

DUNOD TECH

Génie mécanique

2^e édition

- Conception
- Matériaux
- Fabrication
- Applications industrielles

DUNOD

Illustration de couverture : © cherezoff-Fotolia.com
Réalisation de la couverture : Studio graphique Dunod
Mise en pages : Publilog

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2015, 2021

11, rue Paul Bert 92240 Malakoff

www.dunod.com

EAN 978-2-10-082121-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

La collection Dunodtech

Véritable base de données techniques, chaque ouvrage de la collection « Dunodtech » a été conçu avec l'objectif de rassembler dans un même livre tous les savoirs utiles d'un domaine technique (formules, tableaux de valeurs, schémas d'installation, abaques, conventions graphiques, unités et symboles, normes...).

Toutes ces connaissances ont été :

- réunies de manière à ce que l'ouvrage soit exhaustif ;
- ordonnées de manière à être facilement trouvées ou retrouvées ;
- synthétisées de manière à être rapidement comprises ;
- présentées de manière lisible et claire pour être assimilées efficacement.

Des ouvrages qui vous seront utiles aussi bien pendant votre formation qu'au cours de votre vie professionnelle.

Contenu de l'ouvrage

Cet ouvrage est divisé en **8 parties principales** :

1	Conception	p. 2	5	Appareils à pression	p. 367
2	Matériaux métalliques	p. 165	6	Tuyauterie	p. 392
3	Fabrication	p. 269	7	Charpente	p. 424
4	Machines	p. 322	8	Levage	p. 448

Le **génie mécanique** est aujourd'hui appliqué dans **tous les secteurs industriels** dès qu'il s'agit de concevoir, de fabriquer ou de contrôler des objets réels. Les outils logiciels facilitent et accélèrent grandement le travail du concepteur, du fabricant et du contrôleur. Toutefois, il est nécessaire de prendre un compte des réglementations nationales diverses et des documents normatifs ou des règles de l'art qui ne sont pas toujours présents dans les logiciels généralistes.

L'objectif principal de la réglementation est de garantir la sécurité des personnes et des biens ainsi que la protection de l'environnement. Les produits mis sur le marché doivent impérativement respecter les réglementations applicables.

Les codes de construction et les normes sont généralement facultatifs mais leur application permet :

- de faciliter les échanges de données techniques entre donneur d'ordre et fournisseur ;
- de faciliter et de justifier la prise en compte des règles de l'art.

L'objectif de cet ouvrage est de présenter sous forme synthétique et facilement accessible des informations qui peuvent être utilisées :

- pour **orienter des choix dans un projet** après en avoir vérifié la pertinence et le domaine d'application ;
- pour **faciliter l'appropriation des connaissances** dans un domaine complexe ou novateur, comme le tolérancement, le calcul de structures ou le choix des matériaux métalliques et de leurs traitements ;
- comme une introduction à **l'apprentissage des codes de construction et des normes** qui sont des documents de plus en plus volumineux mais aussi de plus en plus riches d'informations techniques redigées par des experts du domaine.

Nous espérons que le contenu de cet ouvrage permettra au lecteur de développer son esprit critique pour s'approprier les connaissances nécessaires dans ses projets.

Conception

Depuis le milieu des années 1980, **le tolérancement a connu une révolution** avec la parution des **normes ISO du système GPS** (*Geometrical Product Specification*) qui concernent la spécification géométrique des produits.

L'adoption du principe d'indépendance dans la norme ISO 8015 a modifié radicalement la définition de spécifications aussi courantes que les cotes dimensionnelles sur les dessins techniques. Un nouveau langage technique normalisé permet maintenant au concepteur averti de spécifier sur le dessin le juste nécessaire du besoin fonctionnel de ses pièces et donc du produit final.

Ce langage rigoureux permet également au contrôleur d'adapter ses contrôles et sa gamme de mesures à la spécification du dessin.

Le langage des spécifications techniques ISO GPS permet une communication enrichie entre tous les acteurs du processus de création technique d'un nouveau produit. Ces acteurs appartiennent aux services de fabrication mais aussi aux services de qualité, d'achats voire commerciaux.

Les **normes américaines de tolérancement** construites sur des conventions différentes sont également présentées dans l'ouvrage.

Les méthodes de **calcul des structures analytiques** ou numériques comme la **méthode des éléments finis** font également partie de l'ouvrage.

La démarche de justification de la résistance d'une structure par le biais des **modes de ruines** et le choix de critères est abordée ici en détails. **Cet aspect pratique est rarement traité** dans les manuels de calcul de structures.

Matériaux métalliques

La désignation des matériaux métalliques utilisés souvent depuis de nombreuses années a fortement évolué récemment. Ces matériaux ainsi que leurs traitements ont été optimisés en particulier sous l'effet de la concurrence de nouveaux matériaux comme les composites. Ces évolutions rendent parfois l'identification des matériaux et de leurs performances difficile.

L'ouvrage présente une vue synthétique des familles de matériaux métalliques utilisés couramment dans l'industrie et de leurs principales propriétés afin de **faciliter le choix pour des applications** ou de mieux comprendre les choix qui ont été faits précédemment.

Les **normes européennes ou internationales**, qui sont un outil indispensable dans ce domaine, sont **systématiquement référencées**.

L'ouvrage décrit en détails la **désignation des matériaux métalliques** suivant les **systèmes internationaux, européens ou américains** afin de faciliter le repérage des matériaux et les équivalences entre les systèmes.

Fabrication

Les procédés de fabrication tels que le **soudage et les traitements thermiques ou de surface** sont décrits dans cet ouvrage.

Les traitements thermiques modifient profondément les caractéristiques des matériaux et les traitements de surface permettent au matériau d'assurer des fonctions différentes en surface et à cœur.

Les aciers utilisés pour la construction mécano-soudée ont été optimisés pour les opérations de formage et de soudage en particulier. Le soudage peut donc être utilisé dans un grand nombre d'applications pour obtenir des performances élevées à des coûts compétitifs.

Les cordons de soudure sont toutefois sensibles à des phénomènes de fatigue en particulier ou de corrosion.

L'objectif de l'ouvrage est de **faciliter le choix des procédés de fabrication** présentés et de mieux comprendre les liaisons de ces procédés de fabrication avec les choix de conception et les choix de matériaux.

Secteurs industriels

Certains secteurs industriels se sont dotés de codes de construction ou de normes très développés pour la conception, la réalisation et le contrôle des produits. Il s'agit en particulier :

- de la conception des **assemblages vissés et soudés** pour les machines ;
- des **appareils à pression** et des **tuyauteries** ;
- des **ossatures métalliques** et du **levage**.

Les **règles pratiques** de conception, de réalisation et de contrôle utilisées dans ce domaine sont décrites dans cet ouvrage. Les normes de construction sont également référencées.

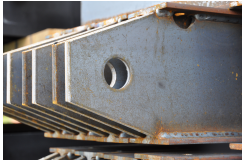
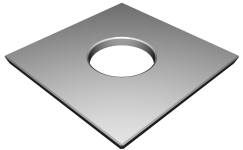
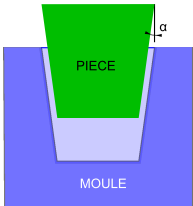
Remerciements



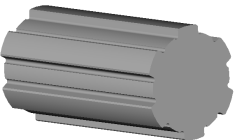
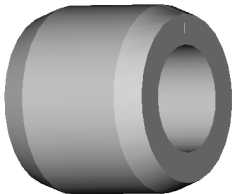
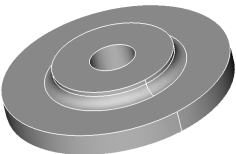
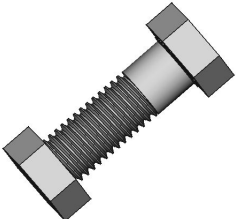
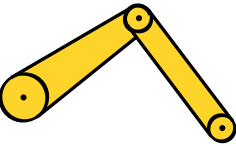
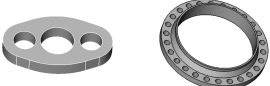
L'auteur souhaite rendre hommage à la génération qui le précède et dédicacer cet ouvrage à ses parents qui ont consacré leur vie à l'éducation et à ses beaux-parents qui ont donné une priorité absolue à l'éducation de leurs enfants.

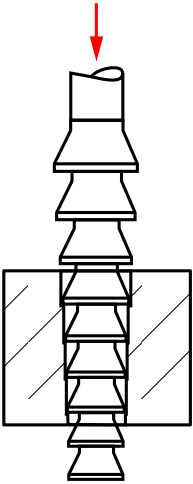
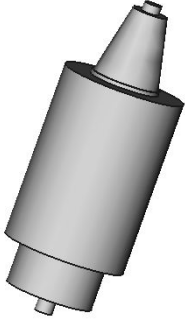
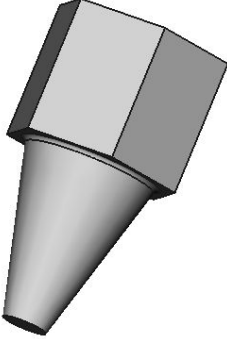
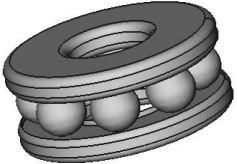
Avant-propos	III
1 Conception	2
1.1 Démarche	3
1.2 Spécifications géométriques des produits suivant les normes ISO	29
1.3 Spécifications géométriques des produits suivant les normes ASME	87
1.4 Calcul de structures	99
1.5 Méthode des éléments finis	126
1.6 Analyse des structures	153
2 Matériaux métalliques	165
2.1 Vérification de la sécurité	166
2.2 Désignation	190
2.3 Aciers	211
2.4 Aluminium et alliages d'aluminium	233
2.5 Cuivre et alliages de cuivre	242
2.6 Nickel et alliages de nickel	248
2.7 Fonte	263
2.8 Titane et alliages de titane	266
3 Fabrication	269
3.1 Traitements thermiques des aciers	270
3.2 Traitements et revêtements de surface	283
3.3 Soudage	309
4 Machines	322
4.1 Assemblage soudé	323
4.2 Assemblage vissé	339
5 Appareils à pression	367
5.1 Généralités	368
5.2 Matériaux	374
5.3 Fabrication	379
5.4 Contrôle	384
5.5 Conception par formule	386
6 Tuyauterie	392
6.1 Généralités	393
6.2 Analyse sous pression	411
6.3 Analyse globale	415
6.4 Supports	421
7 Charpente	424
7.1 Généralités	425
7.2 Chargement	431
7.3 Vérification de la déformation excessive	442
7.4 Vérification des instabilités	446
8 Levage	448
8.1 Vérification des ponts roulants	449
Index	471

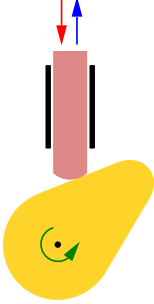
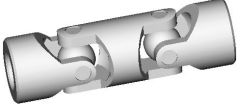
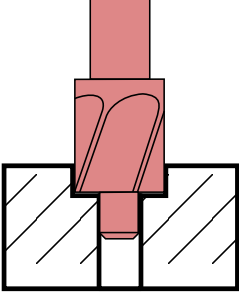
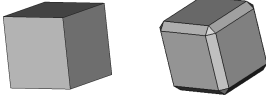
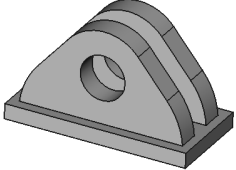
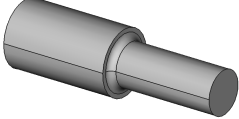
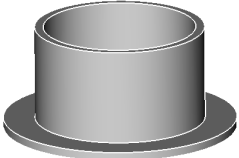
1.1 Démarche	3
Généralités	3
Analyse fonctionnelle	12
Analyse technique	20
Calcul des dimensions et tolérances	22
1.2 Spécifications géométriques des produits suivant les normes ISO	29
Généralités	29
Concept	30
Tolérances dimensionnelles	35
Tolérances géométriques	50
Modificateurs	72
Tolérances générales	82
1.3 Spécifications géométriques des produits suivant les normes ASME	87
Généralités	87
Tolérances dimensionnelles	88
Tolérances géométriques	91
Modificateurs	97
1.4 Calcul de structures	99
Efforts statiques	99
Équilibre statique	102
Poutre en traction pure ou cisaillement pur	102
Poutre en flexion	107
Poutre en torsion	112
Résumé sur le calcul des poutres	115
Calcul des plaques et coques	118
Formulaire	119
1.5 Méthode des éléments finis	126
Contrainte, déplacement, déformation	126
Présentation de la méthode des éléments finis	129
Famille d'éléments	132
Modélisation par éléments finis	140
Non-linéarités	145
1.6 Analyse des structures	153
Analyse de vibration	153
Analyse sismique	158
Analyse du flambement et des instabilités	159
Analyse thermique	163

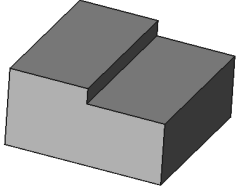
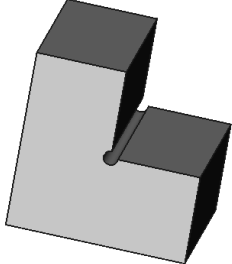
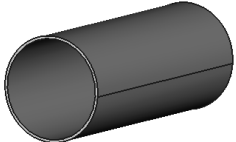
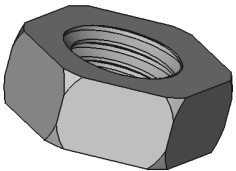
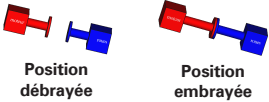
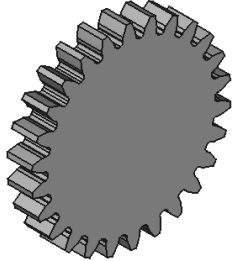
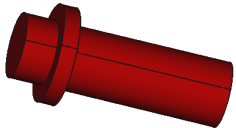
Généralités		
Organisation		
La conception et la réalisation de pièces ou produits mécaniques font appel à différents secteurs de l'entreprise voire à différentes entreprises spécialisées dans un des domaines suivants:		
Objectifs	Service concerné	Produits ou documents élaborés
conception du produit	bureau d'études	dossier d'avant-projet
		dossier de projet
		dessins de définition des pièces
conception des méthodes de fabrication	bureau des méthodes	gammes de fabrication
		dessins de fabrication
		conception et réalisation des montages d'usinage
		conception des contrôles en fabrication
pièces finies ou produit fini	service fabrication	réalisation de prototypes
		réalisation d'essais
		réalisation de pièces finies
		réalisation du montage
		réalisation des contrôles en fabrication
contrôle de la fabrication	service qualité et métrologie	conception des contrôles
		conception des gammes de contrôles et de mesure
		réalisation des mesurages
Les activités d'études (ingénierie) et de méthodes de fabrication (process) sont aujourd'hui souvent menées de front afin d'optimiser les délais. En effet, dans beaucoup d'industries, il est important de vérifier dès que possible que la réalisation des pièces telles que prévues par le bureau d'études est possible avec la cadence de production prévue, la qualité requise et avec les moyens de production disponibles.		
cotation fonctionnelle \neq cotation de fabrication		
Comparaison cotation fonctionnelle - cotation de fabrication		
Cotation fonctionnelle	Cotation de fabrication	
produite par le bureau d'études pour servir de cahier des charges à la fabrication des pièces	produite par le bureau des méthodes pour la réalisation de la fabrication	
issue d'une analyse fonctionnelle du produit	issue de transferts de cotes à partir de la cotation fonctionnelle	
utilisée pour le contrôle final de la pièce	utilisée pour les contrôles en fabrication	
La réalisation d'une cotation fonctionnelle et d'une cotation de fabrication n'est pas toujours possible faute de temps mais elle est généralement souhaitable.		

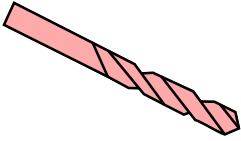
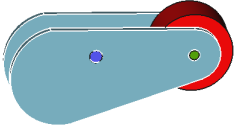
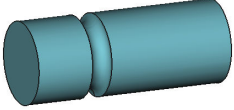

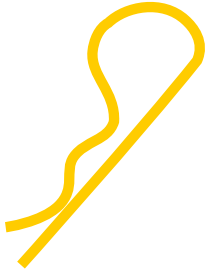
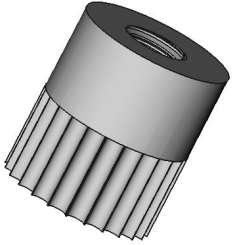
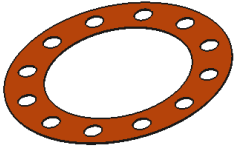
Documents d'études		
La conception technique réalisée par le bureau d'études est synthétisée dans des documents qui permettent les échanges avec les services concernés de l'entreprise.		
Document	Description	
cahier des charges fonctionnel	Le cahier des charges fonctionnel (CdCF) est un document qui sert de point de départ à la conception. Il s'agit de décrire en détail les fonctions de service et fonctions de contrainte qui doivent être accomplies par le produit pour satisfaire le client dans les conditions de prix et de délai fixées. Le CdCF est établi à partir de l'expression fonctionnel du besoin (EFB).	
document d'avant-projet	L'avant-projet permet de fixer les grandes lignes du produit et de décrire les solutions techniques choisies pour remplir les fonctions. L'analyse fonctionnelle technique (AFT) permet de décliner les fonctions de service et de contrainte en fonctions techniques. Des études de résistance des matériaux, de mécanique des fluides, thermiques, de cinématique, d'automatismes ou d'autres études physiques peuvent être nécessaires.	
documents de projet	Les documents de projets définissent en détail les solutions techniques choisies pour satisfaire les fonctions et permettent de vérifier leur cohérence et l'adéquation au résultat recherché.	
dessins de définition	Les dessins de définition ou dessins de détail sont réalisés pour chaque pièce qui n'est pas déjà définie par une norme. Les dessins de définition précisent les spécifications géométriques du produit. Le modèle numérique.	
Glossaire		
Acier	Matériau constitué d'un mélange de fer et de carbone (1,5 à 2 % maximum). Les aciers faiblement alliés contiennent d'autres éléments en quantité inférieure à 5 %. Les aciers fortement alliés tels que les aciers inoxydables contiennent des éléments avec des teneurs supérieures à 5 %.	
Alésage	Trou dans une pièce nécessitant en général une certaine précision	
Angle de dépouille	Angle (α) en général de faible valeur permettant le démoulage des pièces	

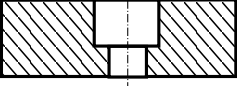
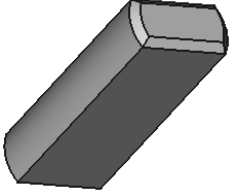
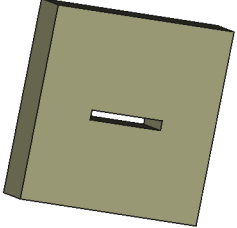
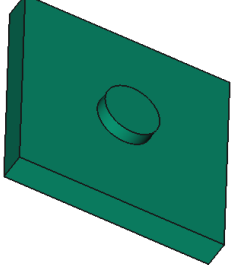
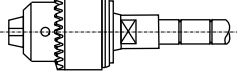
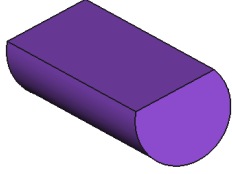
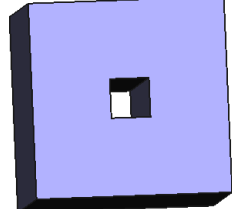
Arbre	Pièce généralement cylindrique souvent utilisée pour transmettre des efforts ou mouvements	
Axe	Pièce cylindrique pouvant servir d'articulation par exemple	
Axe cannelé	Pièce cylindrique comportant une denture pour transmettre des efforts	
Bague	Pièce cylindrique femelle dans laquelle on vient souvent engager un arbre ou un axe	
Bossage	Partie surélevée d'une pièce souvent pour permettre un positionnement	
Boulon	Ensemble de fixation vis plus écrou	
Bras	Partie allongée souvent mobile d'une machine	
Bride	Pièce souvent circulaire munie de trous permettant le raccordement de 2 tuyaux par exemple	

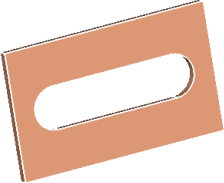
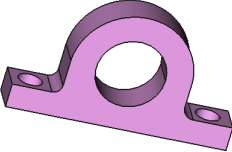
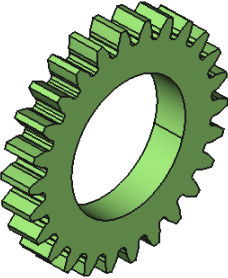
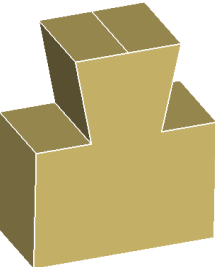
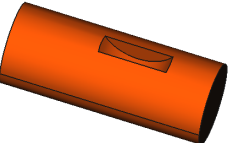
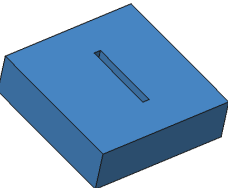
<p>Broche (outil de brocheuse)</p>	<p>Outil de découpe pour brocheuse</p>	
<p>Broche</p>	<p>Pièce d'une machine-outil permettant de transmettre le mouvement à l'outil</p>	
<p>Buse</p>	<p>Pièce généralement conique, percée d'un trou permettant la projection d'un gaz ou liquide</p>	
<p>Butée</p>	<p>Composant mécanique permettant d'empêcher un mouvement de translation tout en autorisant un mouvement de rotation (butée à billes par exemple)</p>	

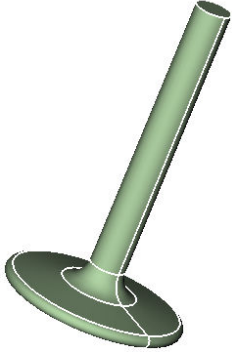
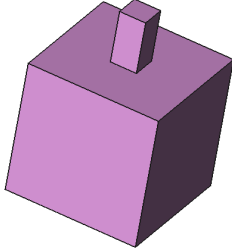
Came	Pièce pouvant être associée à un poussoir permettant de transmettre un mouvement de translation à partir d'un mouvement de rotation	
Cardan	Composant permettant la transmission d'une rotation entre 2 arbres non alignés	
Chambrage	Perçage ou agrandissement d'un trou ne nécessitant pas en général une précision importante dans une pièce par exemple pour réaliser un lamage	
Chanfrein	Usinage des bords de pièce pour éviter les arêtes vives et coupantes.	
Chape	Pièce souvent utilisée pour la liaison par un axe avec une autre pièce (chape de vérin par exemple)	
Congé	Usinage avec un rayon de courbure à la jonction de 2 pièces (concave), si la jonction est convexe on parle d'un arrondi	
Coussinet	Composant mécanique souvent intercalé entre un arbre et un alésage pour maîtriser l'usure et le frottement	

Décrochement	Usinage en décrochement sur une surface plane	
Dégagement	Usinage en décrochement dans un angle interne (concave)	
Douille	Pièce cylindrique creuse généralement de faible épaisseur	
Ecrou	Composant fileté de forme souvent hexagonale	
Embrayage	Composant permettant de transmettre un mouvement de rotation par frottement	 Position débrayée Position embrayée
Engrenage	Composant denté permettant la transmission de mouvement de rotation	
Epaulement	Partie plane d'une pièce permettant de bloquer un déplacement	

Foret	Outil permettant le perçage de trou	
Galet	Roue permettant la transformation d'un mouvement de rotation en translation par frottement	
Gorge	Usinage arrondi en creux sur une pièce	
Goujon	Pièce cylindrique généralement de petite taille souvent filetée et utilisée avec un écrou pour la liaison de pièces mécaniques.	
Goupille	Composant cylindrique à engager dans un trou permettant le blocage d'une rotation	
Insert	Composant en général fileté inséré dans une pièce pour remplacer un taraudage dans une matière insuffisamment résistante et utilisé pour la liaison entre deux pièces	
Joint	Composant souvent en élastomère utilisé pour garantir l'étanchéité. Les pièces peuvent être fixes ou mobiles	

Lamage	Evidement cylindrique permettant le passage d'une tête de vis par exemple.	
Locating	Composant permettant le positionnement d'une pièce par blocage d'un déplacement. Il peut être constitué d'une partie cylindrique et de 2 parties planes.	
Lumière	Orifice dans une pièce.	
Macaron	Composant cylindrique de faible hauteur permettant le blocage de 2 rotations dans le plan.	
Mandrin	Composant permettant de serrer un outil en rotation	
Méplat	Usinage plan sur un cylindre	
Mortaise	Usinage femelle pour un assemblage (assemblage tenon-mortaise)	

Oblong	Trou oblong ou boutonnière: trou allongé permettant un réglage de position	
Palier	Composant permettant de guider un arbre en rotation.	
Pignon	Roue dentée.	
Queue d'aronde	Partie mâle ou femelle d'une pièce dont la section est trapézoïdale et permettant l'assemblage pour former une glissière.	
Rainure	Evidement dans une pièce.	
Saignée	Evidement dans une pièce profonde et de faible épaisseur.	

Soupape	Composant permettant de maintenir une étanchéité ou de laisser passer un fluide suivant sa position	
Tenon	Usinage mâle pour un assemblage (assemblage tenon-mortaise)	

Analyse fonctionnelle

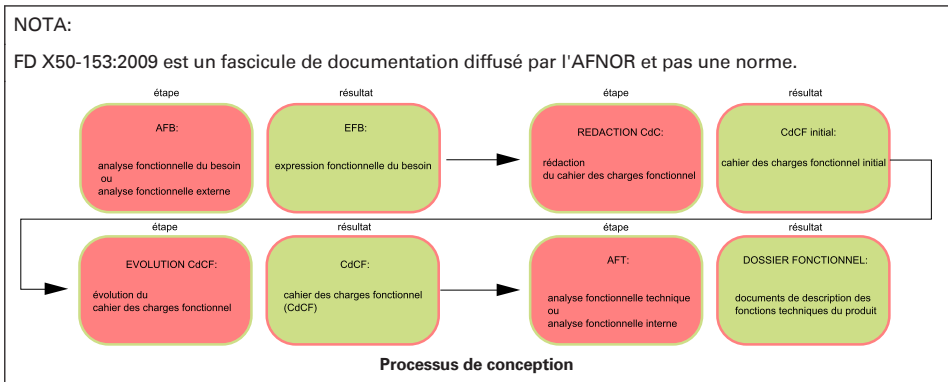
Processus de conception

La santé économique d'une entreprise nécessite la mise sur le marché de produits qui répondent aux besoins des consommateurs le plus rapidement possible.

Pour atteindre cet objectif des méthodes générales de conception et des normes ont été développées. L'analyse fonctionnelle peut être intégrée dans une démarche plus générale de management par la valeur (MV).

Normes de conception

Désignation	Titre
EN 12973:2000	Management par la valeur
NF X50-100:2011	Analyse fonctionnelle : Analyse fonctionnelle du besoin (ou externe) et analyse fonctionnelle technique/produit (ou interne) - Exigences sur les livrables et démarches de mise en œuvre
NF X50-152:2007	Caractéristiques fondamentales de l'analyse de la valeur
FD X50-153:2009	Analyse de la valeur - Recommandations pour sa mise en œuvre
NF EN 1325:2014	Management par la valeur - Vocabulaire - Termes et définitions
EN 16271:2013	Management par la valeur - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit



Analyse fonctionnelle du besoin

Pour optimiser la conception d'un produit, il est important de définir les fonctions nécessaires pour satisfaire les besoins du client dans toutes les phases de la durée de vie du système à étudier.

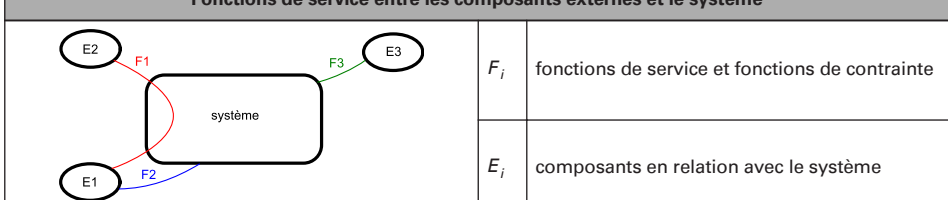
Suivant la norme EN 16271, l'analyse fonctionnelle du besoin (AFB) ou analyse fonctionnelle externe est un processus qui permet :

Définition de l'analyse fonctionnelle du besoin (AFB)	
Suivant EN 16271, l'analyse fonctionnelle du besoin (AFB) est un processus qui permet :	de prendre en compte le point de vue de toutes les parties intéressées,
	de prendre en compte l'ensemble de la vie du produit de sa conception à son recyclage,
	de définir les objectifs à atteindre et non les moyens de les atteindre. La solution technique pour répondre au besoin n'est pas encore figée.

Le produit est modélisé par un système qui représente les limites de l'étude et les relations avec l'extérieur ou l'environnement.

Le modèle peut être représenté par des graphiques tels que ci-dessous pour indiquer les fonctions d'un produit.

Fonctions de service entre les composants externes et le système



Chaque fonction F_i repérée sur le schéma doit être décrite.

Les composants E_i sont des organes extérieurs qui sont en relation avec le système soit pour assurer des fonctions en relation avec un autre composant via le système soit pour imposer des contraintes au système.

Les fonctions de service peuvent être hiérarchisées en fonctions principales et fonctions complémentaires en tenant compte de l'importance qu'elles ont pour le client.

L'étude fonctionnelle doit également faire apparaître les fonctions contraintes sur le système qui sont imposées de l'extérieur par la réglementation ou les habitudes culturelles par exemple.

L'analyse fonctionnelle du besoin client aboutit à la rédaction d'un document dénommé expression fonctionnelle du besoin (EFB).

Expression fonctionnelle du besoin (EFB)	
Suivant la norme EN 16271 l'EFB est un document qui:	présente l'information avec un souci d'explication, de rigueur et avec des données précises;
	donne des éléments d'appréciation qui permettent de prendre une décision;
	permet de concevoir et réaliser un produit le mieux adapté aux besoins;
	établit une référence des besoins client pour la suite du projet.
Le contenu de l'expression fonctionnelle du besoin pourra correspondre à la structure suivante qui est inspirée de la norme EN 16271:	
Structure de l'expression fonctionnelle du besoin (EFB)	
I - définition globale du besoin	formulation globale du besoin
	position du produit dans un système et interfaces
II - marché cible et données économiques	définition des enjeux économiques
	définition de la stratégie du donneur d'ordre
	champs des besoins à traiter
	couverture fonctionnelle visée
III - présentation des solutions sélectionnées le cas échéant	description des concepts imposés
IV - définition des fonctions de service et des contraintes	hiérarchie du niveau de détail de la description du besoin
	description des phases de vie du produit
	inventaire et description des éléments ou personnes qui ont une relation avec le produit
	inventaire des fonctions de service
	inventaire des contraintes réglementaires et contractuelles
Annexe	liste détaillée et numérotée de toutes les exigences
Suivant la norme EN 16271, la description et la présentation des fonctions doit respecter les règles suivantes:	
Règles de description des fonctions	
Les fonctions sont:	définies sans impliquer une solution technique particulière;
	organisées par groupes fonctionnels;
	décrites par éléments obligatoires: le critère d'appréciation, le niveau à atteindre pour ce critère et le degré d'importance de la fonction
	décrites éventuellement avec des indications complémentaires sur le type de validation, la possibilité de la dégradation de la fonction au cours de la vie du produit et toutes autres indications utiles pour le soumissionnaire;
	renseignées sur la possibilité de remplacement partiel de la fonction par une autre fonction;
L'EFB est un préalable à la rédaction d'un cahier des charges fonctionnel (CdCF).	

Cahier des charges fonctionnel (CdCF)	
Le cahier des charges fonctionnel (CdCF) est rédigé à partir de l'expression fonctionnelle du besoin (EFB).	
Le cahier des charges fonctionnel doit permettre de réaliser un appel d'offres adressé à des personnes ou organismes compétents pour proposer des solutions techniques au besoin formulé.	
L'objectif du cahier des charges fonctionnel est de fournir au soumissionnaire les éléments techniques et économiques utiles pour répondre à l'appel d'offres et de permettre au donneur d'ordre d'évaluer ensuite les solutions proposées.	
Cette démarche permet de laisser libre cours à la créativité des soumissionnaires.	
Objectifs du CdCF	
Suivant la norme EN 16271 le cahier des charges fonctionnel doit permettre:	aux soumissionnaires de comprendre en détail la nature du besoin;
	de laisser aux soumissionnaires une part de créativité pour répondre aux besoins grâce à leur savoir-faire spécifique;
	l'évaluation et la comparaison des différentes offres reçues.
Suivant EN 16271 un cahier des charges fonctionnel (CdCF) doit contenir les rubriques suivantes:	
Rubriques obligatoires d'un cahier des charges fonctionnel	
I -	présentation du projet
II -	description du produit
III -	présentation des parties intéressées
IV -	description des phases de vie du produit
V -	description des personnes et systèmes en relation avec le produit (interacteurs)
VI -	description des concepts retenus
VII -	inventaire des fonctions avec critère d'appréciation, niveau acceptable pour satisfaire le critère et degré d'importance de la fonction
VIII -	inventaire des contraintes réglementaires et contractuelles
Annexe I -	format de présentation des réponses
Annexe II -	explication des termes utilisés
En plus des rubriques obligatoires, il est possible d'ajouter des rubriques facultatives:	
Rubriques facultatives pour le cahier des charges fonctionnel	
la hiérarchisation de l'importance des fonctions	
une demande de proposition de solutions différentes pour stimuler la créativité du soumissionnaire	
des éléments techniques ou économiques supplémentaires présents dans l'expression fonctionnelle du besoin (EFB)	
Analyse fonctionnelle technique	
L'analyse fonctionnelle technique (AFT) ou analyse fonctionnelle interne consiste à étudier les fonctions techniques à l'intérieur du système ainsi que l'organisation des composants du système afin de s'assurer qu'ils permettent de réaliser les fonctions de service décrites en amont dans le cahier des charges fonctionnel (CdCF).	
La norme NF X 50-100 décrit les exigences pour une analyse fonctionnelle technique (AFT).	

Objectifs de l'analyse fonctionnelle technique (AFT)		
Description	Objectif	
cadrage du produit et niveau de détail;	permettre la compréhension globale de la solution;	
présentation des concepts adoptés;	permettre le suivi de la conception;	
description des fonctions techniques;	division de la conception en tâches élémentaires;	
analyse des fonctions techniques;	vérifier l'adéquation entre le choix des composants ou sous-ensembles et les fonctions techniques assurées;	
analyse du taux de couverture des besoins;	critères de validation de la solution proposée;	
Validation des choix de conception;	identification des fonctions supplémentaires, des fonctions inutiles, des fonctions nuisibles introduites par le choix de conception;	
identification et description des groupes fonctionnels;	définir l'architecture fonctionnelle et vérifier que le système est complet;	
choix d'une solution technique;	définir la meilleure architecture produit à partir de l'architecture fonctionnelle;	
validation de la solution technique;	argumentaire sur l'adéquation de la solution technique aux besoins fonctionnels;	
description des composants;	consultation des fournisseurs;	
description de la logistique et de la maintenance;	évaluer la durée de vie du produit;	
description de la cause et conséquence de la défaillance d'une fonction;	analyse de risque;	
La description des flux internes entre composants est détaillée à cette phase à partir du diagramme fonctionnel établi précédemment.		
L'analyse fonctionnelle technique peut être réalisée en plusieurs étapes.		
Schémas des étapes de l'analyse fonctionnelle technique (AFT)		
Identification	Étape	Schéma
1	description des flux fonctionnels entre composants internes et externes;	
2	choix des liaisons cinématiques en supposant des solides rigides et des liaisons parfaites sans jeu et sans frottement;	
3	identification des surfaces réelles et des jeux: schéma des liaisons réelles et identification des surfaces de contact	

Composants fonctionnels

E_i	composants externes
-------	---------------------

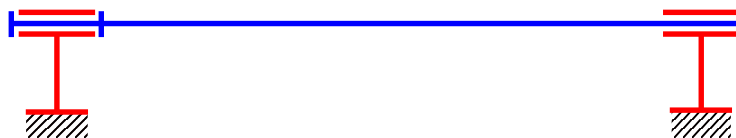
I_i	composants internes
-------	---------------------

Les schémas ci-dessus permettent de faire la synthèse des informations qui concernent le flux des services et des actions à l'intérieur du système à travers les composants internes I_i . Ils permettent également de vérifier que les fonctions prévues sont bien établies entre le système et les composants externes E_i .

Lorsque les flux ont été établis il est intéressant de faire un schéma cinématique du système.

Cinématique

La réalisation d'un schéma cinématique permet souvent de faire apparaître le principe de fonctionnement du produit.



Exemple de schéma cinématique

Hypothèses d'un modèle cinématique

les pièces sont considérées rigides donc indéformables

les liaisons sont supposées parfaites (sans jeu et sans frottement)

les pièces liées de façon rigide sont regroupées en un seul composant

Le schéma cinématique peut servir de support à des calculs de mouvements et d'efforts.

Grandeurs à calculer

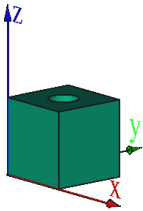
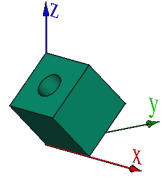
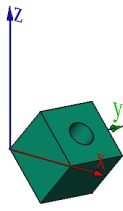
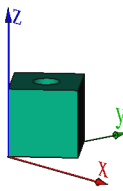
mouvements	déplacements, vitesses, accélérations
------------	---------------------------------------

efforts	forces, couples, moments
---------	--------------------------

Le mouvement d'une pièce rigide peut se décomposer en six mouvements de base:

Translations

Mouvement	Au repos	Après mouvement
translation suivant l'axe x		
translation suivant l'axe y		
translation suivant l'axe z		

Rotations		
Mouvement	Au repos	Après mouvement
rotation suivant l'axe x		
rotation suivant l'axe y		
rotation suivant l'axe z		

Dénomination des mouvements et symboles

Dénomination	Symbole
translation suivant l'axe x	T_x
translation suivant l'axe y	T_y
translation suivant l'axe z	T_z
rotation autour de l'axe x	R_x
rotation autour de l'axe y	R_y
rotation autour de l'axe z	R_z

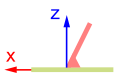
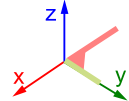
La liaison entre solides peut être établie par des contacts ponctuel, linéique ou surfacique.

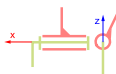


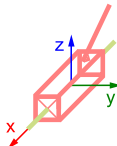

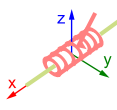
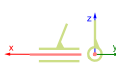
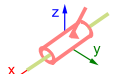
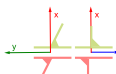
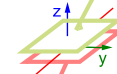
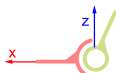

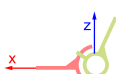

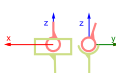


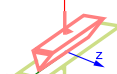
Les liaisons empêchent certains mouvements relatifs des deux solides en contact et laissent libres les autres mouvements qui sont donc des degrés de liberté de la liaison.

La description de ces mouvements nécessite la définition d'un repère lié à la liaison.

Il est nécessaire de définir des paramètres pour décrire les mouvements libres d'une liaison. Un choix de paramètres est un paramétrage de la liaison.

Liaisons cinématiques

nom	degrés de liberté		mouvements	paramètres	2d	3d
encastrement	0	0	aucun	aucun		
	0	0				
	0	0				

Liaisons cinématiques						
nom	degrés de liberté		mouvements	paramètres	2d	3d
pivot	0	Rx	rotation d'axe x	α angle de rotation		
	0	0				
	0	0				
glissière	Tx	0	translation suivant x	lx longueur sur x		
	0	0				
	0	0				
hélicoïdale	Tx	Rx	translation et rotation telles que $Tx = k Rx$	1 angle		
	0	0				
	0	0				
pivot glissant	Tx	Rx	translation et rotation autour de x	lx et α		
	0	0				
	0	0				
appui plan	0	Rx	2 translations et 1 rotation autour de x	ly, lz, α		
	Ty	0				
	Tz	0				
sphérique	0	Rx	3 rotations	3 angles		
	0	Ry				
	0	Rz				
sphérique à doigt	0	Rx	2 rotations	2 angles		
	0	Ry				
	0	0				
linéaire circulaire	Tx	Rx	1 translation, 3 rotations	1 longueur, 3 angles		
	0	Ry				
	0	Rz				
linéaire rectiligne	0	Rx	2 translations, 2 rotations	2 longueurs, 2 angles		
	Ty	Ry				
	Tz	0				

Liaisons cinématiques						
nom	degrés de liberté		mouvements	paramètres	2d	3d
ponctuelle	0	Rx	2 translations, 3 rotations	2 longueurs, 3 angles		
	Ty	Ry				
	Tz	Rz				
Définitions						
Notion			Définition			
hypostatisme			une pièce est en hypostatisme lorsqu'il existe des mouvements possibles pour la pièce. Il s'agit alors d'un mécanisme;			
isostatisme			une pièce est en isostatisme lorsque les six mouvements dans l'espace sont bloqués;			
hyperstatisme			une pièce est en hyperstatisme lorsque le nombre de blocage est supérieur au nombre de mouvements possibles sur une pièce.			
Le degré d'hyperstaticité d'un système mécanique peut être calculé grâce à une relation telle que la suivante:						
$h = m + M + \sum_{i=1}^n s_i - 6(p - 1)$						
<p>h : degré d'hyperstaticité p : nombre de pièces y compris le bâti s_i : nombre de degrés de liberté bloqués par la liaison i m : nombre de mobilités internes M : nombre de mobilités pour le système complet</p>						
La mobilité totale du système correspond au nombre de mouvements possibles.						
La mobilité interne correspond à la possibilité pour une pièce de bouger indépendamment des autres pièces.						
Exemple						
			$m = 0, M = 0, s = s_1 = 6, p = 2$ $h = 0 + 0 + 6 - 6(2 - 1) = 0$ Le système est isostatique			
Analyse technique						
Préparation de la spécification géométrique des produits						
Un objectif important des études de conception est de permettre la spécification géométrique du produit, c'est-à-dire la spécification de la géométrie nominale et des tolérances. Ces informations sont notées sur les plans de détail ou plans de définition de chaque pièce du produit.						
Le modèle numérique d'un programme de conception assistée par ordinateur (CAO) peut également définir le modèle nominal.						
Certains programmes de CAO permettent aujourd'hui de faire figurer les tolérances sur le modèle numérique en trois dimensions.						
<div style="border: 1px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"> La réalisation de la spécification géométrique du produit est directement alimentée par les résultats des études de conception. </div>						

Exemples de liens entre études de conception et spécification géométrique	
Résultat d'étude	Utilisation
définition des liaisons	assemblage des pièces et choix des systèmes de référence
liste des fonctions techniques	établissement des conditions fonctionnelles sur le produit (chaînes de cote)
calculs de résistance des matériaux	choix des épaisseurs et des caractéristiques géométriques

Assemblage des pièces

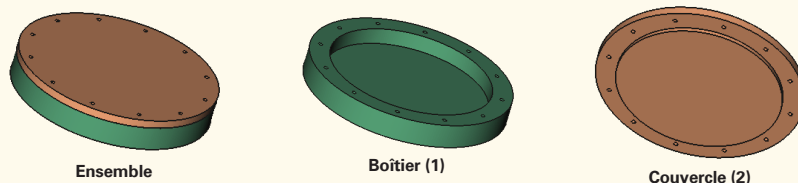
A partir de l'analyse des liaisons entre les pièces il est possible de dresser pour chaque pièce un tableau qui décrit l'assemblage de la pièce considérée sur la pièce support. Chaque colonne contient l'indication des surfaces en vis-à-vis dans l'ordre de prépondérance.

Assemblage d'une pièce

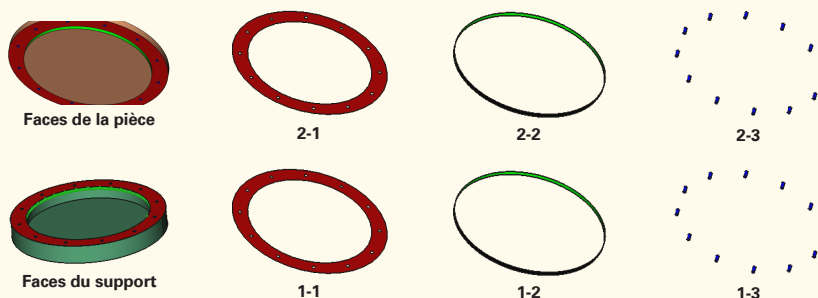
	primaire	secondaire	tertiaire
surface de la pièce			
surface du support			

Dans le cas d'une pièce disposée sur plusieurs pièces, la pièce support est en réalité l'ensemble des pièces de support désigné comme un groupe.

Exemple



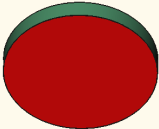
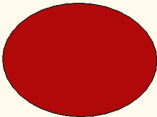
L'assemblage du couvercle sur le boîtier est constitué d'un appui plan prépondérant, puis d'un centrage et d'un blocage en rotation grâce à douze vis.



Assemblage du couvercle sur le boîtier

	primaire	secondaire	tertiaire
surface de la pièce	2-1	2-2	2-3
surface du support	1-1	1-2	1-3

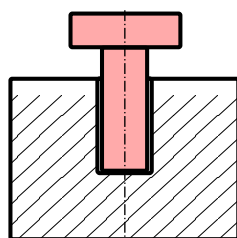
Le boîtier est simplement posé sur une pièce extérieure au système étudié.

			
Assemblage du boîtier sur l'extérieur			
	primaire	secondaire	tertiaire
surface de la pièce	1-4	-	-
surface du support	extérieur	-	-

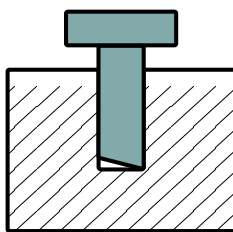
La prépondérance des faces d'appui dans un assemblage dépend du choix du concepteur et de la maîtrise des jeux entre les pièces.

Les figures ci-dessous illustrent deux options de montage possibles. Les défauts géométriques sont exagérés pour faciliter la visualisation.

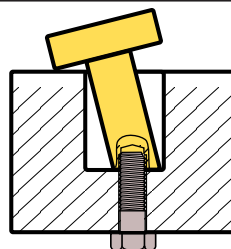
Exemple de choix de montage et prépondérance des surfaces



1- assemblage nominal



2- cylindre prépondérant



3- plan prépondérant

figure 1:

les pièces sont supposées de forme parfaite et en position nominale.

figure 2:

La pièce mâle est une pièce réelle avec défaut géométrique. L'ajustement des cylindres est serré. Le cylindre joue donc un rôle prépondérant dans l'assemblage de la pièce mâle.

figure 3:

La pièce mâle est une pièce réelle avec défaut géométrique. L'ajustement des cylindres comporte un jeu. La pièce mâle est serrée par une vis. La face plane joue donc un rôle prépondérant dans l'assemblage de la pièce mâle.

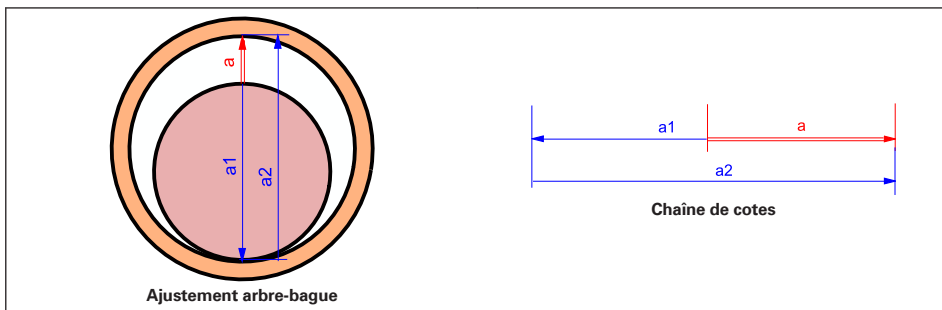
Le choix d'assemblage sera directement utilisé pour le choix des références lors de la mise en place des spécifications géométriques sur les plans de définition.

Calcul des dimensions et tolérances

Chaînes de cotes

Chaque condition fonctionnelle issue de l'étude fonctionnelle du produit doit être prise en compte. Beaucoup de ces conditions correspondent à des jeux à respecter entre les pièces.

Les chaînes de cotes permettent de repérer les dimensions influentes des pièces du produit sur les conditions fonctionnelles. L'utilisation des chaînes de cotes permet ensuite le calcul des tolérances dimensionnelles ou géométriques.



le jeu ou la cote condition a :	représente la condition fonctionnelle à respecter (ici le montage de l'arbre dans la bague);
les maillons $a1, a2$:	représente les dimensions entre les faces en contact qui ont une influence sur la condition (ici le diamètre de l'arbre et le diamètre de l'alésage);

Il peut être commode de respecter les conventions suivantes pour écrire les chaînes de cotes:

- tracer le jeu ou la cote-condition de la gauche vers la droite ou de bas en haut;
- tracer les maillons en commençant par le pied du jeu ou de la cote-condition de face de contact en face de contact jusqu'à fermer la boucle;
- veiller à choisir la boucle minimale qui comporte généralement un seul maillon par pièce.

Les dimensions qui apparaissent sont des dimensions fonctionnelles qui seront reportées sur les dessins de définition.

Les chaînes de cotes peuvent être représentées sous forme de tableaux tels que ci-dessous avec des longueurs en millimètres:

nom de la cote	sens de la flèche	jeu Maxi cote en valeur mini	cote en valeur Maxi	Intervalle de tolérance
a	→	1,00		0,50
$a1$	→	21,00		0,20
$a2$	←		22,00	0,30
		22,00	22,00	

Les conventions qui doivent être appliquées aux valeurs du tableau sont les suivantes:

convention 1:	le sens des flèches correspond à celui de la chaîne de cote;
convention 2:	le jeu ou cote-condition est porté en valeur maximale dans la troisième colonne;
convention 3:	les maillons orientés vers la droite sont portés en valeur minimale dans la troisième colonne;
convention 4:	les maillons orientés vers la gauche sont portés en valeur maximale dans la quatrième colonne;
convention 5:	la somme des termes de la troisième colonne doit être égale à la somme des termes de la quatrième colonne;
convention 6:	la somme des intervalles de tolérances sur tous les maillons doit être égale à l'intervalle de tolérance sur le jeu ou cote-condition;
convention 7:	les cases rouges du tableau ne sont pas utilisées;

Le respect des conventions ci-dessus correspond aux équations suivantes:

$$a_{\text{maxi}} + a1_{\text{mini}} = a2_{\text{maxi}}$$

a_{maxi} : valeur maximale de la cote a

$a1_{\text{mini}}$: valeur minimale de la cote $a1$

$a2_{\text{maxi}}$: valeur maximale de la cote $a2$




$$IT_a = IT_{a1} + IT_{a2}$$

IT_a : intervalle de tolérance sur le jeu

IT_{a1} : intervalle de tolérance sur le maillon $a1$

IT_{a2} : intervalle de tolérance sur le maillon $a2$

Dans le cas d'une condition de jeu minimal à respecter le tableau est le suivant :

nom de la cote	sens de la flèche	jeu mini cote en valeur Maxi	cote en valeur mini	Intervalle de tolérance
a		0,50		0,50
a1		21,20		0,20
a2			21,70	0,30
		21,70	21,70	

Les conventions qui doivent être appliquées aux valeurs du tableau sont les suivantes:

convention 1:	le sens des flèches correspond à celui de la chaîne de cote;
convention 2:	le jeu ou cote-condition est porté en valeur minimale dans la troisième colonne;
convention 3:	les maillons orientés vers la droite sont portés en valeur maximale dans la troisième colonne;
convention 4:	les maillons orientés vers la gauche sont portés en valeur minimale dans la quatrième colonne;
convention 5:	la somme des termes de la troisième colonne doit être égale à la somme des termes de la quatrième colonne;
convention 6:	la somme des intervalles de tolérances sur tous les maillons doit être égale à l'intervalle de tolérance sur le jeu ou cote-condition;
convention 7:	les cases rouges du tableau ne sont pas utilisées;

Le respect des conventions ci-dessus correspond aux équations suivantes:

$$a_{\text{mini}} + a1_{\text{maxi}} = a2_{\text{mini}}$$

a_{mini} : valeur minimale de la cote a

$a1_{\text{maxi}}$: valeur maximale de la cote $a1$

$a2_{\text{mini}}$: valeur minimale de la cote $a2$

$$IT_a = IT_{a1} + IT_{a2}$$

IT_a : intervalle de tolérance sur le jeu

IT_{a1} : intervalle de tolérance sur le maillon $a1$

IT_{a2} : intervalle de tolérance sur le maillon $a2$

Les chaînes de cotes considérées ne prennent pas en compte les défauts géométriques des pièces.