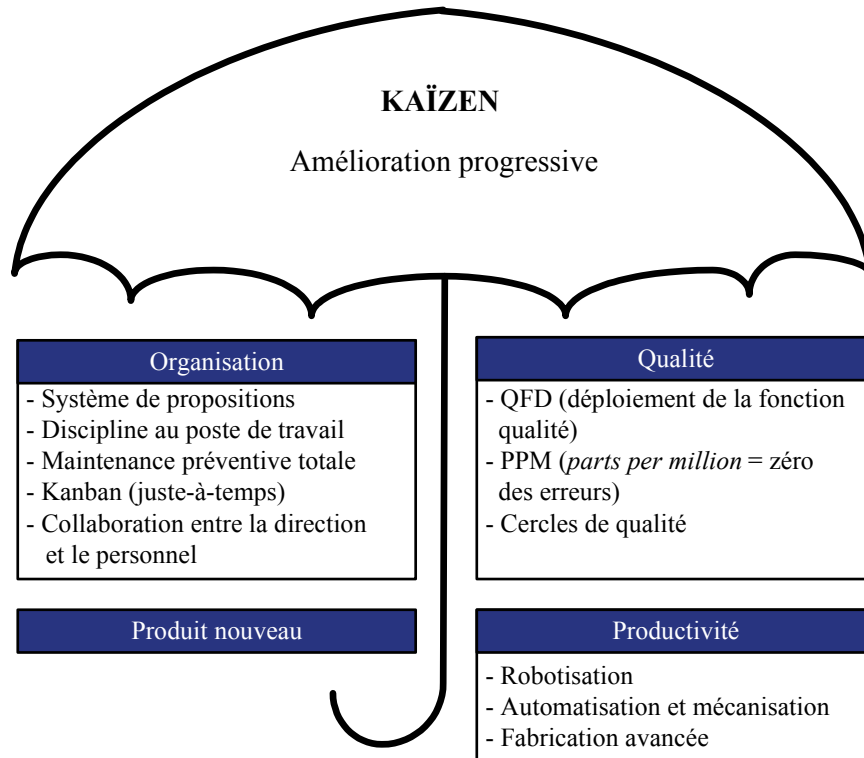
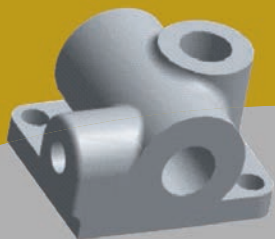


Figure 2.5 Composantes de l'approche Kaïzen.



Fabrication avancée et méthodes industrielles

Tome 1

Dans le domaine industriel, le mot « Innovation » évoque souvent l'idée de nouveau produit et de compétitivité, et donc de productivité, de qualité, d'adaptabilité et de responsabilité. Cette innovation est parfois celle des produits eux-mêmes, mais plus couramment dans l'industrie, elle se situe dans l'évolution des moyens employés pour la production de ces objets, c'est-à-dire dans le passage vers des procédés et des méthodes de fabrication de pointe.

C'est dans cette optique de recherche de la performance, tant dans la fabrication industrielle que dans l'industrialisation des produits, que s'inscrit *Fabrication avancée et méthodes industrielles – Du dossier produit au dossier fabrication*.

Comment comprendre la réalité de la fabrication industrielle et du travail du bureau des méthodes? Comment transformer des matières premières minérales en produits fabriqués fonctionnels? Enfin, comment élaborer le dossier de fabrication à partir du dossier produit issu du bureau d'études? C'est ce que le lecteur apprendra en parcourant les différents chapitres des deux tomes de ce livre : compétitivité industrielle, qualité des produits et respect de la norme ISO 9000, gabarits de contrôle des pièces, procédés d'obtention et calculs d'une pièce brute, procédés d'usinage, précision, état de surface, fiabilité technologique, mesures de la productivité, calcul des coûts de fabrication, montages d'usinage, processus et analyse de fabrication, charte de tolérances, procédés d'assemblage conventionnels et non conventionnels.

Ce livre unique en français couvre l'ensemble des étapes de fabrication des produits, de l'élaboration de leur brut à leur assemblage. Il propose une description de l'ensemble des procédés et fournit les outils pour calculer les principaux paramètres d'élaboration des pièces et en assurer le contrôle. Il est destiné aux étudiants en génie mécanique, mais aussi aux ingénieurs praticiens qui sont aux prises avec des problèmes d'industrialisation de produits ou de fiabilité de machines de production.

Christian Mascle est professeur titulaire au Département de génie mécanique de l'École Polytechnique de Montréal. Il détient un doctorat en microtechnique de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, un baccalauréat en génie mécanique de l'École Polytechnique de Montréal et un diplôme d'ingénieur en microtechnique de l'École d'ingénieurs du Locle (Suisse). Fort d'une trentaine d'années d'expérience en enseignement et en recherche, il est spécialiste de l'industrialisation, de l'assemblage et de la fabrication des produits dans les domaines de l'aérospatiale, de l'automobile et des produits microtechniques.

Walery Wygowski enseigne au Département de génie mécanique et au Service de la formation continue de l'École Polytechnique de Montréal. Il a obtenu son doctorat en sciences appliquées de l'École Polytechnique de Montréal et des diplômes de docteur en sciences techniques et d'ingénieur mécanicien de l'Université technique d'État de Moscou Bauman. Il cumule plus de 40 ans d'expérience pédagogique en génie mécanique dans diverses universités à travers le monde. Il est spécialiste en conception, en fabrication et en industrialisation de produits dans les domaines de l'aérospatiale, du nucléaire et d'autres industries de produits sophistiqués.

ISBN : 978-2-553-01551-9



9 782553 015519



PRESSES INTERNATIONALES
POLYTECHNIQUE

www.polymtl.ca/pub

Du dossier produit au dossier fabrication