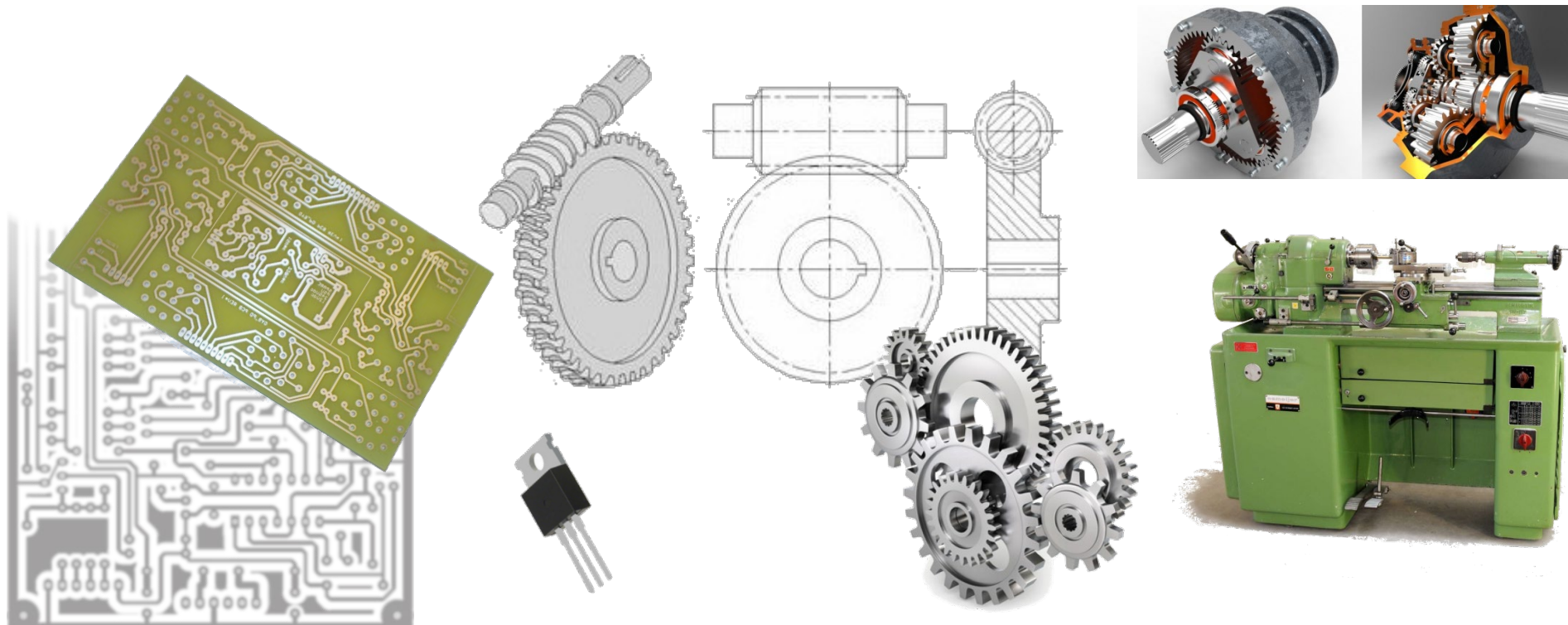


INTRODUCTION AUX TECHNIQUES **DE CONSTRUCTIONS**

N.Turin, A.Gentile, J.Burnens



Objectif du cours:

- Acquérir des notions de dessin technique, de pratiques de mécanique et électronique pour le laboratoire de physique.
- Permet de faciliter les interactions entre les différents corps de métier liés aux activités de laboratoires pour les ingénieur.e.s physicien.ne.s.

Organisation du cours:

Les trois principaux domaines sont représentés ici en plusieurs modules:

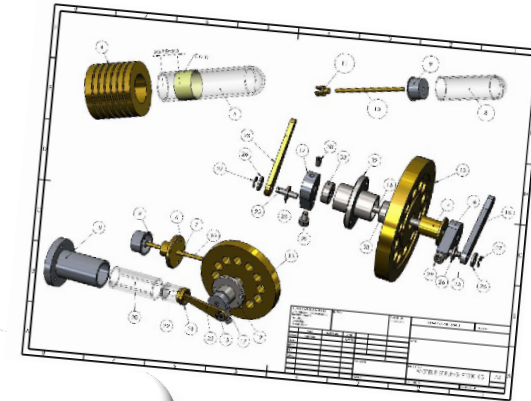
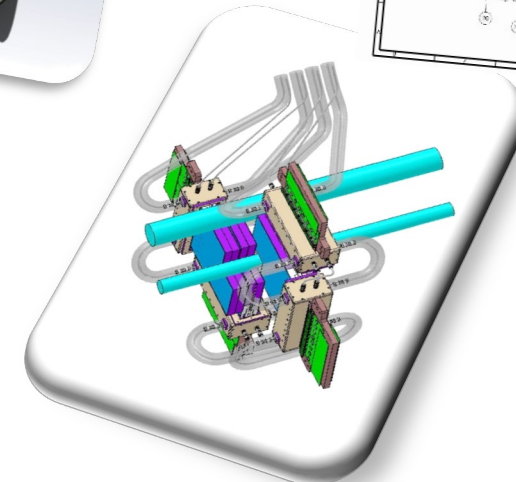
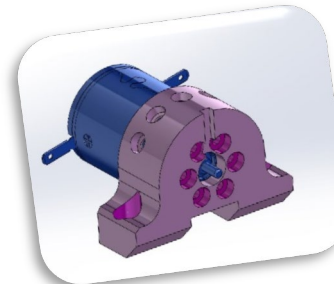
- Conception assisté par ordinateur 3D (4 cours)
- Atelier de mécanique (2 cours)
- Laboratoire d'électronique (2 cours)

Conception Assistée par Ordinateur

Introduction

Donner des bases en construction mécanique et en Conception Assistée par Ordinateur «CAO». Ceci pour vous permettre de réaliser des conceptions de pièces en 3D, des assemblages ainsi que des plans techniques pour la fabrication des pièces à réaliser.

- Techniques de fabrication de pièces mécaniques
- Normes et Eléments normalisés
- Utilisation de SolidWorks
 - Conception de pièces mécaniques en 3D
 - Création d'assemblage de pièces mécanique
 - Création de plan technique
 - Animation, simulation, rendu photo



Conception Assistée par Ordinateur

Planning

- Séance 1: Base du logiciel, esquisses 2D, Boite
Dessin technique et cotation
- Séance 2: Fonctions 3D, stylo
Techniques de fabrication
- Séance 3: Assemblage, mise en plan
Normes et éléments normalisés
- Séance 4: Compléments: animation, simulation, rendu photo
Introduction aux éléments finis

Conception Assistée par Ordinateur

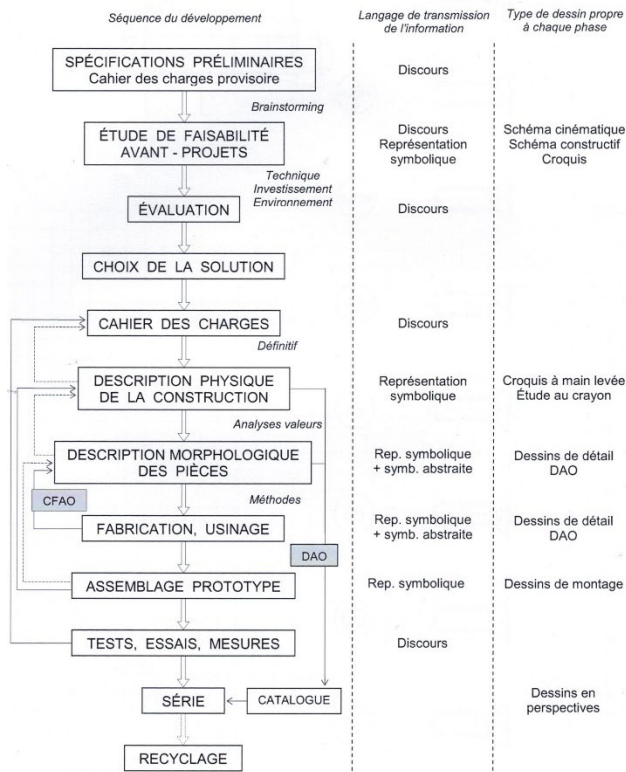
Mise en plan

- | | |
|--|---|
| ➤ Processus de Conception et cahier des charges | Construction mécanique I p. 10 / 12 |
| ➤ Croquis initial, Projections et point de fuite | |
| ➤ Feuille et Cartouche | Construction mécanique I p. 18 / VSM p. 38-39 |
| ➤ Style de traits | Construction mécanique I p. 20 / VSM p. 40 |
| ➤ Représentation des vues principales | Construction mécanique I p. 26-27 |
| ➤ Cotes | Construction mécanique I p. 42 / VSM p. 56-57 |
| ➤ Coupe, demi-coupe, vue partielle | Construction mécanique I p. 35-37 |

Processus de Conception et cahier des charges

1.7 Le processus de conception

Le cheminement de la pensée liant l'idée initiale au produit définitif passe par différentes phases. La complexité d'un projet n'influence que peu le déroulement des opérations. L'accent est porté davantage sur la transmission par le biais du dessin technique, qui est le but premier du cours, que sur les différentes phases de la conception. Une approche succincte d'un processus de conception est proposée afin d'en comprendre le fonctionnement.

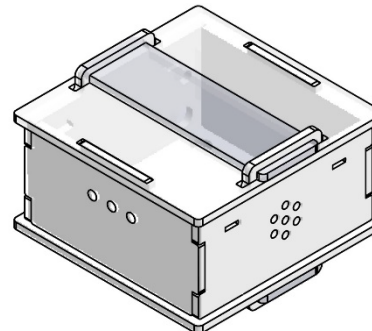


1.8 Les phases d'élaboration d'un produit

Le processus d'élaboration d'une pièce mécanique, ou plus généralement d'un produit, peut se décomposer en phases distinctes. Ces phases peuvent être les suivantes (parfois le processus est tronqué ou modifié s'il s'agit d'une modification de produit) :

Étude du cahier des charges
Conception du produit
Industrialisation
Fabrication du produit
Diffusion du produit

Toutes les différentes phases sont interdépendantes et sont applicables chronologiquement. Il ne serait pas logique de fabriquer un produit avant d'effectuer une étude de faisabilité. Les impératifs du marché, la concurrence, les effets de mode, et autres données factorielles obligent à travailler simultanément sur plusieurs phases, ou plus simplement ne pas attendre qu'une étape soit finalisée avant de penser et mettre en route le processus suivant. En clair, le temps alloué pour l'ensemble du processus d'élaboration du produit doit être inférieur à la somme des temps partiels. Si ce temps est très inférieur, c'est d'autant plus profitable au succès du produit.



1.9 Le cahier des charges d'un produit

Le cahier des charges est un dossier contenant tous les éléments relatifs à la pièce mécanique (ou ensemble) à réaliser. On y retrouve son nom, son utilité, son but, ses performances, ses dimensions, son aspect, ses caractéristiques, sa durée de vie, ses prix de fabrication et de vente, sa conformité aux Normes, sa projection de fabrication, etc. Cette liste n'est pas exhaustive. Un cahier des charges très complet et précis simplifie la tâche du département Recherche & Développement (R&D).

Le deuxième semestre du cours de construction débouche sur la création et l'utilisation d'un cahier des charges. Sur une durée de plusieurs semaines, les étudiants réalisent, sur la base de ce document, la conception d'un montage simple donnant lieu à sa fabrication durant un stage pratique en atelier de mécanique. Voici les projets des deux dernières années :

Robot grimpeur de corde (projet 2013)

Concevoir et réaliser un robot capable de grimper le long d'une corde verticale en nylon dont le diamètre est de 5 mm. La tension de cette dernière est assurée par une masse suspendue de 5 kg. La seule source d'énergie est produite par la mise en compression de 6 ressorts.

Chaque ressort a une longueur à vide de 205 mm, une course de compression de 152 mm et une constante de 310 N/m. Le déclenchement du mécanisme doit s'effectuer par la traction verticale vers le bas d'une ficelle. La traction de la ficelle ne doit pas apporter d'énergie supplémentaire utilisable pour le mouvement du robot.

L'encombrement total du robot ne doit pas dépasser une enveloppe sphérique fictive de 250 mm de diamètre, contrainte valable uniquement avant la mise en mouvement. Lors de l'ascension, le robot peut se déployer dans une dimension supérieure à 250 mm.

La mise en place du robot doit s'effectuer par une seule personne, en moins d'une minute, en veillant à la sécurité de l'opérateur et du public. Les ressorts peuvent être préalablement contraints avant la mise en place sur la corde.

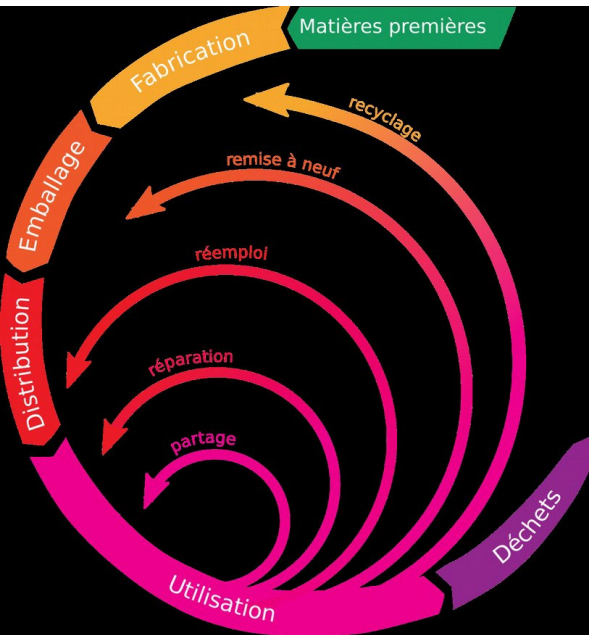
La mesure de la performance ascensionnelle est prise au point le plus bas du robot. Les pièces normalisées sont au minimum égales au nominal 4 mm.

La lecture du cahier des charges donne toujours lieu à une grande quantité de questions. Ce document est le fil conducteur des investigations et du développement ; il sert de guide des points à respecter, selon la demande du client.

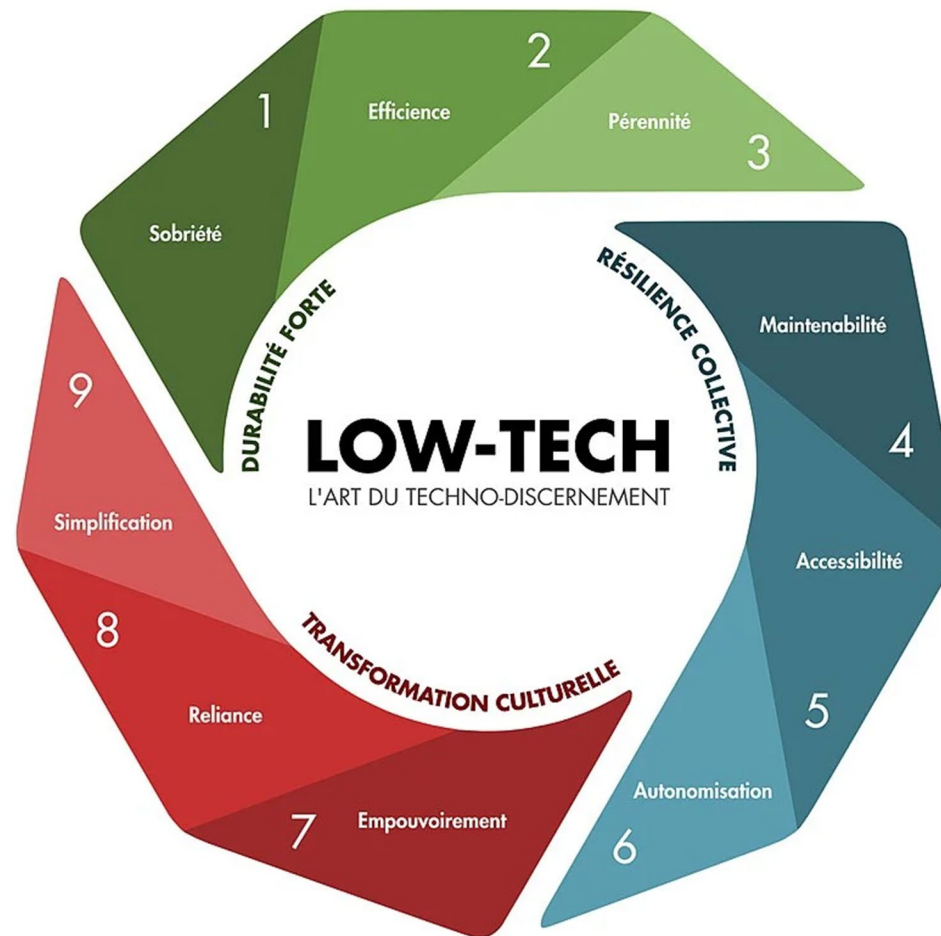
La structure d'un cahier des charges diffère d'un document à l'autre et correspond assez bien à la culture de l'entreprise émettrice. Son contenu peut s'avérer être très lacunaire ; toutefois il convient de rester prudent quand à son interprétation, c'est-à-dire qu'un consigne paraissant incomplète peut s'avérer relativement difficile à assurer. Par contre, un document stipulant une grande quantité de points à respecter ne laissera que peu de place à la liberté d'interprétation.

Exemple : un client désire fabriquer un appareil pour enduire d'un film plastique des pièces mécaniques mesurant jusqu'à 100 mm... Et c'est tout, il n'y a rien de plus comme informations.

Avec si peu de renseignements, le travail de développement n'est pas vraiment enviable. Mieux vaut disposer de nettement plus d'informations, soit d'un cahier des charges complet. Le travail s'en trouvera nettement simplifié.



Principe du Lowtech



DURABILITÉ FORTE

1 Sobriété

Recentre sur l'essentiel et tend vers l'optimum technologique : plus basse intensité et plus grande simplicité technologiques permettant d'assurer les besoins avec un haut niveau de fiabilité

2 Efficience

Minimise la consommation d'énergie et de ressources, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie en passant par la production, la distribution et l'utilisation

3 Pérennité

Présente une viabilité technique, fonctionnelle, écologique et humaine maximale à court, moyen et long terme

RÉSILIENCE COLLECTIVE

4 Maintenabilité

Peut être entretenu et réparé par les utilisateurs eux-mêmes autant que possible, avec des pièces et matériaux standards

5 Accessibilité

Offre une simplicité d'utilisation maximum

6 Autonomisation

Est fabriqué à partir de ressources exploitées et transformées le plus localement possible

TRANSFORMATION CULTURELLE

7 Empouvoirement

Facilite l'appropriation par le plus grand nombre, confère du pouvoir aux citoyens et aux territoires

8 Reliance

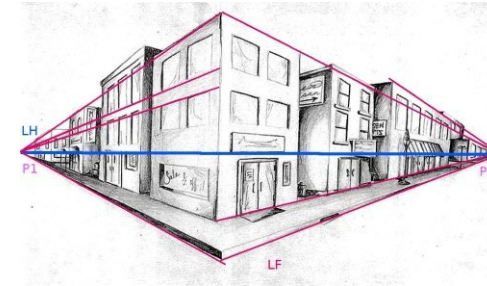
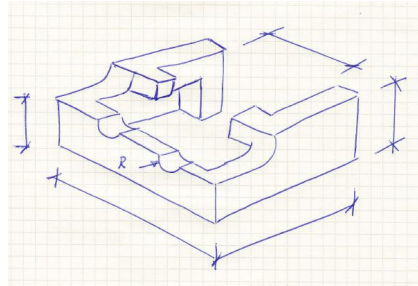
Favorise le partage de savoirs et de savoir-faire, la coopération, la solidarité, la cohésion sociale et les liens entre collectivités

9 Simplification

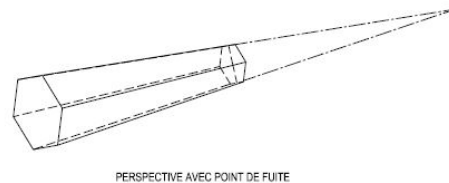
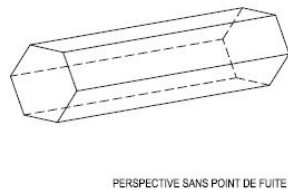
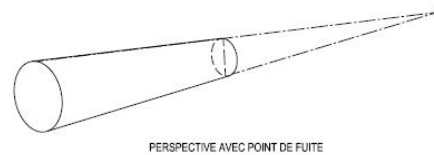
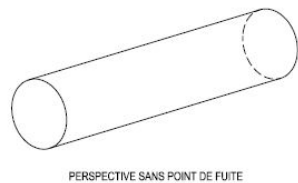
Décomplexifie la société aux niveaux socio-économique et organisationnel à partir d'une réflexion sur les besoins et les vulnérabilités

Dessin technique

➤ Croquis initial

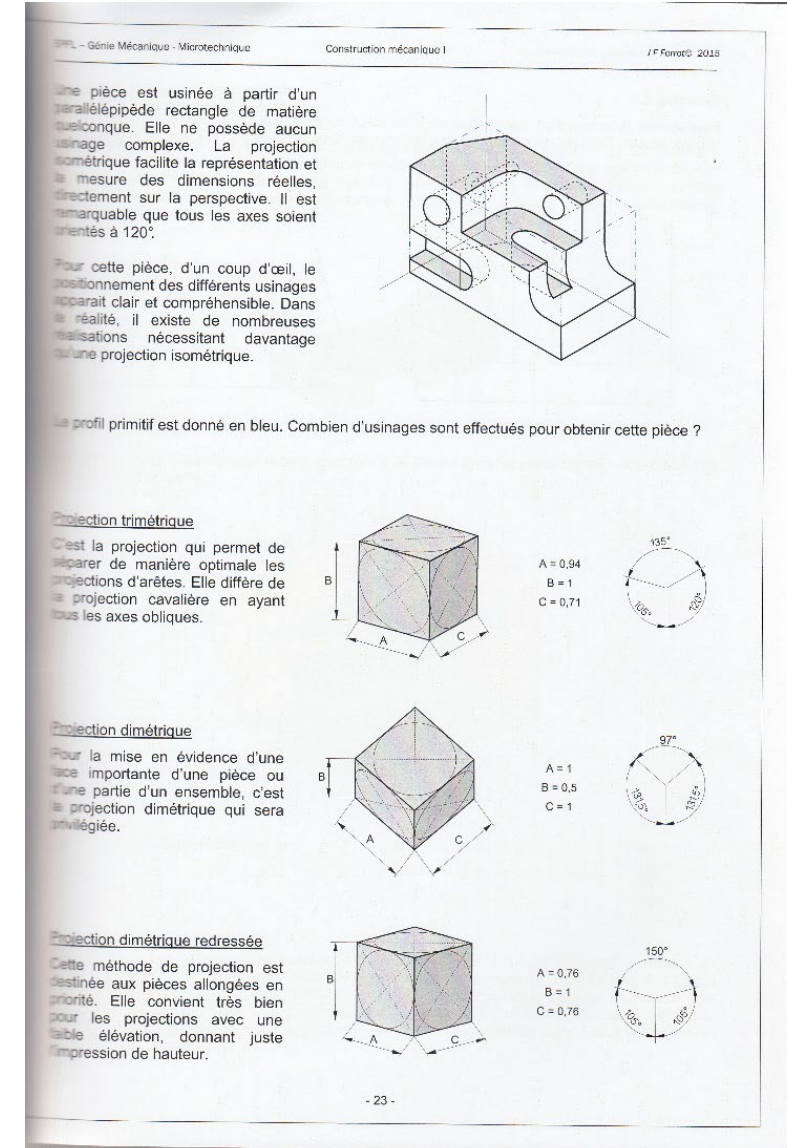
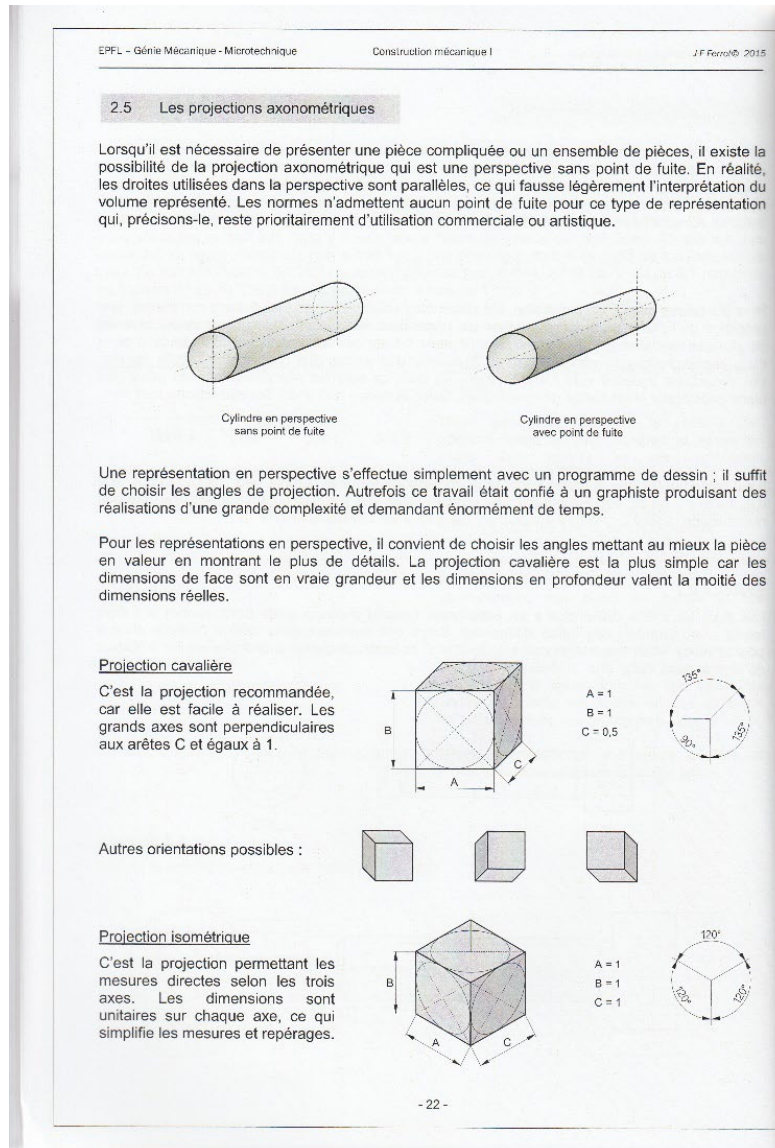


➤ Projections et point de fuite



➤ projections

Voir Construction mécanique I p. 22 / 23



EPFL - Génie Mécanique - Microtechnique Construction mécanique I J-F Ferrot © 2015

Éléments d'identification du cartouche :

- 1 Numéro de la pièce sur le dessin
- 2 Nombre de pièces identiques pour l'ensemble
- 3 Pièce, litre, kilo, etc.
- 4 Indice de modification
- 5 Date et visa de la modification
- 6 Nom ou logo de l'entreprise
- 7 Documents complémentaires
- 8 Indications spécifiques à chaque entreprise
- 9 Numéro d'identification s'il est différent de celui de la nomenclature
- 10 Dénomination complète : nom de la pièce, fonction
- 11 Numéro du document original
- 12 Numéro du document remplacé par le document établi
- 13 Date et signature de l'auteur et des instances de contrôle
- 14 Numéro de commande s'il est en rapport avec le client
- 15 Numéro de nomenclature ou de dessin
- 16 Nombre de feuilles de même numéro
- 17 Numéro de chaque feuille
- 18 Projection de type européenne
- 19 Échelle principale du dessin
- 20 Nom abrégé de la pièce, matière, traitement, etc.
- 21 Case libre

Voir les nombreux exemples dans l'**Extrait de Normes**, page 348 et suivantes.

2 Dessin
2.2 NORME ISO GPS FONDAMENTALE ISO 8015

2.2.4.3 Spécification GPS par défaut transformée

Un opérateur de spécification par défaut transformé doit être défini dans un document approprié. L'opérateur de spécification par défaut transformé doit être défini de manière soignée, univoque et exhaustive de façon à être considéré comme un opérateur de spécification complet. L'opérateur de spécification par défaut transformé doit être indiqué sur le dessin, dans ou à proximité du cartouche. L'indication doit au minimum contenir les informations suivantes lorsque des normes ne relevant pas du système ISO GPS sont appliquées:

Tolérancement ISO 8015 (AD) -ABC12345:2010

- le terme «Tolérancement ISO 8015»
- le symbole
- l'identification complète du document considéré et toute autre information nécessaire, qui prime sur la norme qui la précède

(AD) est l'acronyme de «Altered Default», c'est à dire «Défaut transformé».

2.2.4.3.1 Exemples

Pour toutes les entités dimensionnelles linéaires sur le dessin, c'est-à-dire des sphères et deux plans parallèles opposés, le principe d'enveloppe s'applique (fig. 38/1).

Tailles linéaires ISO 14405 ©

Tolérances générales	Surfaces	Echelle	Matériau

Date	Nom	Désignation
Etabli.		
Vérif.		
Norm.		

Fig. 38/1

Toutes les dimensions sont vérifiées selon ISO 291:23/50 Class2 (fig. 38/2).

Tolérances générales DIN 16742-TG5
Tailles linéaires ISO 14405
Rayons non cotés R0,5 ±0,1
Tolérancement ISO 8015 (AD) - ISO 291:23/50 Class 2

Tolérances générales	Surfaces	Echelle	Matériau

Date	Nom	Désignation
Etabli.		
Vérif.		
Norm.		

Fig. 38/2

2 Dessin
2.3 PRINCIPES GÉNÉRAUX DE REPRÉSENTATION DES DESSINS TECHNIQUES

2.3 Principes généraux de représentation des dessins techniques

2.3.1 Principes généraux de représentation (ISO 128-1, ISO 8015)

Les dessins techniques constituent un moyen de communication spécifique. Ils doivent se conformer aux principes suivants:

- **Explicite et clair:** pour chaque exigence dans un dessin, il ne doit y avoir qu'une seule interprétation. Elle doit être aisément compréhensible par chaque personne impliquée. L'incertitude consécutive à l'étendue d'interprétations autorisées d'une spécification mentionnée sur le dessin est appelée incertitude de spécification.
- **Remarque:** L'incertitude de spécification se situe dans le domaine de valeurs obtenues par les différentes interprétations de la spécification. Un fournisseur a le droit de profiter des incertitudes de spécification. Le fournisseur peut choisir chaque interprétation dans le domaine autorisé par l'incertitude de spécification.
- **Complet:** un dessin technique doit indiquer l'état final de l'objet représenté pour une fonction définie. Le contenu doit être complet pour assurer cette fonction, c'est-à-dire qu'il doit servir aussi bien pour la fabrication d'une pièce que pour la vérification de ses spécifications. Seules les exigences indiquées sur le dessin ou dans la documentation y afférente sont effectuées ou vérifiées. Un dessin peut contenir les exigences se référant aux différents états de finition du produit. Dans ce cas, il faut noter à quel état se réfère l'inscription sur le dessin.
- **Indépendant:** chaque exigence pour un élément ou une relation entre les éléments doit être satisfaite de manière indépendante des autres éléments. Toutes les spécifications doivent être respectées séparément sans influence d'autres spécifications (voir ISO 8015). Exception: par exemple symboles de modification © selon ISO 2692, CZ selon ISO 1101 ou ® selon ISO 14405-1.
- **Indépendant du langage:** les dessins doivent, de préférence, être indépendants du langage. Les textes ne devront être utilisés que dans le cartouche ou lorsqu'il n'est pas possible de représenter graphiquement l'information.
- **Conforme aux normes:** les normes internationales applicables doivent être mentionnées sur le dessin, conformément à la norme concernée. Exemple: tolérances générales ISO 2768-mK. De plus, il faut mentionner les autres documents y afférents et nécessaires à l'interprétation des dessins. Si nécessaire, il faut faire une liste des normes et documents utilisés pour les dessins.
- **Interprétable:** pour l'interprétation d'une spécification indiquée, on applique en général la dernière édition de la norme correspondante au moment de la réalisation du dessin.
- **Traçable:** la procédure de validation d'un dessin ainsi que toutes les modifications dans les dessins validés ainsi que les documents y afférents doivent être documentés sans équivoque (cf. chapitre 7.4).

La **température de référence** pour les spécifications indiquées sur le dessin et leur vérification est de 20 °C conformément à la norme SN EN ISO 1, si rien d'autre n'est indiqué. Toute condition supplémentaire ou différente devant être appliquée, par exemple une condition concernant l'humidité de l'air, doit être définie dans le dessin ou dans un document y afférent.

➤ Style de traits

Construction mécanique I p. 20 / VSM p. 40







EPFL - Génie Mécanique - Microtechnique Construction mécanique I J-F Ferret © 2015

2.3 Les traits de représentation

La représentation des pièces ou ensembles s'effectue en utilisant des traits de diverses largeurs et de divers types. C'est une nécessité afin de reconnaître les différentes parties d'une représentation et d'identifier facilement ce qui est représenté.

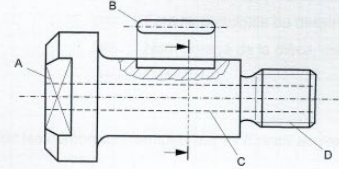
Il faut tenir compte de la dimension du dessin pour le choix de la largeur des traits. Le contour d'une pièce est en trait fort, mais il n'aura pas la même épaisseur sur une feuille A1 que sur une feuille A4. La règle utilisée est que le trait fort a une épaisseur double de celle de tous les autres traits. Le trait fort mesure 0,5 mm de largeur pour les formats A4, A3 et A2. Il est de 0,7 mm pour les formats A1 et A0. Dans les cas particuliers, il mesure 1 mm.

Les traits utilisés en construction sont les suivants :

	Trait fort continu	Utilisé pour le contour extérieur et les arêtes visibles.
	Trait fin continu	Utilisé pour les hachures, le contour des sections rabattues, les attaches et lignes de cotes, les repères et les indications complémentaires.
	Trait fin interrompu	Utilisé pour les arêtes cachées. Egalement employé pour les arêtes dans la matière.
	Trait fin mixte	Utilisé pour les axes de symétrie, les plans de symétrie, les niveaux de liquide, le cheminement des plans de coupe et les sections.
	Trait fin mixte à 2 tirets	Utilisé pour le profil d'une pièce mobile dans une autre position que celle de repos, le contour de la pièce primitive, les lignes de centre de gravité, les parties situées en avant du plan de coupe, les arêtes de piage.
	Trait fin à main levée	Utilisé pour délimiter une coupe partielle et indiquer le raccourcissement d'une pièce.

Exercice 2.2

Donner la signification des traits notés A, B, C et D.



- 20 -

2.3 PRINCIPES GÉNÉRAUX DE REPRÉSENTATION DES DESSINS TECHNIQUES

2.3.2 Traits

2.3.2.1 Types de traits (ISO 128-24)

Tableau 40/1 Types de traits

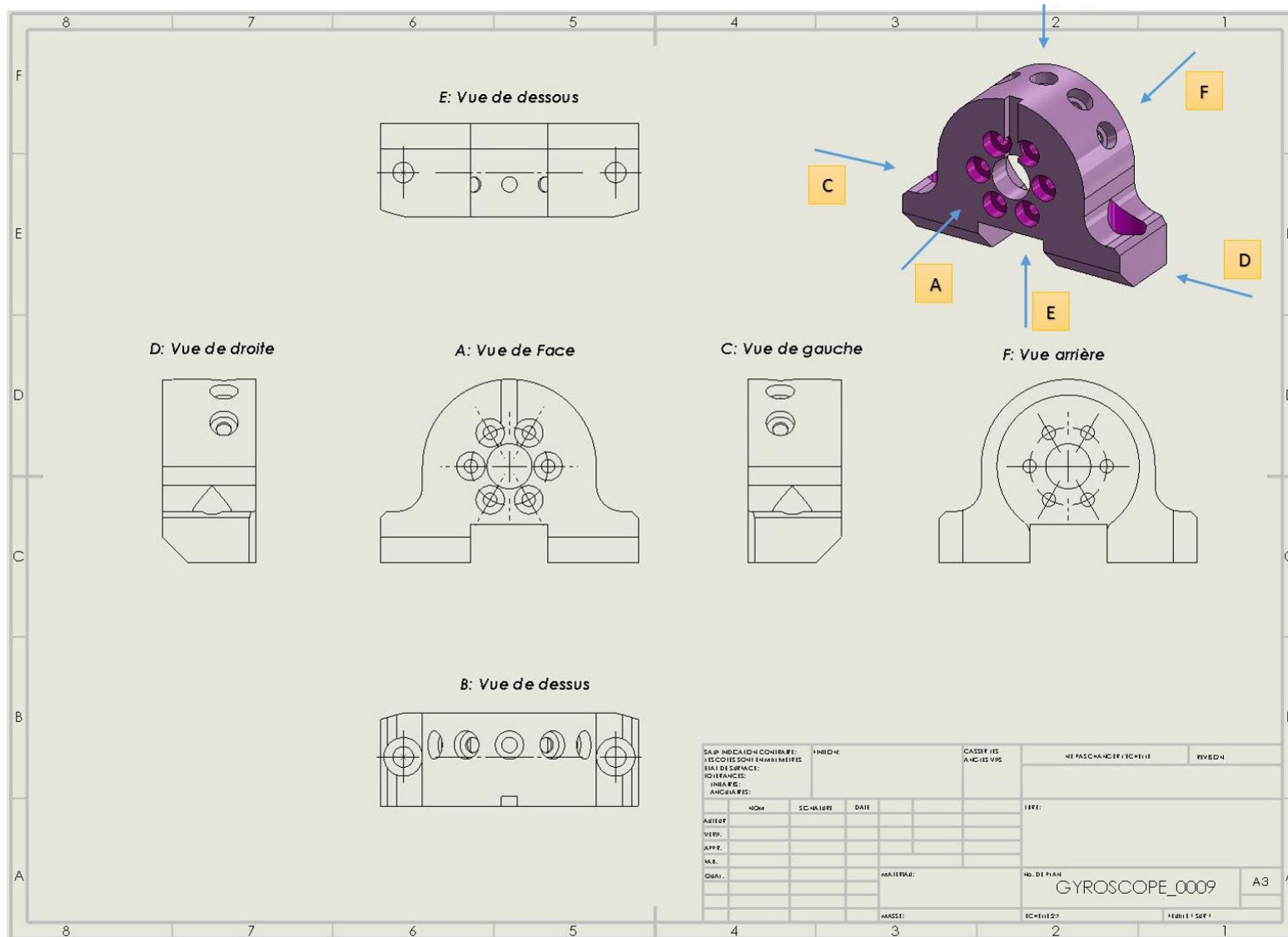
Dénomination et exemples d'utilisation (Désignation des traits A1 ... J3 voir fig. 41/1)	Largeurs recommandées pour formats	
	A4/A3/A2	A1/A0
Trait continu fort: Contours vus, arêtes visibles (A1), limite du filetage à filets complètement formés (A2), sommets de filetages (A3), flèches d'une ligne de coupe, changement de direction des lignes de coupe (A4). ISO N° 01.2	0,5	0,7
Trait continu fin: traits d'intersection imaginaires (B1), lignes de cote (B2), lignes d'attaches (B3), lignes repère et traits de référence (B4), hachures (B5), contours de sections rabattues (B6), fonds de filets vus (B7). Axes courts, traits de courbures sur les pièces découpées et les pièces industrielles, origine et extrémités des lignes de cote, diagonales indiquant une surface plane, encadrement de détails, indication de détails répétitifs, lignes de projection, emplacement de laminage, traits de grilles. ISO N° 01.1	0,25	0,35
Trait continu fin à main levée: limites de vues, coupes et sections, partielles ou interrompues, si la limite n'est pas un axe de symétrie ou un axe (C1). ISO N° 01.1		
Trait continu fin avec zigzags: ISO N° 01.1		
Trait interrompu fin: contours cachés, arêtes cachées (F1). ISO N° 02.1		
Trait mixte fin à un point et un tiret long: Axes (G1), axes et plans de symétries (G2), cercles primitifs des engrenages, diamètre du cercle des trous, lignes de coupe (G3). ISO N° 04.1		
Trait mixte fort à un point et un tiret long: Indication de zones (limitées) nécessaires de traitement de surface, par exemple traitement thermique, élément restreint tolérance (H1), position de plans de coupe (H2). ISO N° 04.2	0,5/0,25	0,7/0,35
Trait mixte fin à deux points et un tiret long: contours de pièces voisines (J1), positions extrêmes de pièces mobiles (J2), contours primitifs avant formage (J3), lignes des centres de gravité. Pièces situées en avant d'un plan de coupe, contours d'autres exécutions possibles, contours de la partie finie d'une pièce découpée, encadrement de champs/zones particulières, axes optiques. ISO N° 05.1	0,5	0,7
Trait pointillé fort: indication des zones où le traitement thermique n'est pas autorisé. ISO N° 07.2	0,5 1)	0,7 1)

Dans l'intérêt des techniques de reproduction, il faut satisfaire aux exigences suivantes lors de l'exécution d'un dessin:

- Les dessins doivent être bien contrastés (une combinaison crayon-encre de Chine ne convient pas à la micrographie.²⁾)
- Dans les dessins industriels, on utilise généralement deux largeurs de traits.
- Il convient que le rapport entre les largeurs de traits soit de 1:2, mais au minimum 0,7 mm.

1) Ce type de trait est utilisé en particulier pour les dessins exécutés d'une façon automatisée.
2) Autres directives pour micrographie: voir SN ISO 6428.
3) Dans l'ISO 128-24, le chiffre repère pour la largeur de trait n'est pas mentionné.

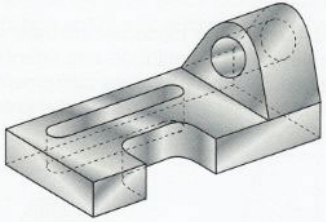
- Représentation des vues principales: Correspondance entre les vues



➤ Représentation des vues principales Construction mécanique I p. 26 / 27

EPFL – Génie Mécanique - Microtechnique Construction mécanique I J.F. Ferrot© 2015

Selon les projections orthogonales, la représentation de la pièce choisie correspond au dessin suivant :



Vue de face VF

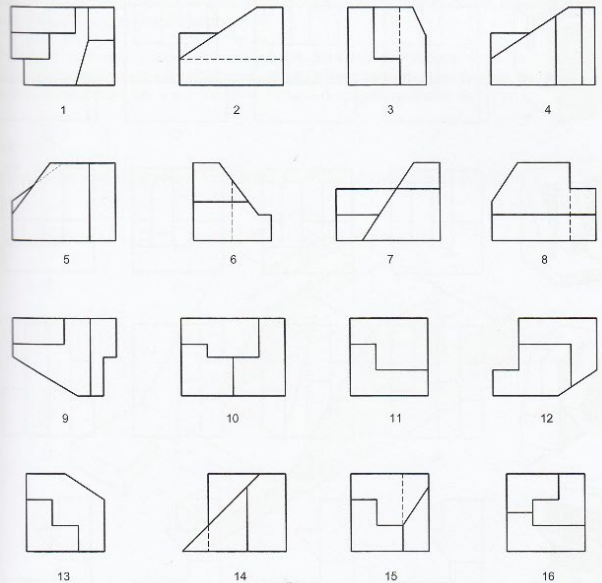
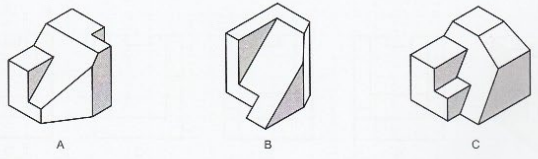
Vue de gauche VG

Vue de dessus VD

Les arêtes cachées sont représentées ainsi que les traits d'axes. Ils permettent de localiser le perçage et les fraisages. Dans les futurs dessins, les traits fins de liaison entre les vues ne seront plus représentés ; ils le sont ici pour faciliter la compréhension du positionnement des différentes vues. Pour les dessins faits à la main, l'alignement des différentes vues est facilité par le quadrillage de la feuille.

EPFL – Génie Mécanique - Microtechnique Construction mécanique I J.F. Ferrot© 2015

Exercice 2.5
Reporter dans la table le numéro des vues correspondant à la même projection isométrique.

Pièce	A	B	C
Vue de face			
Vue de gauche			
Vue de dessus			

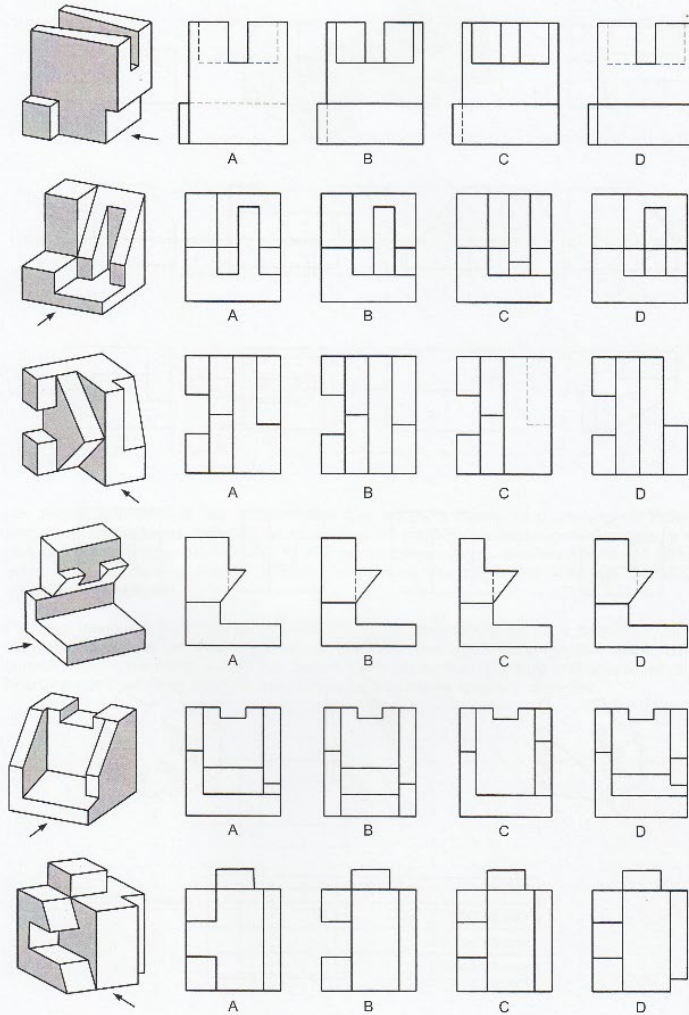
- 27 -

Dessin technique

➤ Exercice vue et perspective - Construction mécanique I p. 28 et 109

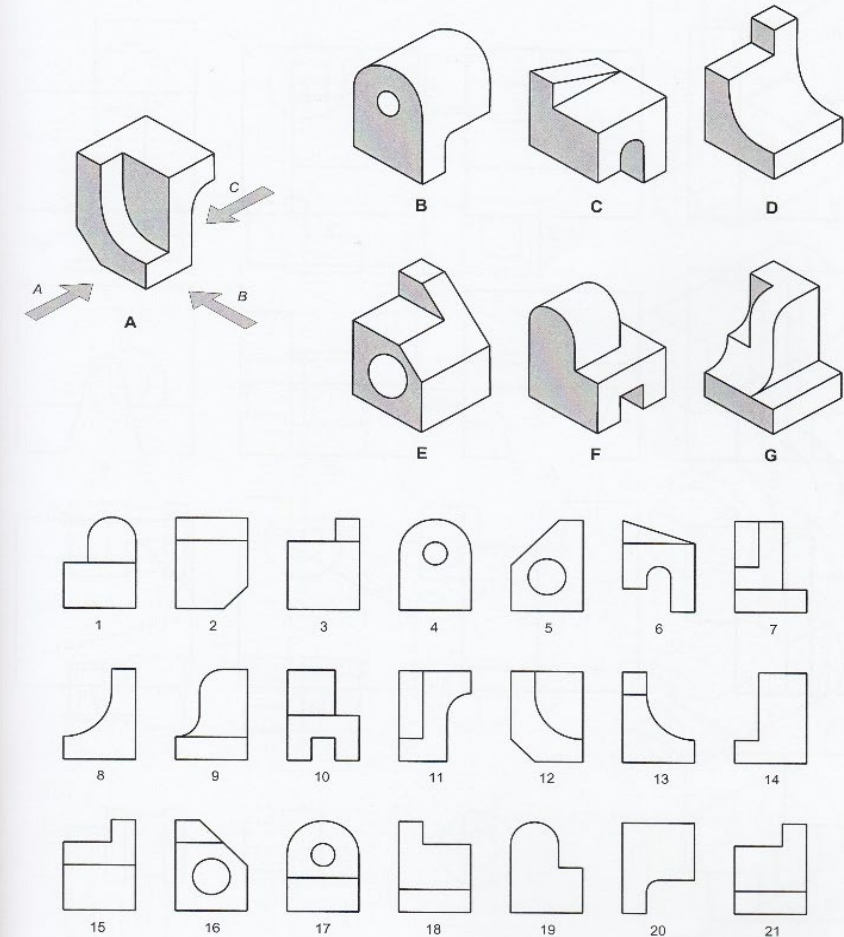
Exercice 2.6

Trouver la vue correspondant à la perspective, selon le sens d'observation indiqué.



Exercice 3

Compléter le tableau relatif aux 3 vues A, B et C de chacune des 7 pièces proposées. Représenter les arêtes cachées en traitillé sur les 21 vues, là où elles sont nécessaires.



Pièce	A			B			C			D			E			F			G		
Vue de	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Numéro																					

Dessin technique

➤ Cotation simplifiée

VSM p. 61-65

2 Dessin 2.5 COTATION

2.5.3.2 Cotes définies par des lettres

Afin d'éviter de répéter la même cote ou de longues lignes de repère, il est permis d'utiliser des lettres pour indiquer les valeurs de cotes. Celles-ci doivent être définies sur le même dessin ou dans la documentation associée (fig. 61/1).

Si le dessin est suffisamment clair, l'indication du nombre d'éléments peut être omise.

2.5.4 Inscription des cotes spéciales

2.5.4.1 Symboles (extrait)

Les symboles suivants, utilisés pour préciser une forme, sont placés devant la cote:

∅: Diamètre	(fig. 61/2)
R: Rayon	(fig. 61/3)
□: Carré	(fig. 61/2)
Sø: Diamètre de la sphère	(fig. 61/4)
SR: Rayon de la sphère	(fig. 61/4)
∩: Arc	(fig. 62/3)
t=: Epaisseur	(fig. 61/5)

2.5.4.2 Diamètres

Le symbole graphique «∅» doit précéder la valeur de cote (fig. 58/4 et 61/2).

Lorsqu'il est possible d'illustrer un diamètre avec une flèche, la ligne de cote doit dépasser le centre (fig. 57/4 et 58/4).

2.5.4.3 Rayons

Les lignes de cote doivent être inscrites à l'intersection de la ligne de cote et de l'arc. La flèche se trouve à l'intérieur du contour ou de la ligne d'attache de l'élément (fig. 61/3).

Si la taille du rayon sur le dessin ne le permet pas, la flèche de cote peut être placée à l'extérieur du contour ou de la ligne d'attache (fig. 61/5).

Lorsque le centre d'un rayon se trouve en dehors des limites de l'espace disponible, la ligne de cote du rayon doit être brisée ou interrompue pour continuer perpendiculairement selon qu'il est nécessaire ou non de situer le centre (fig. 61/4 et 61/5).

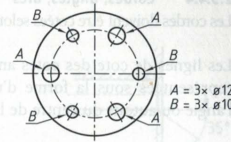


Fig. 61/1

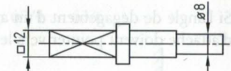


Fig. 61/2

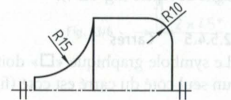


Fig. 61/3

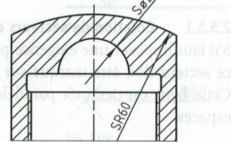


Fig. 61/4

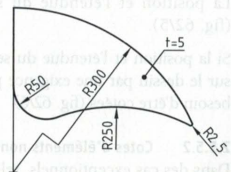


Fig. 61/5

2 Dessin 2.5 COTATION

2.5.6 Éléments équidistants

Lorsque des éléments sont équidistants et disposés de façon régulière, la cotation peut être simplifiée.

Les éléments disposés à intervalles linéaires répétitifs peuvent être représentés avec un nombre d'intervalles et leur cote séparée par le signe «x» (fig. 64/1).

S'il y a un risque de confusion entre la longueur de l'intervalle et le nombre d'intervalles, un intervalle doit être coté avec une cote auxiliaire (fig. 64/2).

Les éléments disposés à intervalles angulaires sont cotés selon les mêmes principes que les éléments disposés à intervalles linéaires (fig. 64/3).

La cote peut être précédée soit du nombre d'éléments (fig. 64/4), ou le nombre d'éléments peut être indiqué avec une ligne repère et de référence (fig. 64/5).

Les éléments possédant la même valeur dimensionnelle peuvent être cotés par l'indication du nombre d'éléments et de leur cote séparée par le signe «x» (fig. 64/6 et 64/7).

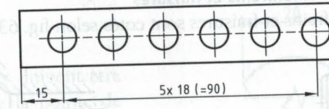


Fig. 64/1

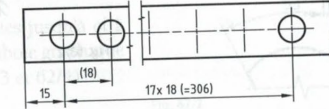


Fig. 64/2

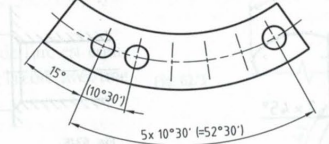


Fig. 64/3

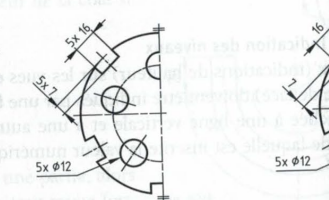


Fig. 64/4

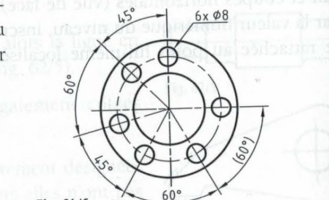


Fig. 64/5

2 Dessin 2.5 COTATION

2.5.7 Disposition des cotes

2.5.7.1 Cotation en série

Pour l'utilisation de la cotation en série, les chaînes de cotes doivent être disposées les unes à la suite des autres (fig. 65/1).

Ce genre de cotation ne doit être employé que lorsque l'éventuelle accumulation des écarts n'affecte pas l'aptitude à l'emploi de la pièce (fig. 65/1).

2.5.7.2 Cotation en parallèle

Les lignes de cote doivent être tracées parallèlement dans un, deux ou trois sens orthogonaux ou de façon concentrique (fig. 65/2 et 65/3).

Celles-ci sont à employer de préférence lorsque des cotes de même direction ont un élément de référence commun.

2.5.7.3 Cotation continue (en gradins)

Il est possible d'utiliser la cotation continue en cas de manque de place ou pour répondre à des besoins spécifiques.

La cotation continue est une application simplifiée de la cotation parallèle.

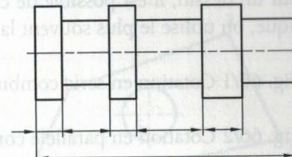


Fig. 65/1

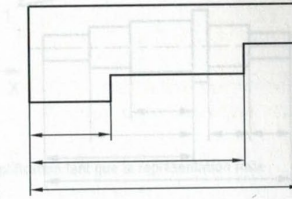


Fig. 65/2

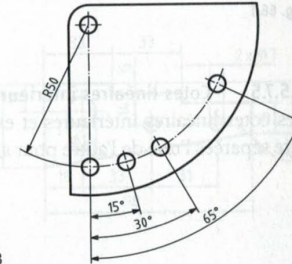


Fig. 65/3



Fig. 65/4

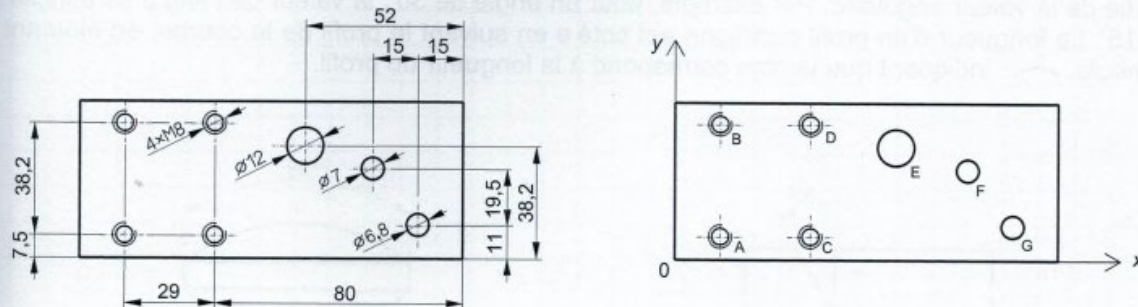
➤ Cotes

Construction mécanique I p. 43 / VSM p. 67

3.4 Les lignes d'attache, les lignes de cote, les lignes de repère

L'indication de la dimension d'une pièce se fait à l'extérieur du profil de la pièce. Les premières lignes de cote sont éloignées de 10 mm au minimum, puis les suivantes sont à intervalle régulier de 7 mm. Pour un dessin de plus grande dimension, ces distances passeront à 15 et 10 mm. Ces distances correspondent à une disposition aérée sans perdre trop de place. Il faut éviter une cotation trop proche du profil de la pièce. Les lignes de cote, les lignes d'attache et les lignes de repère sont réalisées avec un trait dont l'épaisseur est moitié de celle du profil dessiné.

Pour une pièce simple, il y a la possibilité de la cotation classique et la cotation en coordonnées (Extrait de Normes page 52). Cette deuxième option est utilisée pour la programmation sur les centres d'usinage et machines CNC. Un des angles de la pièce étant choisi comme référence.



Usinage	A	B	C	D	E	F	G
Dimension	M8	M8	M8	M8	Ø12	Ø7	Ø6,8
x	15	15	44	44	72	94	109
y	7,5	45,7	7,5	45,7	38,2	30,5	11

- 43 -

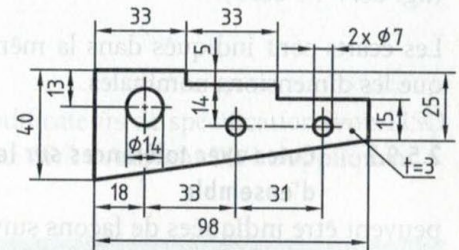
2.5.8 Exemples d'application

Les figures montrent les cotations selon des points de vue fonctionnels différents.

2.5.8.1

L'observation exacte des distances à partir d'un axe ou d'une certaine arête est inutile, l'interchangeabilité de la pièce n'étant pas exigée (fig. 67/2).

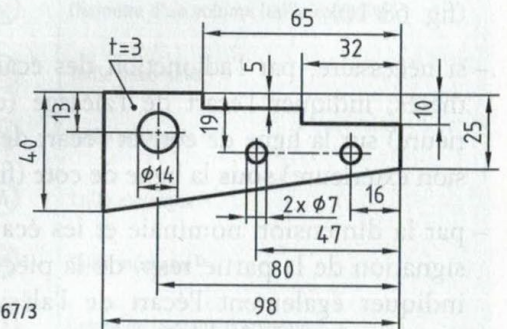
Fig. 67/2



2.5.8.2

Les dégagements et la position des trous doivent être respectés par rapport à l'arête supérieure et l'arête extrême droite (fig. 67/3).

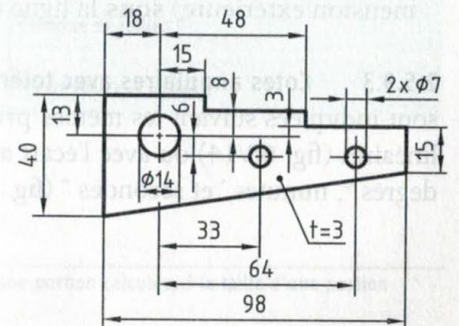
Fig. 67/3



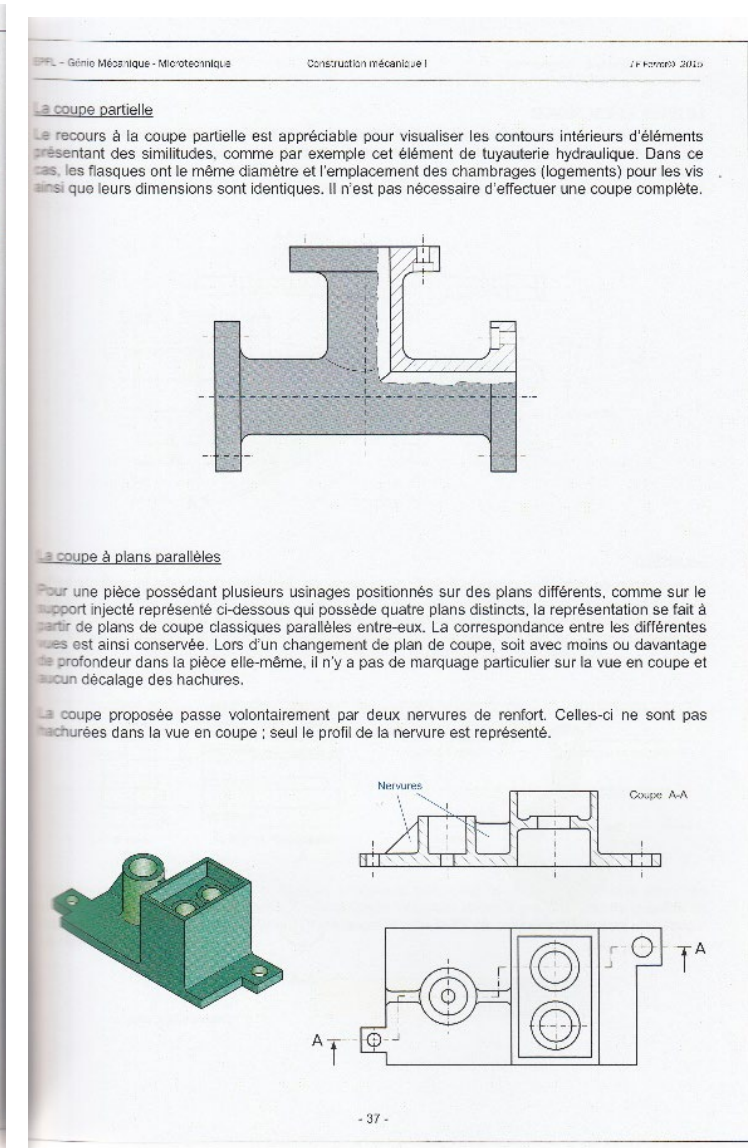
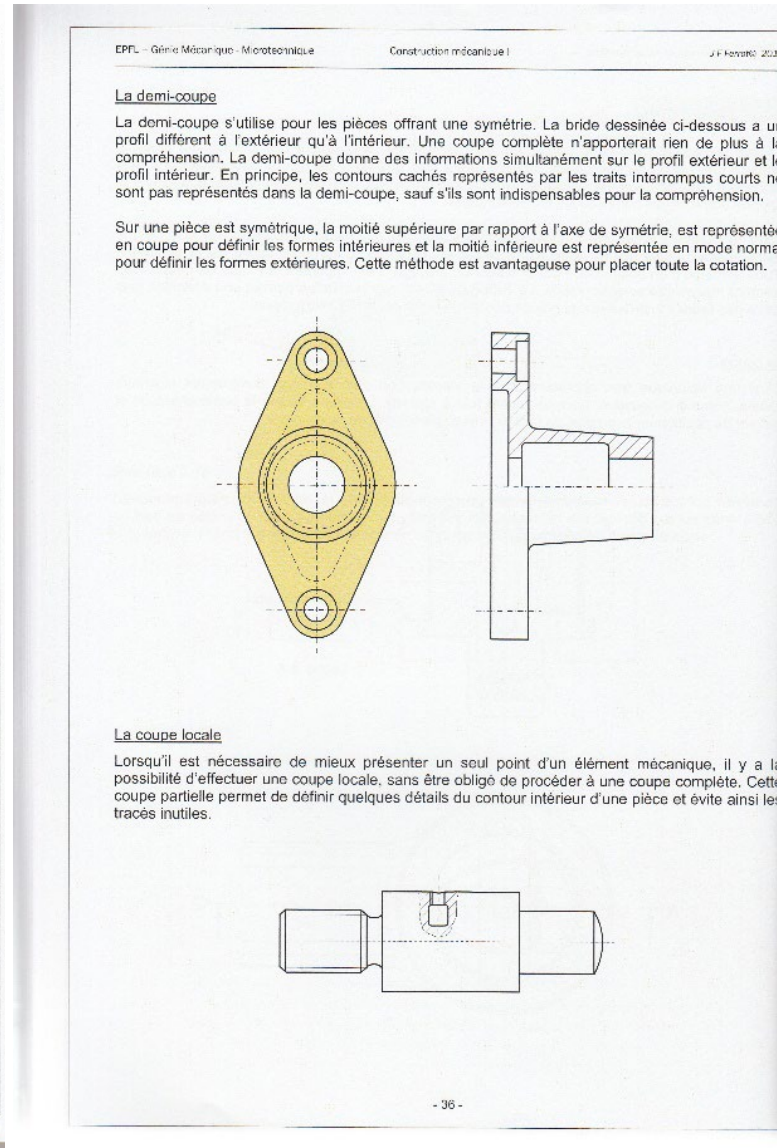
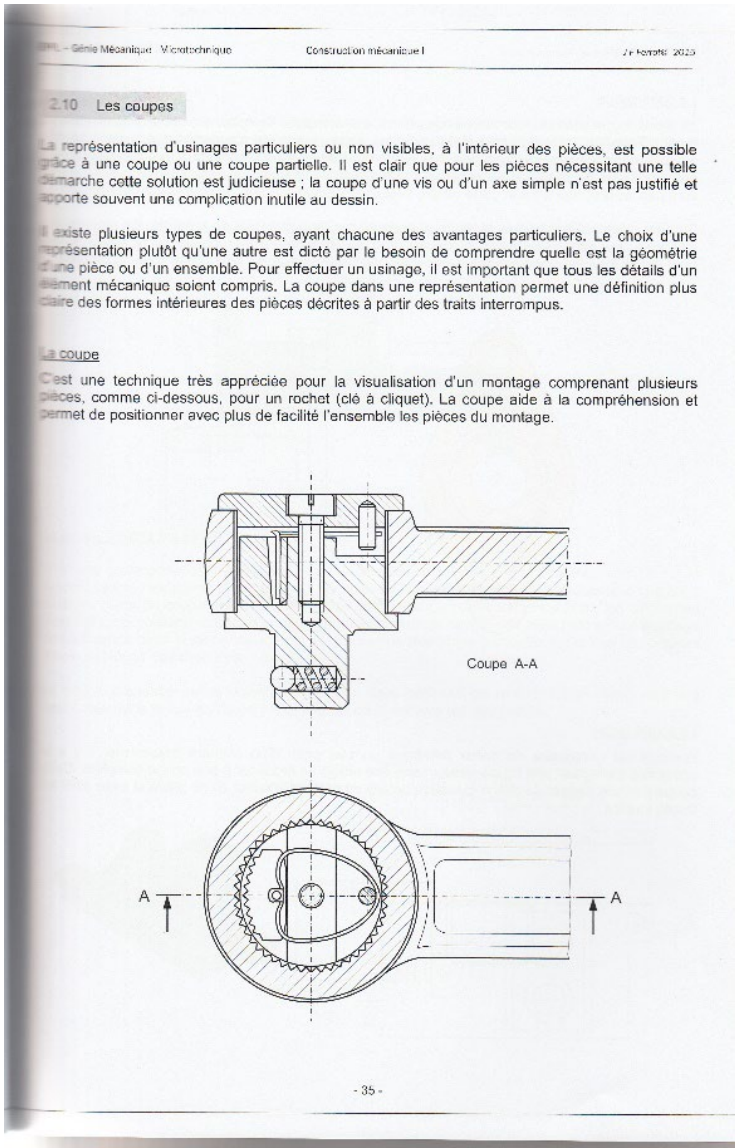
2.5.8.3

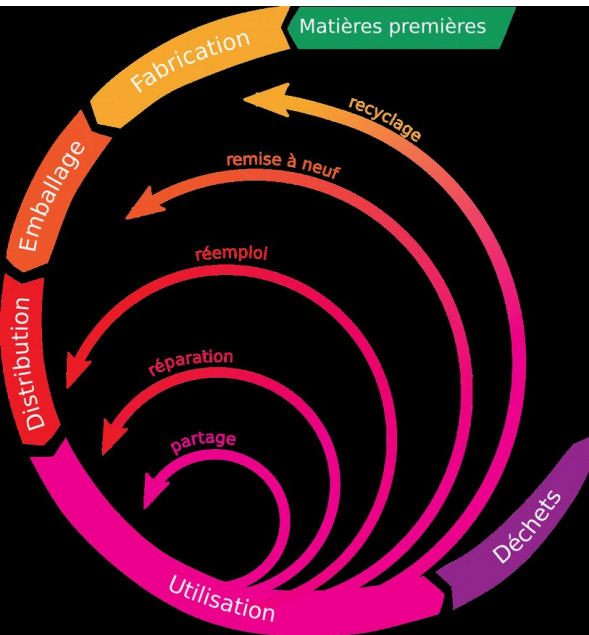
Les dégagements et la position des trous doivent être respectés à partir des deux axes du perçage Ø14 (fig. 67/4).

Fig. 67/4



➤ Coupe, demi-coupe et coupe partielle Construction mécanique I p. 35 – 37





Principe du Lowtech



DURABILITÉ FORTE

1 Sobriété

Recentre sur l'essentiel et tend vers l'optimum technologique : plus basse intensité et plus grande simplicité technologiques permettant d'assurer les besoins avec un haut niveau de fiabilité

2 Efficience

Minimise la consommation d'énergie et de ressources, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie en passant par la production, la distribution et l'utilisation

3 Pérennité

Présente une viabilité technique, fonctionnelle, écologique et humaine maximale à court, moyen et long terme

RÉSILIENCE COLLECTIVE

4 Maintenabilité

Peut être entretenu et réparé par les utilisateurs eux-mêmes autant que possible, avec des pièces et matériaux standards

5 Accessibilité

Offre une simplicité d'utilisation maximum

6 Autonomisation

Est fabriqué à partir de ressources exploitées et transformées le plus localement possible

TRANSFORMATION CULTURELLE

7 Empouvoirement

Facilite l'appropriation par le plus grand nombre, confère du pouvoir aux citoyens et aux territoires

8 Reliance

Favorise le partage de savoirs et de savoir-faire, la coopération, la solidarité, la cohésion sociale et les liens entre collectivités

9 Simplification

Décomplexifie la société aux niveaux socio-économique et organisationnel à partir d'une réflexion sur les besoins et les vulnérabilités

- *Cours de construction mécanique*

Techniques de fabrications de pièces mécaniques

Usinage par enlèvement de matière

- Tournage
- Fraisage
- Perçage / filetage / taraudage / alésage
- «Nouvelles» technologies 3D

Construction mécanique I p. 56

Construction mécanique I p. 58

Construction mécanique I p. 59 / 60 / 61 / 72

VSM p. 146-148

Techniques traditionnelles de fabrications de pièces mécaniques

➤ Tournage Construction mécanique I p. 56

EPFL - Génie Mécanique - Microtechnique

Construction mécanique I

J.F. Ferrot© 2015

5 LES TECHNIQUES DE FABRICATION

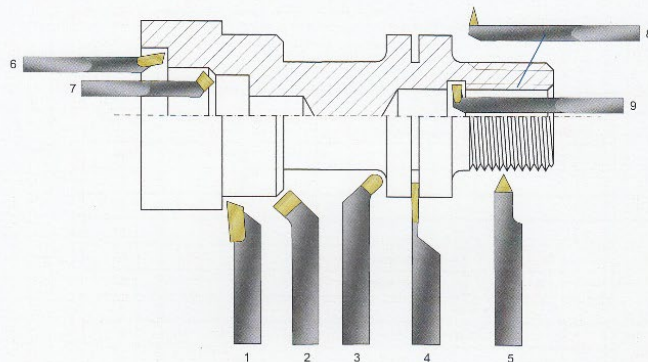
5.1 L'usinage

La réalisation d'usinages nécessite l'emploi d'outils permettant d'obtenir le profil désiré, par enlèvement de matière principalement. Afin de comprendre comment sont effectuées les opérations d'usinage les plus courantes, nous abordons dans ce cours les procédures génériques d'usinage, telles que le tournage, le fraisage, le perçage et les petits travaux dits d'établi.

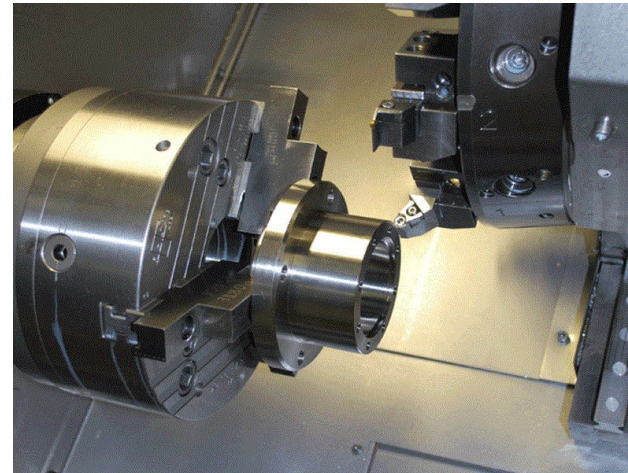
Il existe d'autres moyens de fabrication, comme le matriçage, l'étampage, l'électroérosion le découpage à fil, le découpage laser, la fonderie et l'injection, pour ne citer que les principaux.

5.2 Le tournage

L'enlèvement de matière par rotation selon un axe fixe va donner naissance à un profil circulaire. En regardant de plus près une machine, un instrument, un véhicule, il y a un ou plusieurs éléments fonctionnant par rotation. Les mouvements les plus fréquemment rencontrés étant la translation et la rotation. Il existe des burins standards, convenant pour les usinages courants du tournage et une grande quantité de burins dont le profil particulier convient aux besoins spécifiques. Voici les burins les plus courants et sur la pièce tournée, le profil pouvant être obtenu :



- 1 Burin couteau coudé à droite (se déplace depuis la droite)
- 2 Burin à charioter à 45° coudé à droite
- 3 Burin rayon coudé à gauche (se déplace depuis la gauche)
- 4 Burin à saigner ou tronçonner
- 5 Burin à fileter
- 6 Burin d'intérieur à chambrer
- 7 Burin d'intérieur à charioter
- 8 Burin d'intérieur à fileter
- 9 Burin d'intérieur pour gorge



Techniques traditionnelles de fabrications de pièces mécaniques

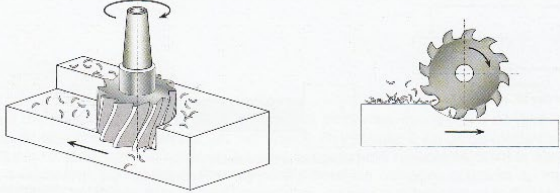
➤ Fraisage Construction mécanique I p. 58

EPFL - Génie Mécanique - Microtechnique Construction mécanique I J.F. Ferrot © 2015

5.3 Le fraisage

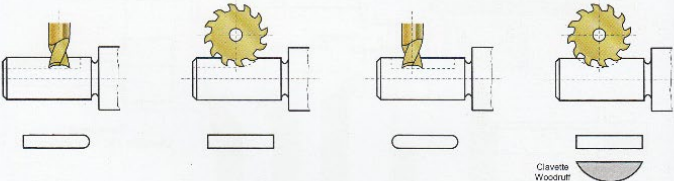
Le principe du fraisage est celui de l'enlèvement de matière à l'aide d'outils de coupe à dents multiples, par rotation, sur des pièces généralement prismatiques. Les outils circulaires utilisés se nomment des fraises. Lors de l'usinage, la fraise est animée d'un mouvement circulaire uniforme, généralement fixe. La pièce à usiner est fixée rigidement dans un étau ou bridée sur la table de travail de la fraiseuse et se déplace à faible vitesse pour procéder à l'usinage.

Les fraiseuses classiques, par opposition aux centres d'usinage et CNC complexes, possèdent trois axes de translation permettant de réaliser une grande quantité d'usinages courants.



Le fraisage des rainures de clavettes

Hormis le tournage et le fraisage classiques, il existe de nombreuses opérations utilisant de l'outillage particulier. Les rainures de clavette ont de formes diverses et sont obtenues par fraisage. (Extrait de Normes page 216)

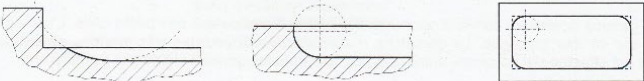


Clavette Woodruff

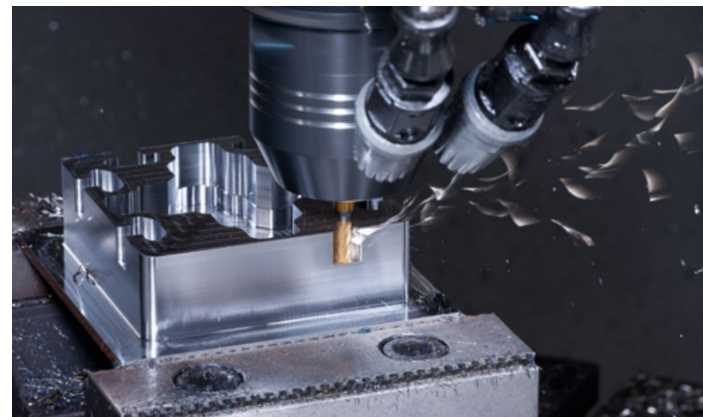
Selon les applications, on choisira un type de clavette plutôt qu'un autre. Le dernier type proposé est la clavette Woodruff ou demi-lune. Très appréciée dans divers petits montages car elle est autocentrante et facile d'utilisation.

Les restrictions de fraisage

Certains fraisages sont impossibles à réaliser, à cause de la géométrie de la pièce à réaliser ou à cause de l'utilisation inappropriée de la fraise. Il existe de nombreux cas. En voici quelques-uns :



- 58 -

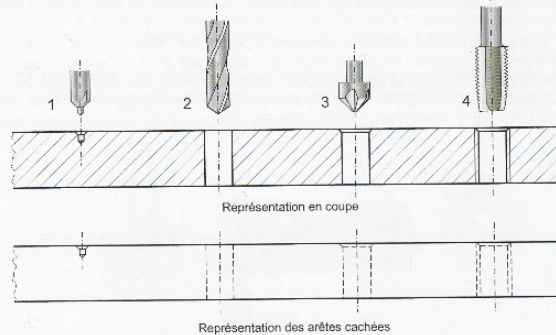


Techniques traditionnelles de fabrications de pièces mécaniques

➤ Perçage / filetage / taraudage / alésage

Construction mécanique I p. 60 / 61

Une fois la position du taraudage localisée, on perce un trou de centrage à l'aide d'une mèche à centrer (1). Ce trou est peu profond et sert à éviter que la mèche (2) ne dévie au début du perçage. Pour faciliter l'introduction du taraud, un chanfrein d'une profondeur égale à la moitié du pas est effectué à l'aide d'une fraise conique à 90° (3) (fraise à ébavurer). Finalement, le filet hélicoïdal est taillé grâce au taraud (4) jusqu'à la profondeur désirée (borgne ou traversant).



Le diamètre de perçage avant taraudage est donné par une table, disponible dans les ateliers :

M	Pas mm	Forêt ø	MF	Pas mm	Forêt ø	UNC	Filets / inch	Forêt ø	UNF	Filets / inch	Forêt ø	Wwh [*]	Filets / inch	Forêt ø
1,6	0,35	1,25	2,5	0,35	2,2	2	56	1,8	2	64	1,8	1/8"	40	2,5
1,8	0,35	1,45	3	0,35	2,65	3	48	2,0	3	56	2,1	7/16"	24	3,6
2	0,40	1,60	3,5	0,35	3,15	4	40	2,3	4	48	2,4	1/2"	20	5,1
2,5	0,45	2,05	4	0,50	3,5	5	40	2,6	5	44	2,6	5/8"	18	6,5
3	0,50	2,50	4,5	0,50	4	6	32	2,7	6	40	2,9	3/4"	16	7,9
4	0,70	3,30	5	0,50	4,5	8	32	3,5	8	36	3,5	7/8"	14	9,2
5	0,80	4,20	5,5	0,50	5	10	24	3,8	10	32	4,0	1 1/2"	12	10,4
6	1,00	5,00	6	0,75	5,2	12	24	4,5	12	28	4,6	5/8"	11	13,4
8	1,25	6,80	7	0,75	6,2	1/2"	20	5,1	1/4"	28	5,4	3/4"	10	16,2
10	1,50	8,50	8	0,75	7,2	3/4"	18	6,5	3/8"	24	6,9	7/8"	9	19,2
12	1,75	10,2	8	1,00	7	7/8"	16	7,9	1/2"	24	8,4	1"	8	22,0
16	2,00	14,0	9	0,75	8,2	1 1/8"	14	9,3	1 1/8"	20	9,9	1 1/4"	7	24,5
20	2,5	17,5	9	1,00	8	1 1/2"	13	10,7	1 1/2"	20	11,5	1 1/4"	7	27,7
24	3,00	21,0	10	0,75	9,2	1 3/8"	12	12,3	1 3/8"	18	13,0	1 1/2"	6	30,2
27	3,00	24,0	10	1,00	9	1 3/4"	11	13,5	1 3/4"	18	14,5	1 1/2"	6	33,5
30	3,50	26,5	10	1,25	8,8	1 7/8"	10	16,5	1 7/8"	16	17,4	1 3/4"	5	35,5
36	4,00	32,0	11	0,75	10,2	2"	9	19,3	2"	14	20,4	1 7/8"	5	38,5
42	4,50	40,5	11	1,00	10	2 1/4"	8	22,2	2 1/4"	12	23,2	2"	4,5	41,2

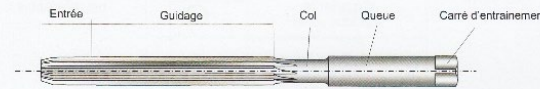
* Wwh : filetage Whitworth, référencé en inches. Le pas pour les filetages UNC, UNF et Wwh est donné en nombre de filets par inch.

Exercice 5.1

Une pièce en aluminium relativement sophistiquée et coûteuse provient d'une machine fabriquée aux États-Unis. Elle possède quatre taraudages 5/16" UNF profonds de 7/8". Tous les filets sont partiellement arrachés suite à de nombreux démontages et un manque de soin évident. Vous voulez sauver cette pièce en usinant un taraudage métrique fin à la place du taraudage UNF. Quelle dimension minimale allez-vous adopter ? Justifiez votre choix. Indiquer le diamètre de perçage et sa profondeur (la dimension notée " correspond à 1 inch, soit 25,4 mm).

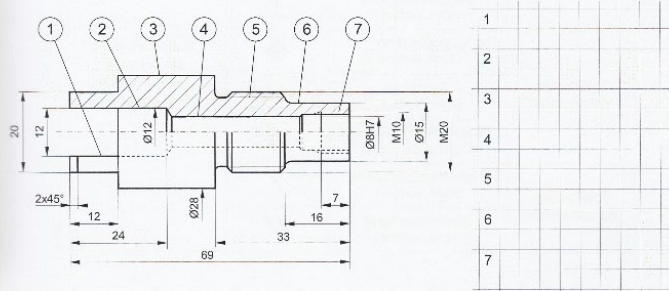
5.6 L'alésage

Pour obtenir un trou circulaire d'un diamètre selon la tolérance H7 et d'un état de surface de qualité élevée, on utilise un alésoir. Cet outil existe en version à main ou en version machine. Le perçage initial doit être de 0,10 à 0,20 mm en dessous de la cote nominale. Le passage de l'alésoir ne va enlever qu'une faible quantité de matière et assurer une excellente finition.



Exercice 5.2

Citer quels sont les usinages appropriés notés pour chaque position, afin d'obtenir la dimension spécifiée.



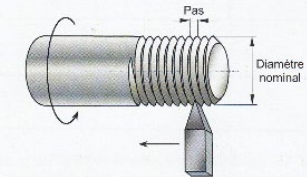
- 61 -



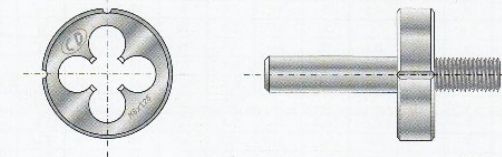
5.4 Le filetage

L'opération consistant à tailler un filet hélicoïdal sur un cylindre se nomme fileter. Le filetage peut se faire à la main avec des outils d'établi, ou à la machine, tour ou centre d'usinage. Le choix de l'outillage dépend de la dimension du filetage à fabriquer, du nombre de pièces, de la matière, etc.

Le filetage sur un tour consiste à déplacer de manière constante, selon un pas défini, un burin qui va enlever la matière en creusant un sillon. Plusieurs passages sont nécessaires en augmentant progressivement la profondeur de la passe jusqu'à atteindre le diamètre de fond de filet, et ainsi la forme définitive du filetage. L'angle du flanc de filet (angle du burin) est de 60° pour les filetages métriques, UNC, UNF, NPT, de 55° pour les filetages à pas gaz et 30° pour le filetage trapézoïdal.



Pour le filetage à la main, une filière et un porte-filière sont nécessaires. L'engagement de la filière sur le début de l'axe cylindrique est facilité par un cône d'entrée. Il est préférable de s'assurer de la perpendicularité de la filière par rapport à l'axe du cylindre après les deux trois premiers tours. Une filière engagée de travers garantit un filetage de piètre qualité...



5.5 Le taraudage

Pour réaliser un filetage intérieur, ou taraudage, il est nécessaire de percer un trou circulaire dont le diamètre correspond au diamètre de fond de filet. Ce dernier est calculé grossièrement par le diamètre nominal moins le pas du filetage. Pour un filetage de M5, le pas est de 0,8 mm. Le diamètre de perçage est de 4,2 mm. L'axe du perçage est normal (perpendiculaire) au plan de perçage, à moins qu'il s'agisse d'une exécution particulière.

Les taraudages en métrique fin (MF) et taraudages en inches (UNC, UNF et Wwh), nécessitent des diamètres de perçage spécifiques ; se référer au tableau de la page suivante.

Techniques traditionnelles de fabrications de pièces mécaniques

➤ Filetage et taraudage – représentation

VSM p. 146-148

2 Dessins
2.13 DESSINS SIMPLIFIES

2.13.2.5 Vues partielles
Une vue complète est à éviter partout où une partielle suffit (fig. 107/1).

Fig. 107/1

2.13.3 Inscription simplifiée de cotes
En plus de la «représentation simplifiée», il est aussi autorisé de simplifier les indications de cote. L'indication de cote simplifiée doit alors contenir tous les repères nécessaires, qui seraient appliqués pour une présentation et cotation conventionnelles.

Remarque:
Les inscriptions de cotes simplifiées sont également appliquées pour la définition numérique du produit sur les modèles DAO conformes à ISO 16792.

2.13.3.1 Trous et trous filetés (ISO 15786)
Pour les trous, le premier chiffre indique le diamètre et le deuxième chiffre, la profondeur du trou. Entre les chiffres on écrit un signe de multiplication (x). La forme du fond du trou (plat ou conique) n'est pas spécifiée avec la cotation (fig. 107/2).

Fig. 107/2

En général, la représentation de trous ou de trous filetés peut être remplacée par des lignes médianes ou des croix (fig. 107/2 et 107/3).

Pour les trous filetés, sur l'indication du filetage, après le signe de multiplication (x) vient la longueur utilisable du filetage. La profondeur de l'avant-trou est ajoutée après une barre oblique. La forme ou le fond du trou n'est pas spécifié avec la cotation (fig. 107/3).

Fig. 107/3

S'il manque une indication pour la profondeur de l'avant-trou (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de barre oblique après la valeur suivante), alors l'avant-trou est percé de part en part (fig. 107/4).

Fig. 107/4

Représentation détaillée Cotation simplifiée

Représentation simplifiée Cotation simplifiée

2 Dessins
2.13 DESSINS SIMPLIFIES

Pour les trous chanfreinés, après le signe de multiplication (x) du diamètre du chanfrein, vient l'angle du chanfrein. La profondeur de perçage après le diamètre de perçage englobe la hauteur du chanfrein, suivie de «V» (symbole d'un fond de trou en pointe). L'angle de la pointe du trou n'est pas défini de cette manière (fig. 108/1).

Fig. 108/1

Si le diamètre et la profondeur du trou sont soumis à certaines tolérances, celles-ci peuvent être ajoutées directement aux valeurs de cotes. La profondeur du trou est suivie de «U» (symbole pour un fond de trou plat) (fig. 108/2).

Fig. 108/2

2.13.3.2 Fraises (ISO 15786)
Pour les fraises cylindriques de trous, le premier chiffre indique le diamètre de fraisure et le deuxième chiffre, la profondeur de fraisure et le symbole de «U» (symbole de fraisure cylindrique à fond plat). Le diamètre du trou est indiqué séparément (fig. 108/3).

Fig. 108/3

Pour les chanfreins coniques des trous, c'est le premier chiffre qui détermine le diamètre du chanfrein et le deuxième chiffre l'angle du chanfrein. Le diamètre du trou est indiqué séparément (fig. 108/4).

Fig. 108/4

Représentation détaillée Cotation simplifiée

Représentation simplifiée Cotation simplifiée

2 Dessins
2.13 DESSINS SIMPLIFIES

2.13.3.3 Diamètres
Les diamètres extérieurs et intérieurs peuvent être cotés selon fig. 109/1 et 109/2.

Fig. 109/1

Fig. 109/2

2.13.3.4 Les rayons
Jusqu'à 3 mm ne doivent pas être dessinés et sont cotés selon fig. 109/3.

Fig. 109/3

2.13.3.5 Les chanfreins extérieurs et intérieurs
à 45° jusqu'à 3 mm peuvent être cotés selon fig. 109/4.

Fig. 109/4

2.13.3.6 Gorges de filetage
– Gorges pour filetage extérieur (Dimensions conformes au paragraphe 3.13.2) (fig. 109/5).

Fig. 109/5

Remarque:
L'état de surface doit être choisi selon des critères fonctionnels. La plupart du temps, le contrôle de la surface est uniquement possible par un contrôle visuel.

– Gorges pour filetage intérieur (Dimensions conformes au paragraphe 3.13.1) (fig. 109/6).

Fig. 109/6

2.13.3.7 Les rainures de circlips
peuvent être cotées selon fig. 109/7, la largeur figurant en tête.

Fig. 109/7

Fig. 109/5

Fig. 109/6

Fig. 109/7

Nouvelles techniques de fabrications de pièces 3d

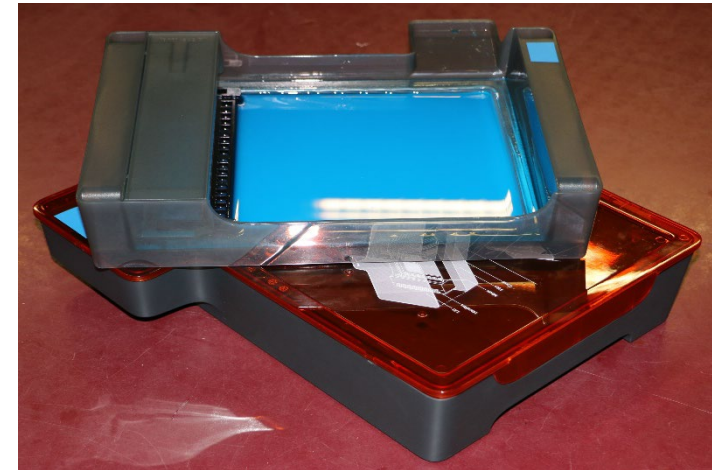
➤ Application impression 3D



- [Raise 3D](#)
- [Filaments](#)



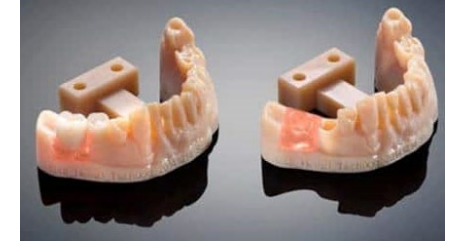
- [Trotec laser](#)
- [Laser CO2](#)



- [Formlabs](#)
- [Résines](#)

Nouvelles techniques de fabrications de pièces 3d

- L'engineering et Le prototypage
- Le spatial et l'aéronotique
- Le quotidien
- Le médical et le dentaire
- L'architecture et la construction
- L'industrie et L'habillement
- L'alimentaire



SKIL

Student Creativity and Innovation Laboratory

- thingiverse.com
- grabcad.com
- instructables.com
- <https://youtu.be/cxHQpyB4vAE>

- *Cours de construction mécanique*

Normes

- | | |
|---|--|
| ➤ Système ISO / Extrait de normes «VSM» | Construction mécanique I p. 3 + VSM |
| ➤ Cotation avec tolérance et ajustement | Construction mécanique I p. 16 / 49 + VSM p. 96-103 / 112 |
| ➤ Tolérances géométriques | Construction mécanique I p. 62 / 127+ VSM p. 126-130 / 140 |
| ➤ Etats de surface | Construction mécanique I p. 66 – 67 + VSM p. 87-94 |

Normes

➤ Système ISO / Extrait de normes «VSM»

Construction mécanique I p. 3 + VSM

EPFL - Génie Mécanique - Microtechnique Construction mécanique I J-F Ferrot© 2015

1.4 La structure organisationnelle de la normalisation

Au niveau mondial, il existe une organisation de normalisation sous l'appellation ISO signifiant Organisation Internationale de normalisation. Cette organisation fut créée en 1947 et son siège se trouve à Genève. Elle regroupe les organisations nationales des différents pays membres, qui sont au nombre de 162. Ci-dessous, le sigle de l'organisation internationale de normalisation.

The logo of the International Organization for Standardization (ISO) is displayed. It consists of a blue square containing a white globe with latitude and longitude lines. To the right of the square, the text "Organisation internationale de normalisation" is written in blue.

Son but est de produire des normes dans des domaines aussi nombreux que variés. Tous les domaines du génie humain sont concernés par la normalisation. Ce sont **les normes ISO**. Par exemple, voici quelques-unes de ces différentes normes :

ISO 31	Grandeurs et unités	ISO 9000	Assurance de la Qualité
ISO 216	Format des papiers d'écriture	ISO 14000	Normes environnementales
ISO 646	Codes de caractères graphiques	ISO 14043	Interprétation du cycle de vie
ISO 3166	Code des pays	ISO 26000	Responsabilité sociétale
ISO 4217	Code des monnaies du monde	ISO 31000	Management du risque
ISO 8601	Représentation des dates et heures	ISO 50001	Management de l'énergie

Il existe environ 19000 normes ISO actives à ce jour...

Les normes ISO sont utiles à l'industrie et à l'économie, quel qu'en soit le type. Elles sont utiles aux différents gouvernements, aux organismes dirigeants de l'économie, aux professionnels responsables d'évaluer la conformité des produits, des services et des prestations de toutes natures. Elles concernent le secteur public comme le secteur privé. Finalement, elles sont indispensables au citoyen, en tant que consommateur de biens et prestations.

INTRODUCTION / PRINCIPES	0.1 But et domaine d'application	8	1.1 Pourquoi normaliser?	9	2.12 Etats de surface	97
	0.2 Règle générale pour l'enseignement	8	1.2 Grandeurs et unités	12	2.13 Dessins simplifiés	105
	0.3 Directives générales pour les utilisateurs	8	1.3 Numérotation des divisions et subdivisions dans les documents écrits	20	2.14 Indications de dessin pour les pièces façonnées	113
	0.4 Choix des normes	8			2.15 Systèmes et éléments optiques	119
DESSINS	2.1 Principes du dessin	27	2.7 Système ISO de tolérances	61	2.16 Représentation des symboles dans les dessins techniques	126
Représentation	2.2 Principes de représentation	33	2.8 Sélection des classes de tolérances pour usages généraux	74		
Cotation	2.3 Cotation	43	2.9 Ajustements recommandés	76	3.13 Sorties de filetages et gorges	181
Tolérances	2.4 Représentation et cotation des filetages	55	2.10 Tolerances générales	78	4.12 Bagues d'arrêt	218
	2.5 Normes normaux, cotes normales	58	2.11 Tolerances géométrique	86	4.13 Segments d'arrêt, circlips	219
	2.6 Indication des cotes avec tolérances	60			4.14 Roulements	222
CONCEPTION ET PRODUCTION	3.1 Raccords soudés	130	3.7 Inclinaisons, prismes	164	4.15 Paliers lisses	230
	3.2 Raccords brasés	144	3.8 Pas des moletages droits et croisés	166	4.16 Assemblages à brides	238
	3.3 Raccords collés	148	3.9 Centres	167	4.17 Graisseurs	243
	3.4 Découpage sans contact	150	3.10 Saignées	169		
	3.5 Protection contre la corrosion	155	3.11 Arêtes de forme non définie	171		
	3.6 Cônes	159	3.12 Genres de filetages	176		
ELEMENTS DE MACHINES	4.0 Introduction	186	4.6 Cond. techn. de livr. pour vis, éc. et rond.	199		
	4.1 Assemblages à vis	186	4.7 Filets rapportés	207		
	4.2 Vis	192	4.8 Goupilles con., goup. cyl., goup. can.	209		
	4.3 Ecrous	195	4.9 Goupilles élastiques, goupilles fendues	210		
	4.4 Rondelles	196	4.10 Rivets	211		
	4.5 Trous de passage, lamages	197	4.11 Clavettes, clavetages	216		
MATIERES	5.0 Vue d'ensemble des matières	248	5.6 Matières plastiques	278		
	5.1 Acier	249	5.7 Plaques d'étanchéité sans amiante	281		
	5.2 Matières ferreuses de fonderie	268				
	5.3 Cuivre et alliages de cuivre	270				
	5.4 Aluminium et alliages d'aluminium	272				
	5.5 Matières frittées	275				
REPRESENTATIONS SYMBOLIQUES	6.1 Représentation des engrenages	286	6.5 Schémas électriques	299		
	6.2 Représentation des ressorts	288	6.6 Symboles p. plaques indicatrices s. texte	308		
	6.3 Schéma fonctionnel pour les installations techniques de processus	290				
	6.4 Plan de connexions pour l'hydraulique et le pneumatique	292				
DOCUMENTATION DE PRODUITS	7.1 Termes sur dessins techniques	316	7.7 Modifications	332		
	7.2 Terminologie de base p. les dessins techn.	317	7.8 Management de la qualité	334		
	7.3 Documentation électrotechnique	318	7.9 Systèmes de manag. environnemental	336		
	7.4 Formules de dessins et nomenclatures	318	7.10 Systèmes de gestions de mesure	337		
	7.5 Nomenclatures	321				
	7.6 Sécurité des machines	329				
EXEMPLES DE DESSINS	8.1 Explications	342				
	8.2 Exemples de dessins	348				
REPERTOIRES	9.1 Répertoires des normes	386				
	9.2 Désignations abrégées pour aciers (Ex.)	391				
	9.3 Répertoire des aciers	392				
	9.4 Liste et signification des symboles princip. et complémentaires selon SN EN 10027-1	395				
	9.5 Index alphabétique	397				

➤ Cotation avec tolérance et ajustement

Construction mécanique I p. 16 / 49 + VSM p. 112

4 LES TOLÉRANCES

4.1 Les tolérances selon le système ISO

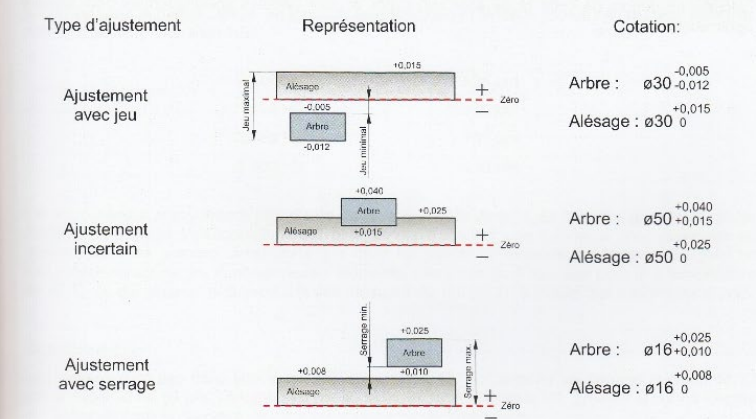
Lors du montage de deux éléments nécessitant un ajustement entre-eux, il est nécessaire de recourir à une référence assurant le choix correct des dimensions. Les termes d'**arbre** et d'**alésage** sont souvent utilisés pour évoquer l'élément contenu et l'élément contenant. Cette approche n'est pas seulement valable pour les pièces de révolution, mais s'applique également pour des pièces rectilignes devant s'ajuster entre-elles. (Extrait de Normes page 61)

De nombreux tableaux montrent le dimensionnement de l'arbre et de l'alésage et leurs écarts relatifs. Les premières notions propres à l'ajustement sont les termes de jeu et de serrage.



Les pièces réelles que sont un arbre et un alésage ont des dimensions fixes. Lors de la fabrication, le document doit comporter une tolérance de dimension afin d'assurer que la pièce ne soit pas hors cote (hors tolérance). La qualité de l'ajustement repose sur le respect de ces tolérances. Certains montages, comme un piston dans un cylindre, doivent avoir du jeu. D'autres montages ont besoin de serrage, comme les clavettes ou les bagues de roulement (dans certains cas).

La représentation simplifiée des ajustements donnant en fonction des écarts relatifs de l'arbre et de l'alésage se positionnent par rapport à la ligne zéro, correspondant au nominal de la cote.



2.9.2 Exemples d'utilisation des ajustements correspondant aux tableaux 71/1 et 72/1

Tableau 77/1 Appariement entre alésage normal (H8, H7) et arbre correspondant

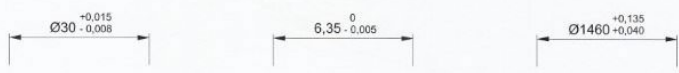
Ajustement	H8	H7	Caractère de l'ajustement	Exemples d'utilisation
Jeu	d9		Grand jeu	Arbre à plusieurs paliers, palier lisse pour large gamme de température, palier de levier
	e8		Jeu perceptible	
	h9		Facilement déplaçable	Embrayage coulissant, entretoise
	f7		Petit jeu	Coulisseau, glissière de tête de bielle
	g6		Jeu non perceptible	Palier lisse de précision
Incertain	h7	h6	Déplacement encore possible par l'emploi de lubrifiants	Bague d'arrêt, roue interchangeable, centrage, contre-pointe de tour
		js6	Encore mobile sous légère pression	Centrage précis
		k6	Assemblé sans besoin de force important	Volant, accouplement, poulie
Serrage		n6	Assemblé sous pression	Transmission d'un couple avec sécurité supplémentaire contre la rotation
		p6	Assemblé au moyen de presses ou fretté	Transmission de petits couples sans sécurité supplémentaire contre la rotation
		r6		
		s6		

Tableau 77/2 Appariement entre arbre normal (h9, h6) et alésage correspondant

Ajustement	h9	h6	Caractère de l'ajustement	Exemples d'utilisation
Jeu	H11		Très souvent grand jeu	Pièces s'emboîtant facilement
	D10		Très grand jeu	Clavetage libre avec clavette inclinée
	E9		Grand jeu	Raccordement emboîté, palier de levier
	F8		Jeu perceptible	Palier lisse
		G7	Jeu non perceptible	Glissière de précision
Incertain		H7	Encore juste mobile à la main	Clavetage libre (arbre et moyeu)
		JS9	Encore mobile sous légère pression	Embrayage coulissant
		JS7		Clavetage léger dans moyeu
Serrage		K7	Assemblé sans besoin de force important	Pièces souvent démontées et remontées
		N7	Assemblé sous pression	Volant, accouplement, poulie
		P9	Ajustage éventuellement nécessaire	Goupille cylindrique
		P7	Assemblé au moyen de presses ou fretté	Clavetage serré (arbre et moyeu)
		S7	Emmanchement par frettage	Transmission de petits couples sans sécurité supplémentaire contre la rotation
				Transmission de couples plus importants

3.6 La notation d'une cote avec tolérance

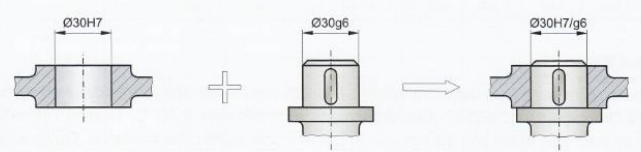
Une cote indiquée sans tolérance fait partie du domaine des tolérances générales (Extrait de Normes page 79). Lorsque c'est nécessaire pour un fonctionnement correct, la cote est assortie d'une indication supplémentaire indiquant une tolérance plus restrictive. La valeur d'une cote n'est jamais précise au micron ; c'est une fourchette définissant une valeur maximale et une valeur minimale. À part la notation selon les tolérances du système ISO, abordées plus loin dans le cours, chaque cote est assortie de deux valeurs limite, inscrites en plus petit, l'une sur l'autre.



4.2 Le système d'alésage H

Un ajustement ISO est représenté par une seule cote définissant les dimensions tolérancées d'un arbre et d'un alésage faisant l'objet d'un assemblage. Une cote d'ajustement comprend dans l'ordre les éléments suivants :

- La cote nominale commune à l'arbre et l'alésage (ø30...)
- La classe de tolérance de l'alésage (...H7)
- La classe de tolérance de l'arbre (...g6)



Le choix de la tolérance H pour l'alésage est un avantage important car il correspond au diamètre de l'outillage de dimension fixe pour donner avec précision la cote finale tolérancée. Les perçages sont usinés à un ou deux dixièmes de millimètre en dessous de la cote. Le passage de l'alésoir à main ou alésoir machine permet d'enlever une très petite quantité de matière et d'assurer avec précision la cote tolérancée.

Autre avantage de la tolérance H est que la valeur inférieure de la cote est toujours égale au nominal, soit 0 µm d'écart (Extrait de Normes page 72).

Normes

➤ Cotation avec tolérance et ajustement

VSM p.105 – 107

Dimensions nominales en mm		Degrés de tolérance normalisés																	
au- dessus de	jusqu'à et y compris	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
		Tolérances fondamentales																	
		µm																	
		mm																	
-	3	0,8	1,2	2	3	4	6	10	16	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1000	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1000	1250	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1250	1600	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1600	2000	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2000	2500	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2500	3150	26	36	50	68	96	135	210	330	500	860	1350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

1) Pour les dimensions nominales supérieures à 500 mm, les valeurs des degrés de tolérance normalisés IT1 à IT5 (inclus) ne sont données qu'à titre expérimental.
2) Les degrés de tolérance normalisés IT6 à IT18 (inclus) ne doivent pas être utilisés pour les dimensions nominales inférieures ou égales à 1 mm.

2.7.1.1 Descriptif
Système ISO de tolérances

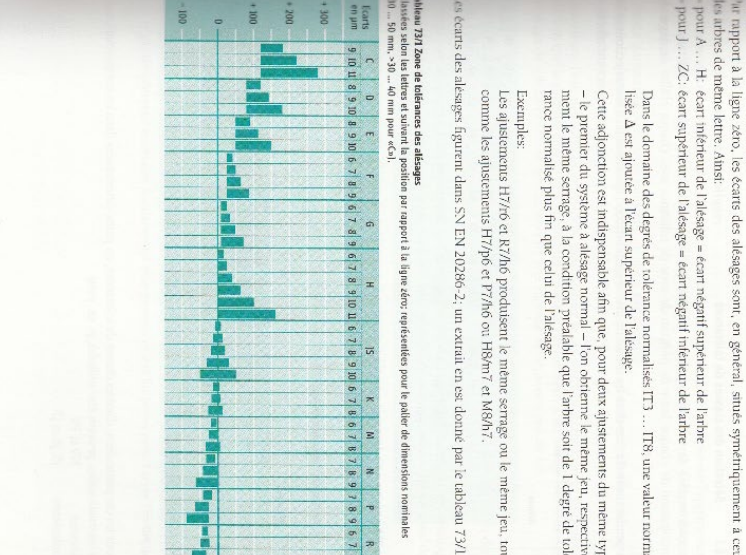
Dimensions nominales en mm		Ecart supérieur et inférieur (Valeurs en µm : 0,001 mm = 1 micromètre)															
au-dessus de	jusqu'à et y compris	ES	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT
		µm															
-	3	+0,8	IT1	-0,8	IT1	+1,2	IT2	-1,2	IT2	+2	IT3	-2	IT3	+3	IT4	-3	IT4
3	6	+1	IT2	-1	IT2	+1,5	IT3	-1,5	IT3	+2,5	IT4	-2,5	IT4	+4	IT5	-4	IT5
6	10	+1	IT2	-1	IT2	+1,5	IT3	-1,5	IT3	+2,5	IT4	-2,5	IT4	+4	IT5	-4	IT5
10	18	+1,2	IT3	-1,2	IT3	+2	IT4	-2	IT4	+3	IT5	-3	IT5	+5	IT6	-5	IT6
18	30	+1,5	IT4	-1,5	IT4	+2,5	IT5	-2,5	IT5	+4	IT6	-4	IT6	+6	IT7	-6	IT7
30	50	+1,5	IT4	-1,5	IT4	+2,5	IT5	-2,5	IT5	+4	IT6	-4	IT6	+6	IT7	-6	IT7
50	80	+2	IT5	-2	IT5	+3	IT6	-3	IT6	+5	IT7	-5	IT7	+8	IT8	-8	IT8
80	120	+2,5	IT6	-2,5	IT6	+4	IT7	-4	IT7	+6	IT8	-6	IT8	+10	IT9	-10	IT9
120	180	+3,5	IT7	-3,5	IT7	+5	IT8	-5	IT8	+8	IT9	-8	IT9	+12	IT10	-12	IT10
180	250	+4,5	IT8	-4,5	IT8	+7	IT9	-7	IT9	+10	IT10	-10	IT10	+15	IT11	-15	IT11
250	315	+6	IT9	-6	IT9	+10	IT10	-10	IT10	+15	IT11	-15	IT11	+22	IT12	-22	IT12
315	400	+7	IT10	-7	IT10	+12	IT11	-12	IT11	+18	IT12	-18	IT12	+25	IT13	-25	IT13
400	500	+8	IT11	-8	IT11	+13	IT12	-13	IT12	+20	IT13	-20	IT13	+30	IT14	-30	IT14
500	630	+9	IT12	-9	IT12	+16	IT13	-16	IT13	+25	IT14	-25	IT14	+40	IT15	-40	IT15
630	800	+10	IT13	-10	IT13	+18	IT14	-18	IT14	+30	IT15	-30	IT15	+50	IT16	-50	IT16
800	1000	+11	IT14	-11	IT14	+21	IT15	-21	IT15	+36	IT16	-36	IT16	+60	IT17	-60	IT17
1000	1250	+13	IT15	-13	IT15	+24	IT16	-24	IT16	+42	IT17	-42	IT17	+70	IT18	-70	IT18
1250	1600	+15	IT16	-15	IT16	+29	IT17	-29	IT17	+55	IT18	-55	IT18	+90	IT19	-90	IT19
1600	2000	+18	IT17	-18	IT17	+35	IT18	-35	IT18	+70	IT19	-70	IT19	+110	IT20	-110	IT20
2000	2500	+22	IT18	-22	IT18	+41	IT19	-41	IT19	+82	IT20	-82	IT20	+130	IT21	-130	IT21
2500	3150	+26	IT19	-26	IT19	+50	IT20	-50	IT20	+100	IT21	-100	IT21	+160	IT22	-160	IT22

1) La classe de tolérance N9 ne doit pas être utilisée pour les dimensions nominales allant jusqu'à et y compris 1 mm.

2.7.1.2 Descriptif
Système ISO de tolérances

Dimensions nominales en mm		Ecart supérieur et inférieur (Valeurs en µm : 0,001 mm = 1 micromètre)															
au-dessus de	jusqu'à et y compris	ES	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT	FS	IT
		µm															
-	3	+0,8	IT1	-0,8	IT1	+1,2	IT2	-1,2	IT2	+2	IT3	-2	IT3	+3	IT4	-3	IT4
3	6	+1	IT2	-1	IT2	+1,5	IT3	-1,5	IT3	+2,5	IT4	-2,5	IT4	+4	IT5	-4	IT5
6	10	+1	IT2	-1	IT2	+1,5	IT3	-1,5	IT3	+2,5	IT4	-2,5	IT4	+4	IT5	-4	IT5
10	18	+1,2	IT3	-1,2	IT3	+2	IT4	-2	IT4	+3	IT5	-3	IT5	+5	IT6	-5	IT6
18	30	+1,5	IT4	-1,5	IT4	+2,5	IT5	-2,5	IT5	+4	IT6	-4	IT6	+6	IT7	-6	IT7
30	50	+1,5	IT4	-1,5	IT4	+2,5	IT5	-2,5	IT5	+4	IT6	-4	IT6	+6	IT7	-6	IT7
50	80	+2	IT5	-2	IT5	+3	IT6	-3	IT6	+5	IT7	-5	IT7	+8	IT8	-8	IT8
80	120	+2,5	IT6	-2,5	IT6	+4	IT7	-4	IT7	+6	IT8	-6	IT8	+10	IT9	-10	IT9
120	180	+3,5	IT7	-3,5	IT7	+5	IT8	-5	IT8	+8	IT9	-8	IT9	+12	IT10	-12	IT10
180	250	+4,5	IT8	-4,5	IT8	+7	IT9	-7	IT9	+10	IT10	-10	IT10	+15	IT11	-15	IT11
250	315	+6	IT9	-6	IT9	+10	IT10	-10	IT10	+15	IT11	-15	IT11	+22	IT12	-22	IT12
315	400	+7	IT10	-7	IT10	+12	IT11	-12	IT11	+18	IT12	-18	IT12	+25	IT13	-25	IT13
400	500	+8	IT11	-8	IT11	+13	IT12	-13	IT12	+20	IT13	-20	IT13	+30	IT14	-30	IT14
500	630	+9	IT12	-9	IT12	+16	IT13	-16	IT13	+25	IT14	-25	IT14	+40	IT15	-40	IT15
630	800	+10	IT13	-10	IT13	+18	IT14	-18	IT14	+30	IT15	-30	IT15	+50	IT16	-50	IT16
800	1000	+11	IT14	-11	IT14	+21	IT15	-21	IT15	+36	IT16	-36	IT16	+60	IT17	-60	IT17
1000	1250	+13	IT15	-13	IT15	+24	IT16	-24	IT16	+42	IT17	-42	IT17	+70	IT18	-70	IT18
1250	1600	+15	IT16	-15	IT16	+29	IT17	-29	IT17	+55	IT18	-55	IT18	+90	IT19	-90	IT19
1600	2000	+18	IT17	-18	IT17	+35	IT18	-35	IT18	+70	IT19	-70	IT19	+110	IT20	-110	IT20
2000	2500	+22	IT18	-22	IT18	+41	IT19	-41	IT19	+82	IT20	-82	IT20	+130	IT21	-130	IT21
2500	3150	+26	IT19	-26	IT19	+50	IT20	-50	IT20	+100	IT21	-100	IT21	+160	IT22	-160	IT22

2.7.1.3 Descriptif
Système ISO de tolérances



2.7.1.4 Descriptif
Système ISO de tolérances

2.7.1.4.1 Ecart des alésages

Pour rapport à la ligne zéro, les écarts des alésages sont, en général, notés symétriquement à ceux des arbres de même lettre. Ainsi :
- pour A...H : écart inférieur de l'alésage = écart négatif supérieur de l'arbre
- pour J...ZC : écart supérieur de l'alésage = écart négatif inférieur de l'arbre

Dans le domaine des degrés de tolérance normalisés IT7...IT18, une valeur normale A est ajoutée à l'écart supérieur de l'alésage.

Cette adjonction est indispensable afin que, pour deux ajustements du même type – le premier du système à alésage normal – l'on obtienne le même jeu, respectivement le même serrage, à la condition préalable que l'arbre soit de 1 degré de tolérance normalisée plus fin que celui de l'alésage.

Exemples :

Les ajustements H7/p6 et H7/h6 produisent le même serrage ou le même jeu, tout comme les ajustements H7/p6 et H7/h6 ou H8/m7 et M8/h7.

Les écarts des alésages figurent dans SN EN 20266-2, un extrait en est donné par le tableau 7.3/1.

Tableau 7.3/1 Zone de tolérance des alésages

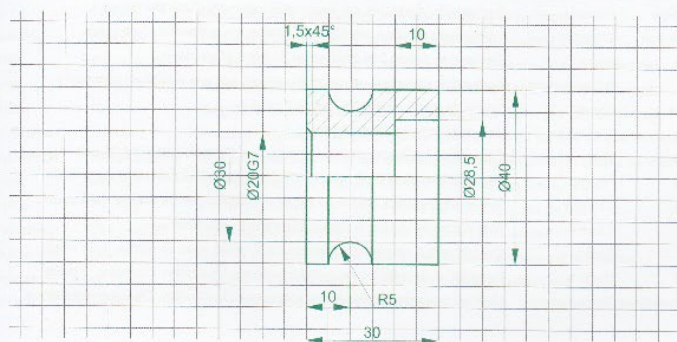
Illustrées selon les lettres A et suivant la position par rapport à la ligne zéro, représentées pour le palier de dimensions nominales : 0...5

➤ Tolérances géométriques: Construction mécanique I p. 62/127 + VSM p. 139-141

EPFL

Symboles des tolérances et caractéristiques tolérances	Exemples d'application		Interprétation
	Indication sur le dessin	Zone de tolérance	
Rectitude d'une ligne ou d'un axe			Chaque ligne ou surface de la surface nominale, parallèle ou plan de projection dans lequel l'indication est donnée, doit être contenue entre deux droites parallèles distantes de $\pm 0,1$. L'axe d'une ligne relié au cadre de la tolérance doit être compris dans une zone de tolérance cylindrique de $\pm 0,08$ de diamètre.
Planéité d'une surface			La surface doit être comprise entre deux plans parallèles distants de $\pm 0,08$. Le pourtour de chaque section droite du disque doit être compris entre deux cercles optimaux concentriques distants respectivement de $\pm 0,03$. Le pourtour de chaque section droite du cône doit être compris entre deux cercles optimaux concentriques distants respectivement de $\pm 0,1$.
Circularité d'un disque, d'un cylindre, d'un cône etc.			La surface considérée doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont la distance radiale est $\pm 0,1$.
Cylindricité			Dans chaque section parallèle au plan de la projection, le profil considéré doit être compris entre deux lignes enveloppes des sections de diamètre $\pm 0,08$ dont les centres sont situés sur une ligne ayant la forme géométrique théorique exacte.
Forme du profil d'une ligne quelconque (profil ou contour)			La surface considérée doit être comprise entre deux surfaces enveloppes des sphères de diamètre $\pm 0,02$ dont les centres sont situés sur une surface ayant la forme géométrique théorique exacte.
Forme du profil d'une surface quelconque			
Symboles des tolérances et caractéristiques tolérances	Exemples d'application		Interprétation
Indication sur le dessin	Zone de tolérance		
Parallélisme d'une ligne (selon rapport à une ligne ou à une surface de référence (axe))			L'axe considéré doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre $\pm 0,03$ parallèle à l'axe de référence A.
Parallélisme d'une ligne (sans rapport à un plan de référence)			L'axe considéré doit être compris entre deux plans parallèles distants de $\pm 0,01$, les plans sont parallèles au plan de référence A.
Parallélisme d'une surface (par rapport à un plan de référence)			La surface considérée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de $\pm 0,06$, les plans sont parallèles au plan de référence A.
Perpendicularité d'une ligne (selon rapport à une ligne de référence)			L'axe du cylindre doit être compris dans une zone de tolérance cylindrique de $\pm 0,03$ de diamètre perpendiculaire au plan de référence A.
Perpendicularité d'une surface (par rapport à un plan de référence)			La surface considérée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de $\pm 0,08$ et perpendiculaires au plan de référence A.
Perpendicularité d'une ligne (sans rapport à une ligne de référence)			La surface considérée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de $\pm 0,06$, les plans sont perpendiculaires par rapport à un plan de référence A.
Inclinaison d'une ligne (sans rapport à un plan de référence)			L'axe de la ligne doit être compris entre deux plans parallèles distants de $\pm 0,08$ et inclinés d'un angle théorique exact de 60° par rapport au plan de référence A.
Inclinaison d'une surface (par rapport à une surface de référence)			La surface considérée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de $\pm 0,08$ et inclinés d'un angle théorique exact de 40° par rapport au plan de référence A.

J-F Ferrot © 2015



➤ Etats de surface

Construction mécanique I p. 66 – 67 + VSM p. 94

EPFL – Génie Mécanique - Microtechnique

Construction mécanique I

J-F Ferrot© 2015

5.8 Les états de surface

La fabrication d'un élément mécanique, que ce soit par enlèvement de matière ou par déformation, va donner une qualité à la surface du produit fini. La définition du paramètre d'état de surface consiste à donner une appréciation d'un profil en fonction de sa rugosité (Extrait de Normes pages 102 et suivantes).

Techniquement, l'éprouvette (la surface testée) est positionnée sur un banc de mesure et lors de son déplacement linéaire, un palpeur (capteur électronique de haute précision) va recueillir toutes les imperfections, aussi infimes soient-elles, et les amplifier et obtenir la ligne moyenne du profil de rugosité.

Lors du passage du palpeur, l'allure du profil testé peut correspondre au graphe ci-dessous :

Du tracé primitif de la courbe de rugosité (partie supérieure en vert) est déduite la partie négative (partie en rose, initialement négative) qui vient se superposer à la partie positive. De ce nouveau graphe se détermine la valeur moyenne R_a , représentée en traitillé, qui est la **valeur maximale de la rugosité moyenne admissible**. C'est cette valeur qui est à la base de l'établissement du tableau des classes de rugosité.

Classes de rugosité	Rugosité moyenne R_a	
	$1\text{ }\mu\text{m} = 0,001\text{ mm}$	$1\text{ }\mu\text{m} = 0,025\text{ mm}$
N12	50	2000
N11	25	1000
N10	12,5	500
N9	6,3	250
N8	3,2	125
N7	1,6	63
N6	0,8	32
N5	0,4	16
N4	0,2	8
N3	0,1	4
N2	0,05	2
N1	0,025	1

EPFL – Génie Mécanique - Microtechnique

Construction mécanique I

J-F Ferrot© 2015

Symbole de base
Sa représentation vient complétée par des indications

Surface usinée
par enlèvement de copeaux

Surface interdisant
tout enlèvement de copeaux

Il n'y a pas que le symbole de base sur lequel viennent s'ajouter des indications supplémentaires ; le symbole complet est affublé d'un trait horizontal prolongeant le trait oblique de droite.

Les pièces fabriquées doivent comporter les indications relatives à l'état de surface. À chaque usinage correspond un état de surface. Dans la pratique, il y a l'état de surface général qui correspond au type d'usinage et l'indication supplémentaire s'il y a une particularité. Par exemple, une pièce tournée peut avoir un état général correspondant à un état N10, et une portée dont la qualité doit impérativement être très élevée, soit un état de surface N4 obtenue par un polissage. Dans ce cas, seule la portée sera notée avec cette indication supplémentaire.

13 $\sqrt{Ra\ 12,5}$ ($\sqrt{Ra\ 0,2}$)

tolérances générales EN ISO 20440-1
Ra 1,6 ($\sqrt{Ra\ 0,8}$)

2 Dessins

2.12 ETATS DE SURFACE

2.12.4 Procédés d'usinage et rugosité des surfaces

La représentation graphique ci-après donne, à titre d'orientation, des valeurs basées sur l'expérience et relatives aux rugosités moyennes arithmétique R_a réalisables par divers procédés de fabrication. Elle permet à l'utilisateur de fixer le procédé de fabrication le plus rationnel pour atteindre la rugosité désirée.

Remarque:
les classes de rugosité (valeurs de N) sont données à titre d'information pour permettre d'interpréter les indications de rugosité sur les anciens dessins.

Tableau 104/1 Rugosités réalisables R_a

Valeurs en μm ; $1\text{ }\mu\text{m} = 0,001\text{ mm}$

Groupe principal	Procédé de fabrication	Valeurs de rugosité R_a maximales															
		Classes de rugosité															
		200	100	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,012	
Sans enlèvement de matière	Désignation	-	-	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1	-	
	Coulage en sable ¹⁾																
	Coulage en carapace																
	Coulage en coquille																
	Coulage de précision																
	Coulage sous pression																
	Forgeage en matrice/Laminage à chaud																
	Laminage à froid																
	Pressage (à chaud ou à froid)																
	Extrusion																
	Etréage (à froid)																
	Brunissage																
	Avec enlèvement de matière	Oxycoupage ¹⁾															
		Découpage au plasma															
		Découpage au laser															
		Découpage au jet d'eau															
Electroérosion à fil																	
Sciage																	
Tronçonnage à la meule																	
Découpage (étampage, étampage fin)																	
Sablage (sable, grenaille)																	
Grenaillage aux billes (durcissement de surface)																	
Tournage frontal/Tournage périphérique																	
Tournage au diamant (tournage très fin)																	
Rabotage/Perçage																	
Mortaisage																	
Contre-fraisage/Alésage																	
Lamage																	
Fraisage en bout																	
Fraisage en périphérie																	
Brochage/Grattage																	
Rectification en périphérie																	
Planage à la meule																	
Rectification en plongée/Rectification frontale																	
Polissage à la meule/Superfinish/rodage																	
Honage																	
Polissage																	

Usinage: ■ grossier ■ normal ■ fin

normal = Rugosité obtenue en pratique normale d'atelier.
fin = Rugosité obtenue par des soins particuliers ou par des méthodes spéciales.
grossier = Limite supérieure de rugosité pour l'ébauchage.

1) Des rugosités de surface plus grossières sont possibles

- *Cours de construction mécanique*

Éléments normalisés

- | | |
|-----------------------------------|---|
| ➤ Vis et trous de passage, lamage | Construction mécanique I p. 73 + VSM p. 250-259 |
| ➤ Circlips et ségments d'arrêt | VSM p. 280-282 |
| ➤ Miauton - BRW | Miauton - BRW |
| ➤ Joints toriques «O-ring» | VSM p. 295 |
| ➤ Goupille | VSM p. 209 |
| ➤ Roulements | VSM p. 283-288 |

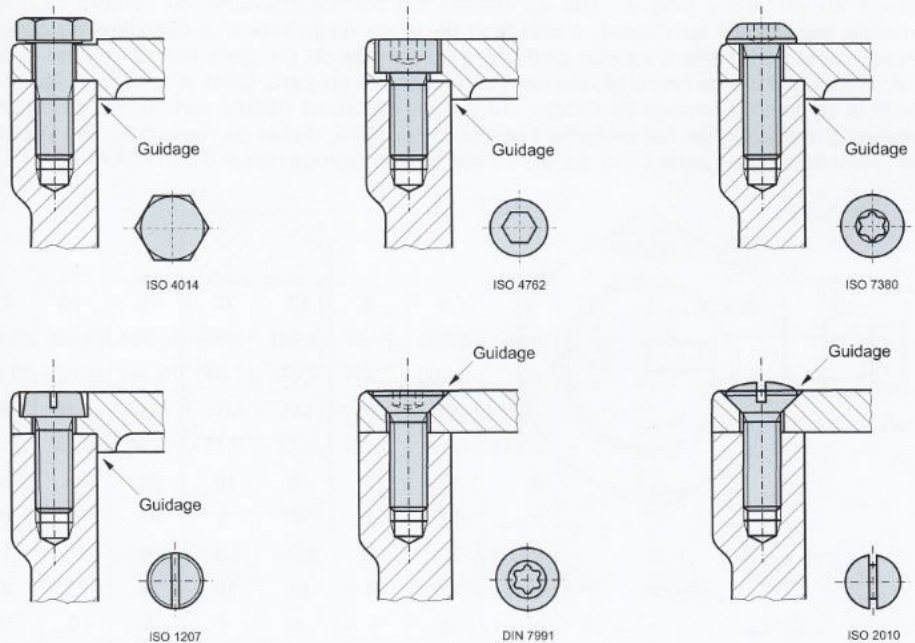
Éléments normalisés

➤ Vis et trous de passage, lamage

6.4 La vis d'assemblage normalisée

Les assemblages démontables avec éléments de fixation simples utilisent des vis ou vis et écrous. L'Extrait de Normes, dès la page 186 donne une abondante documentation concernant ces éléments d'assemblage à vis. Sans revenir sur tous ces listings et tableaux comparatifs, il est important de fixer les notions quand à la destination d'un choix de visserie plutôt qu'un autre. Toutes les vis ont pour rôle premier d'assembler deux éléments. En plus de la fonction d'assembler, une vis à tête conique assure le centrage d'un élément par rapport à un autre.

L'exemple choisi est un couvercle de carter monté de six manières différentes avec des types de vis courantes. Les quatre premiers types de vis utilisées ne permettent pas d'assurer un centrage. Les têtes de ces vis ne doivent en aucun cas être montées dans un logement ajusté, en espérant qu'elles fassent office de centrage. Le haut de la vis est flottant de plusieurs dixièmes de millimètre (en fonction du diamètre nominal) et le centrage est assuré par un guidage, une goupille ou un autre artifice.



Construction mécanique I p. 73 + VSM p. 250-253

4 Éléments de machines		
4.2 VIS		
4.2.1 Désignations et grandeurs nominales		
Pour les entraînements (outils), cf. le chapitre 4.1.7. Pour les données relatives aux matériaux et à la protection anti-corrosion, cf. le chapitre 4.6.		
Tableau 192/1 Exemples de désignations et abréviations pour vis		
Description de la pièce normalisée Numéro de la norme	Figure avec grandeurs de désignation	Désignation complète Désignation abrégée
Vis sans tête, à six pans creux, à bout plat chanfreiné $d = M6$, $L = 12$ mm Classe de qualité 4.5H 1) SN EN ISO 4026		Vis sans tête SN EN ISO 4026-M6×12-4.5H Vis s t 6p c SN EN ISO 4026-M6×12-4.5H
Goujon avec longueur vissée $e = 1,25 d$, $d = M5$, $L = 40$ mm. Classe de qualité 8.8 DIN 939		Goujon DIN 939-M5×40-8.8 Gj aj DIN 939-M5×40-8.8
Vis à tête hexagonale, entièrement fileté, classe de produit A ou B $d = M6$, $L = 40$ mm Classe de qualité 8.8 SN EN ISO 4017		Vis à tête hexagonale ISO 4017-M6×40-8.8 Vis t 6p ent ISO 4017-M6×40-8.8
Vis à tête hexagonale, partiellement fileté, classe de produit A ou B $d = M6$, $L = 50$ mm. Classe de qualité 8.8 SN EN ISO 4014		Vis à tête hexagonale ISO 4014-M6×50-8.8 Vis t 6p ISO 4014-M6×50-8.8
Vis à tête hexagonale à embase $d = M10$, $L = 80$ mm Classe de qualité: 10.9 ISO 4162		Vis à tête hexagonale ISO 4162-M10×80-10.9 Vis t 6p ISO 4162-M10×80-10.9
Vis à tête cylindrique à six pans creux (partiellement ou entièrement fileté) Classe de produit A $d = M6$, $L = 30$ mm ou $d = M10$, $L = 90$ mm Classe de qualité: 8.8 ou 12.9 SN EN ISO 4762		Vis à tête cylindrique ISO 4762-M6×30-8.8 Vis t cy ISO 4762-M6×30-8.8 Vis à tête cylindrique ISO 4762-M10×90-12.9 Vis t cy ISO 4762-M10×90-12.9
Vis à tête cylindrique à six lobes internes, à tête basse, classe de produit A $d = M5$, $L = 20$ mm Classe de qualité: A2-70 SN EN ISO 14580		Vis à tête cylindrique ISO 14580-M5×20-A2-70 Vis t cy ISO 14580-M5×20-A2-70
Vis à tête cylindrique avec empreinte cruciforme forme Z, classe de produit A $d = M5$, $L = 20$ mm Classe de qualité: 4.8 SN EN ISO 7048		Vis à tête cylindrique ISO 7048-M5×20-4.8-Z Vis t cy ISO 7048-M5×20-4.8-Z
Vis à tête conique 90° avec empreinte cruciforme forme H, classe de produit A $d = M5$, $L = 30$ mm Classe de qualité: 8.8 SN EN ISO 7046-2		Vis à tête conique 90° ISO 7046-2-M5×30-8.8-H Vis t co ISO 7046-2-M5×30-8.8-H

- 1) Les vis sans tête sont conçues pour des efforts de pression. En raison de leur faible résistance, aucun effort de traction ou de flexion ne doit être exercé.
2) Les extrémités des vis, comme les cônes, les tétons et les cuvettes, sont spécifiées dans la norme SN EN ISO 4753.

Éléments de machines

4.2 VIS

4.2.2 Longueur des filetages

Les longueurs nominales standard L sont classées comme suit:

2, 2,5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20 ... 70 = de 5 en 5,

80 ... 160 = de 10 en 10,

180 ... 360 = de 20 en 20.

Tableau 193/1 Longueurs des vis et des filetages par rapport aux diamètres

Dimensions en mm

Figure	Longueur nominale ou longueur filetée	Diamètre de filetage d en mm...														
		1,6	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	16	20	24	30	36
	L_{min} L_{max}	2 8	2 10	2,5 12	3 16	4 20	5 25	6 30	8 40	10 50	12 60	16 80	20 100	25 120	-	-
	L_{min} L_{max}	-	-	-	-	20 40	25 50	30 60	35 80	40 100	50 120	60 160	80 200	100 240	120 300	160 360
	L_{min} L_{max}	-	-	-	-	14 20	16 22	18 24	22 28	26 32	30 36	38 44	46 52	54 60	66 72	78 84
	L_{min} L_{max}	-	-	-	-	-	-	-	45 50	49 55	57 63	65 71	73 79	85 91	97 103	109
	L_{min} L_{max}	-	-	-	-	5 6,5	6,5 8,5	8,5 10,5	10,5 12,5	12,5 15	15 18	18 22	22 26	26 30	30 36	36 42
	L_{min} L_{max}	2 16	4 20	5 25	6 30	8 40	10 50	12 60	16 80	20 100	25 120	30 150	40 200	50 250	60 300	70 350
	L_{min} L_{max}	12 16	16 20	16 25	20 30	25 40	30 50	40 60	45 80	50 100	60 120	80 160	100 200	120 240	160 320	200 400
	L_{min} L_{max}	9 16	10 20	11 25	12 30	14 40	16 50	18 60	22 80	26 100	30 120	38 150	46 180	54 210	66 260	72 280
	L_{min} L_{max}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	-	-	-	-	25 50	30 60	35 80	40 100	45 120	55 160	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	-	-	-	-	16 30	18 35	22 40	26 45	30 55	38 65	44 80	52 100	60 120	72 160
	L_{min} L_{max}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	2,5 16	3 20	4 25	5 30	6 40	8 50	10 60	12 80	16 100	20 120	25 150	30 200	40 250	50 300	60 360
	L_{min} L_{max}	-	20 20	25 25	30 30	35 40	40 50	45 60	55 80	65 100	80 120	100 160	120 200	160 250	200 300	240 360
	L_{min} L_{max}	-	16 16	17 17	18 18	20 20	22 22	24 24	28 28	32 32	36 36	44 44	52 52	60 60	72 72	84 84
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	12 120	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	2 16	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	-	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 100	-	-	-	-	-	-
	L_{min} L_{max}	-	3 20	3 25	4 30	5 40	6 50	8 60	10 80	12 1						

Eléments normalisés

➤ Vis et trous de passage, lamage

Construction mécanique I p. 73 + VSM p. 250-253

4.2 VIS

4.2.3 Têtes des vis

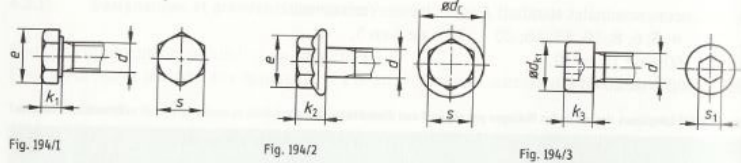


Fig. 194/1

Fig. 194/2

Fig. 194/3

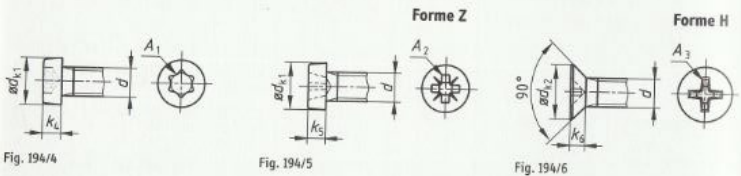


Fig. 194/4

Fig. 194/5

Fig. 194/6

Tableau 194/1

Dimensions en mm

Diamètre de filetage	Vis à tête hexagonale (SN EN ISO 4014) (SN EN ISO 4017) Vis à tête hexagonale à embase (ISO 4162)						(Fig. 194/1)		Vis à tête cylindrique à 6 ps creux Vis à tête cylindrique à 6 lobes internes Vis à tête cylindrique empreinte crucif. Vis à tête conique empreinte crucif.						(SN EN ISO 4762) (SN EN ISO 14580) (SN EN ISO 7048) (SN EN ISO 7046-2)				(Fig. 194/3) (Fig. 194/4) (Fig. 194/5) (Fig. 194/6)			
	d	s	e min	k ₁	d _c max	k ₂ max	s ₁	d ₁ max	k ₃ max	A ₁ 1)	k ₄	A ₂ 2)	k ₅ max	A ₃ 3)	d ₄ max	k ₆ max						
M1,6	3,2	3,41	1,1	-	-	-	1,5	3	1,6	-	-	0	1,1	-	-	-						
M2	4	4,32	1,4	-	-	-	1,5	3,8	2	-	-	1	1,4	0	3,8	1,2						
M2,5	5	5,45	1,7	-	-	-	2	4,5	2,5	6	1,55	1	1,4	0	4,7	1,5						
M3	5,5	6,01	2	-	-	-	2,5	5,5	3	10	2,4	2	2	1	5,5	1,65						
M4	7	7,66	2,8	-	-	-	3	7	4	20	3,1	2	2,6	2	8,4	2,7						
M5	8	8,79	3,5	11,4	5,6	4	8,5	5	25	3,65	2	3,3	2	9,3	2,7							
M6	10	11,05	4	13,6	6,8	5	10	6	30	4,4	3	3,9	3	11,3	3,3							
M8	13	14,38	5,3	17	8,5	6	13	8	45	5,8	3	5	4	15,8	4,65							
M10	16	17,77	6,4	20,8	9,7	8	16	10	50	6,9	-	-	4	18,3	5							
M12	18	20,03	7,5	24,7	11,9	10	18	12	-	-	-	-	-	-	-							
M16	24	26,75	10	32,8	15,1	14	24	16	-	-	-	-	-	-	-							
M20	30	33,53	12,5	-	-	17	30	20	-	-	-	-	-	-	-							
M24	36	39,98	15	-	-	19	36	24	-	-	-	-	-	-	-							
M30	46	50,85	18,7	-	-	22	45	30	-	-	-	-	-	-	-							
M36	55	60,79	22,5	-	-	27	54	36	-	-	-	-	-	-	-							

Tableau 194/2

Dimensions en mm

Dimension de la clé	Tolérance pour les plages de cote nominale					
	≤ 30	> 30	1,5 jusqu'à 3	4	5 jusqu'à 14	> 14
s	h13	h14	-	-	-	-
s1	-	-	D11	E11	E12	D12

1) A1 = Numéro six lobes internes: entraînement cf. paragraphe 4.1.7.3
2) A2 = Dimension empreinte cruciforme Z (Pozidriv): entraînement cf. paragraphe 4.1.7.1.2
3) A3 = Dimension empreinte cruciforme H (Phillips): entraînement cf. paragraphe 4.1.7.1.1

4.5 TROUS DE PASSAGE, LAMAGES

4.5 Trous de passage, lamages

4.5.1 Trous de passage, lamages cylindriques

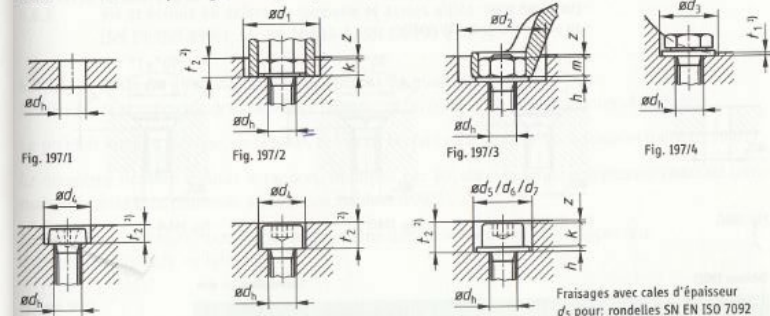


Fig. 197/1

Fig. 197/2

Fig. 197/3

Fig. 197/4

Fig. 197/5

Fig. 197/6

Fig. 197/7

Fraisages avec cales d'épaisseur
d₅ pour: rondelles SN EN ISO 7092
d₆ pour: rondelles SN EN ISO 7089
d₇ pour: rondelles élastiques DIN 6796

Tableau 197/1

Dimensions en mm

Grandeur nominale	Trous de passage ¹⁾ (ISO 273) Gamme		Lamages cylindriques											Ajout ²⁾	
	Tolérances pour diamètre de lamage: H13														
			Vis à tête cylindrique et écrous hexagonaux sans bride ³⁾ (DIN 974-2)					Vis à tête cylindrique (DIN 974-1) ⁴⁾							
(Diamètre de filetage)	moyen H13	fin H12													
d	d _h	d _h	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉	d ₁₀	d ₁₁	d ₁₂	z
1,6	1,8	1,7	-	-	5	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4
2	2,4	2,2	-	-	6	4,4	5,5	6	6	6	6	6	6	6	0,4
2,5	2,9	2,7	-	-	8	5,5	6	7	7	7	7	7	7	7	0,4
3	3,4	3,2	11	11	9	6,5	7	9	8	8	8	8	8	8	0,4
4	4,5	4,3	13	15	10	8	9	10	10	10	10	10	10	10	0,4
5	5,5	5,3	15	18	11	10	11	13	13	13	13	13	13	13	0,4
6	6,6	6,4	18	20	13	11	13	15	15	15	15	15	15	15	0,4
8	9	8,4	24	26	18	15	16	18	20	20	20	20	20	20	0,6
10	11	10,5	28	33	22	18	20	24	24	24	24	24	24	24	0,6
12	13,5	13	33	36	26	20	24	26	33	33	33	33	33	33	0,6
16	17,5	17	40	46	33	26	30	33	43	43	43	43	43	43	0,6
20	22	21	46	54	40	33	36	40	48	48	48	48	48	48	0,6
24	26	25	58	73	48	40	43	48	58	58	58	58	58	58	0,8
30	33	31	73	82	61	50	54	61	73	73	73	73	73	73	1,0
36	39	37	82	93	73	58	63	69	-	-	-	-	-	-	1,0

- La profondeur t_1 de fraisage ne doit pas être plus grande que la profondeur permettant de garantir une surface d'appui perpendiculaire à l'axe du trou de passage. La profondeur du lamage côté écrou est fonction de la longueur exploitable de l'extrémité de la vis.
- La profondeur t_2 est à déterminer selon les cas d'utilisation. Profondeur t_2 recommandée: $t_2 = k_{max} + h_{max} + ajout$
- Pour les écrous hexagonaux avec embase SN EN 1661 et les vis à six pans avec embase ISO 4162, utiliser d_1 ou d_2 .
- Pour les vis à tête cylindrique avec lobes internes et tête basse, utiliser d_4 .
- Pour éviter les incertitudes de spécification, il est conseillé d'indiquer sur le dessin la tolérance normée des trous de passage.

4.5 TROUS DE PASSAGE, LAMAGES

4.5.2 Trous de passage, fraisage coniques

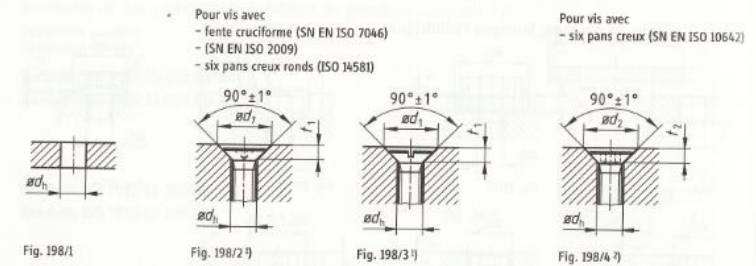


Fig. 198/1

Fig. 198/2

Fig. 198/3

Fig. 198/4

Tableau 198/1

Dimensions en mm

Grandeur nominale	Trous de passage (ISO 273) Gamme		Fraisages coniques					
	moyen	fin	Vis à tête fraisée 90°				avec six pans creux (DIN 74-Forme F) 7)	
(Diamètre de filetage)			avec fente cruciforme, fente et six pans creux ronds (SN EN ISO 15065) 1)					
<i>d</i>	<i>d</i> _h	<i>d</i> _h	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	<i>d</i> ₃	<i>d</i> ₄	<i>d</i> ₅	<i>d</i> ₆
	H13	H12	min.	max.	—			
1,6	1,8	1,7	3,6	3,7	0,95	—	—	—
2	2,4	2,2	4,4	4,5	1,05	—	—	—
2,5	2,9	2,7	5,5	5,6	1,35	—	—	—
3	3,4	3,2	6,3	6,5	1,55	7	1,8	—
4	4,5	4,3	9,4	9,6	2,55	9,2	2,3	—
5	5,5	5,3	10,4	10,65	2,58	11,5	3	—
6	6,6	6,4	12,6	12,85	3,13	13,7	3,6	—
8	9	8,4	17,3	17,55	4,28	18,3	4,6	—
10	11	10,5	20	20,3	4,65	22,7	5,9	—
12	13,5	13	—	—	—	27,2	6,9	—
16	17,5	17	—	—	—	34	8,2	—
20	22	21	—	—	—	40,7	9,4	—
24	26	25	—	—	—	—	—	—

4.5.3 Exemples d'application

Dans les dessins techniques, il faut indiquer les alésages coniques conformément à la fig. 198/5 ou 198/6.

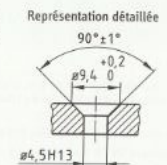


Fig. 198/5

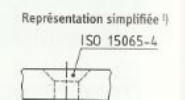


Fig. 198/6

- Inscription simplifiée sur plan au lieu de la cotation, exemple pour M4: ISO 15065-4.
- Inscription simplifiée sur plan au lieu de la cotation, exemple pour M4: DIN 74-F4.
- Valable pour trou de part en part série moyenne.

Eléments normalisés

➤ Circlips et segments d'arrêt

VSM p. 280-282

221

4 Éléments de machines

4.13 SEGMENTS D'ARRET, CIRCLIPS

4.13 Segments d'arrêt, circlips

4.13.1 Segments d'arrêt (rondelles de retenue) pour arbres (DIN 6799)

Exemples de désignation pour $d_1 = 5$ mm:

Désignation complète:
Désignation abrégée:

Segment d'arrêt pour arbres DIN 6799-5
Seg arb ext DIN 6799-5

Matière: Acier à ressort 460 ... 580 HV 30

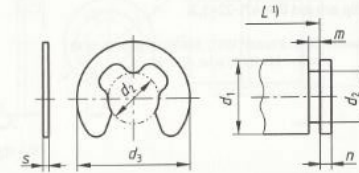


Fig. 219/1

Tableau 219/1

Dimensions en mm

Diamètre de l'arbre		Dimensions du segment			Dimensions de la rainure				Limite de charge F_N de la rainure	
d_1	d_2	d_3	s	d_1	m	n	d_1	d_2	d_1	d_2
de	à	Cote nominale	monté	h11	Ecarts	min.	min.	max.	min.	max.
1	1,4	0,8	2,25	0,2	0,8	0,24	+0,04	0,4	15	45
1,4	2	1,2	3,25	0,3	1,2	0,34	0	0,6	25	100
2	2,5	1,5	4,25	0,4	1,5	0,44	0	0,8	70	140
2,5	3	1,9	4,8	0,5	1,9	0,54	0	1	100	180
3	4	2,3	6,3	0,6	2,3	0,64	0	1,2	150	360
4	5	3,2	7,3	0,7	3,2	0,74	+0,05	1,2	220	500
5	7	4	9,3	0,7	4	0,94	0	1,5	250	750
6	8	5	11,3	0,7	5	0,74	0	1,2	450	1150
7	9	6	12,3	0,7	6	0,74	0	1,2	550	1350
8	11	7	14,3	0,9	7	0,94	0	1,5	625	1800
9	12	8	16,3	1	8	1,05	+0,08	1,8	700	2500
10	14	9	18,8	1,1	9	1,15	0	2	800	3000
11	15	10	20,4	1,2	10	1,25	0	2	850	3500
13	18	12	23,4	1,3	12	1,35	0	2,5	1000	4700
16	24	15	29,4	1,5	15	1,55	0	3	1400	7800

1) La cote L est une cotation fonctionnelle usuelle.
2) La largeur de la rainure m et les écarts peuvent être augmentés en cas de charge axiale dans un seul sens.

4 Éléments de machines

4.13 SEGMENTS D'ARRET, CIRCLIPS

4.13.2 Circlips (anneaux élastiques) pour arbres (DIN 471)

Exemples de désignation pour $d_1 = 22$ mm, $s = 1,2$ mm:

Désignation complète:
Désignation abrégée:

Circlip pour arbre DIN 471-22x1,2
Clip arb ext DIN 471-22x1,2

Matière: Acier à ressort 470 ... 580 HV 30 pour $d_1 \leq 45$
435 ... 530 HV 30 pour $d_1 \geq 50$

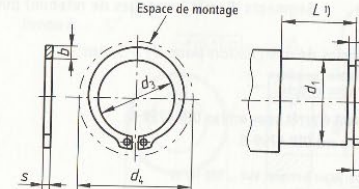


Fig. 220/1

Tableau 220/1

Dimensions en mm

Cotes nominales		Dimensions du circlip				Dimensions de la rainure			Limite de charge F_N de la rainure				
Diamètre de l'arbre d_1	Épaisseur du circlip s	b	d_3	d_4	d_5	m	n	N					
		e											
		Écart admiss.				Classes de tolérances	H13	min.	max.				
12	1	0 -0,06	1,8	11	19	11,5	h11	1,1	0,8	1530			
14			2,1	12,9	21,4	13,4			0,9	2150			
15			2,2	13,8	22,6	14,3			1,1	2660			
16			2,2	14,7	23,8	15,2			1,2	3260			
17			2,3	15,7	25	16,2				3460			
18	1,2		2,4	16,5	26,2	17		1,3	1,5	4580			
20			2,6	18,5	28,4	19				5060			
22			2,8	20,5	30,8	21				5650			
25			3	23,2	34,2	23,9				1,3	1,7	7050	
28			3,2	25,9	37,9	26,6							
30	1,5	3,5	27,9	40,5	28,6		1,6	2,1	10000				
32		3,6	29,6	43	30,3				10730				
35		3,9	32,2	46,8	33				2,6	3	13850		
36		4	33,2	47,8	34						17800		
40		1,75	4,4	36,5	52,6				37,5	1,85	3	18330	
45	4,7		41,5	59,1	42,5	3,8	25300						
50	2	5,1	45,8	64,5	47		h12	2,15	4,5	38000			
55		5,4	50,8	70,2	52	42000							
60		5,8	55,8	75,6	57	46000							
65		2,5	6,3	60,8	81,4	62					2,65	4,5	49800
70			6,6	65,5	87	67							53800
75	7		70,5	92,7	72	5,3	57600						
80	7,4		74,5	98,1	76,5		71600						
85	3		7,8	79,5	103,3	81,5		3,15	5,3				76200
90		8,2	84,5	108,5	86,5	80800							
95		8,6	89,5	114,8	91,5	85500							
100		9	94,5	120,2	96,5					90000			

1) La cote L est une cotation fonctionnelle usuelle.
2) La largeur de la rainure m peut être augmentée en cas de charge axiale dans un seul sens.

4 Éléments de machines

4.13 SEGMENTS D'ARRET, CIRCLIPS

4.13.3 Circlips (anneaux élastiques) pour alésages (DIN 472)

Exemples de désignation pour $d_1 = 28$ mm, $s = 1,2$ mm:

Désignation complète:
Désignation abrégée:

Circlip pour alésage DIN 472-28x1,2
Clip ale int DIN 472-28x1,2

Matière: Acier à ressort 470 ... 580 HV 30 pour $d_1 \leq 47$
435 ... 530 HV 30 pour $d_1 \geq 50$

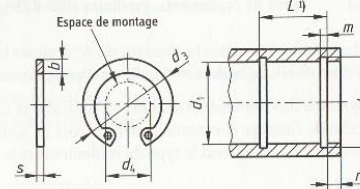


Fig. 221/1

Dimensions en mm											
Cotes nominales			Dimensions du circlip			Dimensions de la rainure			Limite de charge F_N de la rainure		
Diamètre d'alésage d_1	Épaisseur du circlip s	Écart. admiss.	b	d_3	d_4	d_2	m	n			
							Classes de tolérances	H13	min.	N max.	
28	1,2	0	2,9	30,1	17,9	29,4	H12	1,3	2,1	10500	
30			3	32,1	19,9	31,4			2,1	11300	
32			3,2	34,4	20,6	33,7			2,6	14000	
35	1,5	-0,06	3,4	37,8	23,6	37	H12	1,6	3	18800	
37			3,6	39,8	25,4	39			3	19800	
40			3,9	43,5	27,8	42,5			1,85	3,8	27000
42	1,75	4,1	45,5	29,6	44,5	28400					
45		4,3	48,5	32	47,5	30200					
47		4,4	50,5	33,5	49,5	31400					
50	2	0	4,6	54,2	36,3	53	H12	2,15	4,5	40500	
52			4,7	56,2	37,9	55			4,5	42000	
55			5	59,2	40,7	58			4,5	44400	
60	2,5	-0,07	5,4	64,2	44,7	63	H12	2,65	4,5	48300	
62			5,5	66,2	46,7	65			4,5	49800	
65			5,8	69,2	49	68			4,5	51800	
68	2,5	-0,07	6,1	72,5	51,6	71	H12	2,65	4,5	54500	
70			6,2	74,5	53,6	73			4,5	56200	
72			6,4	76,5	55,6	75			4,5	58000	
75	3	0	6,6	79,5	58,6	78	H12	3,15	5,3	60000	
80			7	85,5	62,1	83,5			5,3	74600	
85			7,2	90,5	66,9	88,5			5,3	79500	
90	3	-0,08	7,6	95,5	71,9	93,5	H12	3,15	5,3	84000	
95			8,1	100,5	76,5	98,5			5,3	88600	
100			8,4	105,5	80,6	103,5			5,3	93100	
110	4	0	9	117	88,2	114	H13	4,15	6	117000	
115			9,3	122	93	119				6	122000
120			9,7	127	96,9	124				6	127000
125	4	-0,1	10	132	101,9	129	H13	4,15	6	132000	
130			10,2	137	106,9	134				6	138000
140			10,7	147	116,5	144				6	148000
145	4	-0,1	10,9	152	121	149	H13	4,15	6	153000	
150			11,2	158	124,8	155				7,5	191000

1) La cote L est une cotation fonctionnelle usuelle.
2) La largeur de la rainure m peut être augmentée en cas de charge axiale dans un seul sens.

Eléments normalisés

► Joints toriques «O-ring»



VSM p. 295

4	Éléments de machines
4.16	JOINTS

Fabrication des joints plats: Les joints sont découpés dans des plaques d'étanchéité selon la forme des surfaces d'étanchéité.

Tableau 234/1 Epaisseur des plaques (DIN 28091-1)							Dimensions en mm	
Dimension nominale	0,5	1	1,5	2	3	4		
Ecart admissible	±0,1		±0,15	±0,2	±0,3	±0,4		

4.16.2.1.1 Exemple d'utilisation

Joints plats pour brides, voir SN EN 1514-1.

4.16.2.2 Joints toriques (DIN 3771-1)

Exemple de désignation pour $d_1 = 17$ mm, $d_2 = 1,8$ mm, en NBR, dureté 70 DIDC ¹⁾, pour utilisation générale (N):

Désignation complète:
Désignation abrégée: non prévue

Joint torique DIN 3771-17x1,8-N-NBR 70

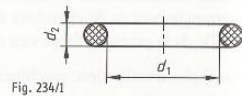


Fig. 234/1

Tableau 234/2 Dimensions des joints (choix)								Dimensions en mm	
d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2		
2 ±0,13		21,2 ±0,23		32,5 ±0,23		65 ±0,58			
3,15 ±0,14		22,4 ±0,24		34,3 ±0,24		67 ±0,59			
4 ±0,14		23,6 ±0,24		36,5 ±0,24		69 ±0,61			
4,5 ±0,14		25 ±0,25		38,7 ±0,25		71 ±0,63			
5 ±0,15		26,5 ±0,26		40 ±0,26		80 ±0,69			
6 ±0,15		28 ±0,28		41,2 ±0,28		87,5 ±0,75			
6,3 ±0,15	1,8 ±0,08	30 ±0,29	2,65 ±0,09	43,7 ±0,29		100 ±0,84	5,3 ±0,13		
8,5 ±0,16		31,5 ±0,31		45 ±0,31	3,55 ±0,10	125 ±1,03			
10,6 ±0,18		32,5 ±0,32		48,7 ±0,32		165 ±1,31			
11,8 ±0,19		34,5 ±0,33		50 ±0,33		200 ±1,55			
12,5 ±0,19		36,5 ±0,35		65 ±0,35		250 ±1,88			
17 ±0,21		38,7 ±0,37		92,5 ±0,37					
				115 ±0,37		206 ±1,59			
14 ±0,19		18 ±0,21		150 ±0,37		230 ±1,75			
15 ±0,20		19 ±0,22				272 ±2,02			
16 ±0,20		20 ±0,22		40 ±0,37		315 ±2,30	7 ±0,15		
17 ±0,21	2,65 ±0,09	22,4 ±0,24	3,55 ±0,10	45 ±0,37					
18 ±0,21		23,6 ±0,24		50 ±0,37	5,3 ±0,13				
19 ±0,22		28 ±0,28		58 ±0,37					
20 ±0,22		30 ±0,29		60 ±0,37					

Matières: NBR (élastomère de butadiène-nitrile) pour des températures dès -30°C, pour étanchement de fluides à base d'huile minérale comme les huiles de moteurs jusqu'à 110 °C, les huiles de boîtes à vitesses jusqu'à 90 °C, pour les fluides hydrauliques jusqu'à 100 °C, pour les huiles de chauffage, les graisses jusqu'à 90 °C, ainsi que d'autres fluides tels que l'eau jusqu'à 100 °C et l'air jusqu'à 90 °C.

D'autres élastomères sont disponibles pour des cas spéciaux.

Dureté: Standard 70 DIDC ¹⁾. Autres duretés: 60, 80, 90 DIDC selon la vitesse de tige et la pression.

¹⁾ IRHD = International Rubber Hardness Degree conforme à ISO 48. Cette norme définit les procédés de contrôle spécialement conçus pour les joints toriques et fournit une échelle de dureté IRHD dans une plage de dureté de 0 IRHD à 100 IRHD. Pour les élastomères hautement élastiques, les échelles IRHD et les appareils de contrôle de la dureté Shore A sont comparables.

4	Éléments de machines
4.16	JOINTS

4.16.2.2.1 Profils des rainures de joints (Directives selon indications de fournisseurs)

Les dimensions des rainures sont à choisir selon les cas d'utilisation (immobile ou mobile) et selon la dureté du joint.

Pour ne pas blesser les joints, il faut que la contre-pièce soit chanfreinée sur la longueur z (voir tableau 235/1) sous un angle d'environ 20°. Les arêtes des chanfreins doivent être arrondies et polies.

Les rugosités de surface suivantes sont valables pour la rainure du joint et la contre-pièce:

- flancs de la rainure: utilisation statique: Ra 3,2, utilisation dynamique: Ra 0,2 ... 0,8
- surfaces d'étanchéité y compris fond de la rainure pour étanchéité statique: Ra 0,8
- fond de rainure en hydraulique et pneumatique: Ra 0,8
- surfaces coulissantes et entrée (20°) en hydraulique et pneumatique: Ra 0,4

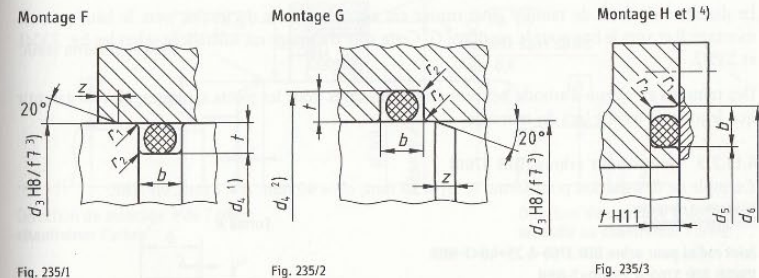


Fig. 235/1

Fig. 235/2

Fig. 235/3

Tableau 235/1 Dimensions des rainures (Valeurs théoriques selon indications de fournisseurs)									Dimensions en mm	
Cote nominale Joint torique d_2 ¹⁾	b Tol.			r_1 r_2		t_{min} ⁴⁾ Etanchement de			z min.	
						pièces immobiles Montage F...	pièces mobiles Montage G et H	Hydraulique Pneumatique		
1,8	2,5	±0,1	0,1	0,25	1,3	1,5	1,55	2,0		
2,65	3,5	±0,1	0,1	0,25	2,05	2,35	2,4	2,5		
3,55	4,5	±0,2	0,2	0,75	2,9	3,05	3,25	3,0		
5,3	7	±0,3	0,2	0,75	4,5	4,7	4,95	3,5		
7	9,5	±0,3	0,2	0,75	6,0	6,2	6,5	4,0		

¹⁾ Pour pièces immobiles: h11
Pour pièces mobiles: h9

²⁾ Pour pièces immobiles: H11
Pour pièces mobiles: H9

³⁾ Pour pression ≤ 70 bars et dureté du joint de 60 à 90 DIDC. Pour valeurs plus élevées: voir indications des fournisseurs

⁴⁾ H = pression de l'extérieur (comme représenté)
I = pression de l'intérieur (joint pressé vers l'extérieur)

⁵⁾ Diamètre de la section du joint (Fig. 234/1).

⁶⁾ t_{max} s'obtient par addition des tolérances des pièces.

Section de Physique – SB-EPFL

Construction mécanique



Goupilles



VSM p. 272

4	Éléments de machines
4.8	GOUPILLES CONIQUES

4.8 Goupilles coniques, goupilles cylindriques, goupilles cannelées

Exemples de désignation:

Désignation complète:
Désignation abrégée:

Goupille conique ISO 2339-A-6x30-Ac
Gp co ISO 2339-A-6x30-Ac

Exécution A: $Ra = 0,8$ µm rectifiée
Exécution B: $Ra = 1,6$ µm tournée

Matière: Ac = Acier de décolletage
Dureté: 125 jusqu'à 245 HV



Fig. 209/1

Exemples d'application:

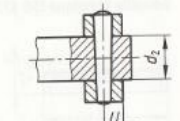


Fig. 209/2

Goupille cylindrique ISO 2338-5m6x40-Ac ¹⁾
Gp ISO 2338-5m6x40-Ac

Tolérance pour d_1 : m6, $Ra = 0,8$ µm
h8, $Ra = 1,6$ µm

Matière: Acier Al dureté: 125 HV 30 ... 245 HV 30
dureté: 210 HV 30 ... 280 HV 30

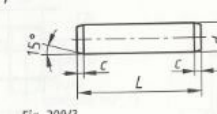


Fig. 209/3

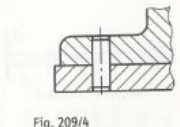


Fig. 209/4

Goupille cannelée ISO 8744-6x40-Ac ¹⁾
Gp ca ISO 8744-6x40-Ac

Matière: Acier Al dureté: 125 HV 30 ... 245 HV 30
dureté: 210 HV 30 ... 280 HV 30

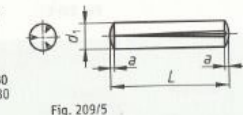


Fig. 209/5

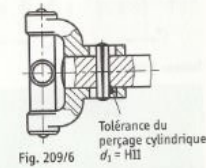


Fig. 209/6

Tableau 209/1

Dimensions en mm

Diamètre nominal d_1	Goupilles coniques (SN EN 22339)				Goupilles cylindriques (SN EN ISO 2338)		Goupilles cannelées (SN EN ISO 8744)		
	d_2	U min.	a —	L	c —	L	F_2 kN	a —	L
2	> 6 ... 8	4,5	0,25	10 ... 35	0,35	5 ... 20	2,84	0,25	8 ... 30
2,5	> 8 ... 9	5	0,3	10 ... 35	0,4	5 ... 24	4,4	0,3	8 ... 30
3	> 9 ... 12	5	0,4	12 ... 45	0,5	8 ... 30	6,4	0,4	8 ... 40
4	> 12 ... 17	6	0,5	14 ... 55	0,63	8 ... 40	11,3	0,5	8 ... 60
5	> 17 ... 23	7,5	0,63	18 ... 60	0,8	10 ... 50	17,6	0,63	8 ... 60
6	> 23 ... 29	9	0,8	22 ... 90	1,2	12 ... 60	25,4	0,8	10 ... 80
8	> 29 ... 45	11	1	22 ... 120	1,6	14 ... 80	45,2	1	12 ... 100
10	> 45 ... 69	13	1,2	26 ... 160	2	18 ... 95	70,4	1,2	14 ... 120
12	> 69 ... 110	15	1,6	32 ... 180	2,5	22 ... 140	101,8	1,6	14 ... 120
16	> 110 ... 160	18	2	40 ... 200	3	26 ... 180	181	2	24 ... 120
20	> 160	—	2,5	45 ... 200	3,5	35 ... 200	283	2,5	26 ... 120

Longueurs normales pour goupilles: 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 120, 140, 160, 180, 200 mm.

¹⁾ A choix: Ac ou acier austénitique non oxydable Al selon chap. 4.6.2.

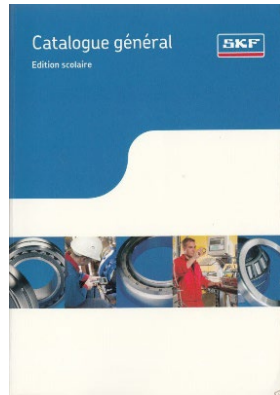
²⁾ F_2 = Force de cisaillement minimum sur 2 sections.

Eléments normalisés

➤ Roulements

Section de Physique – SB-EPFL

Construction mécanique



Roulements rigides à billes 287

Roulements à billes à contact oblique 405

Roulements à rotule sur billes 469

Roulements à rouleaux cylindriques 503

Roulements à rouleaux coniques 601

Roulements à rotule sur rouleaux 695

Roulements CARB® à rouleaux toroïdaux 779

Butées à billes 837

Butées à rouleaux cylindriques 863

Butées à rotule sur rouleaux 877

Produits spécifiques 893

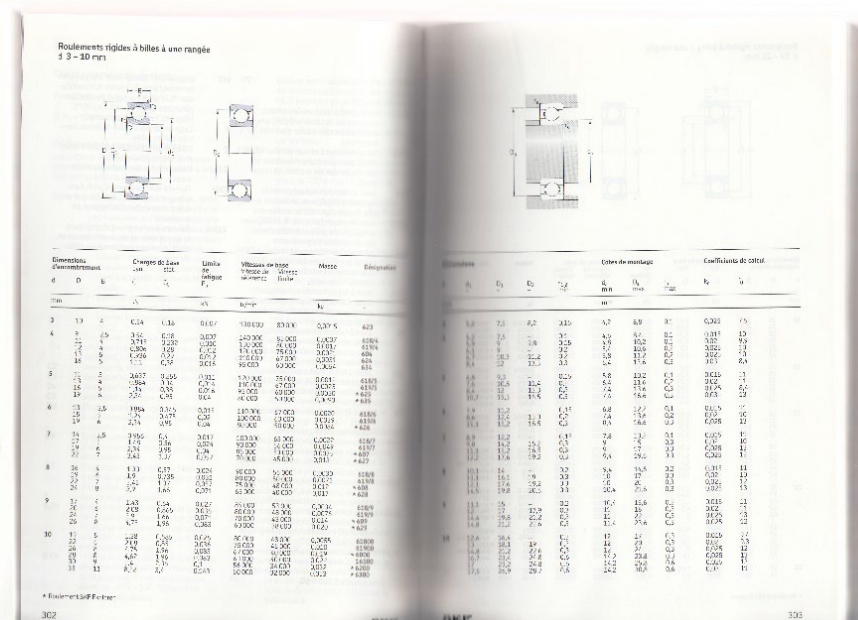
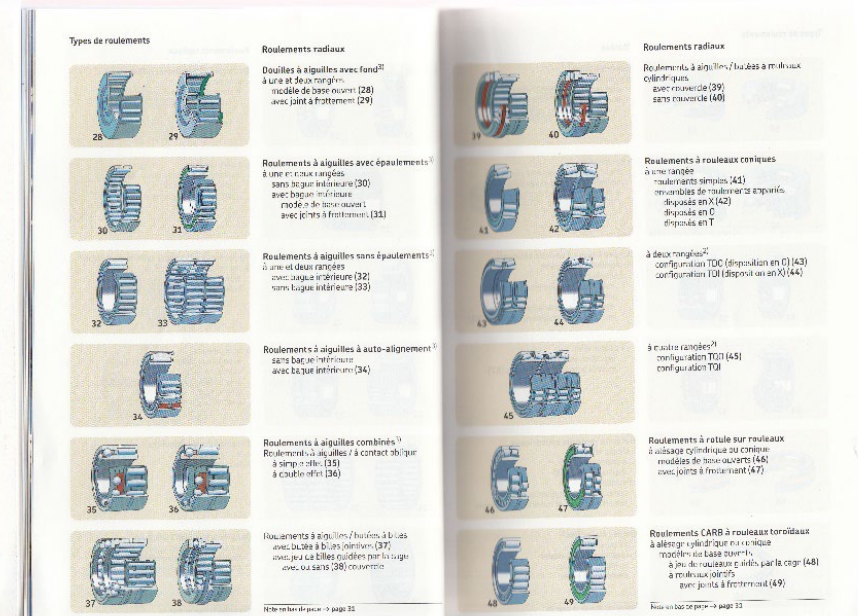
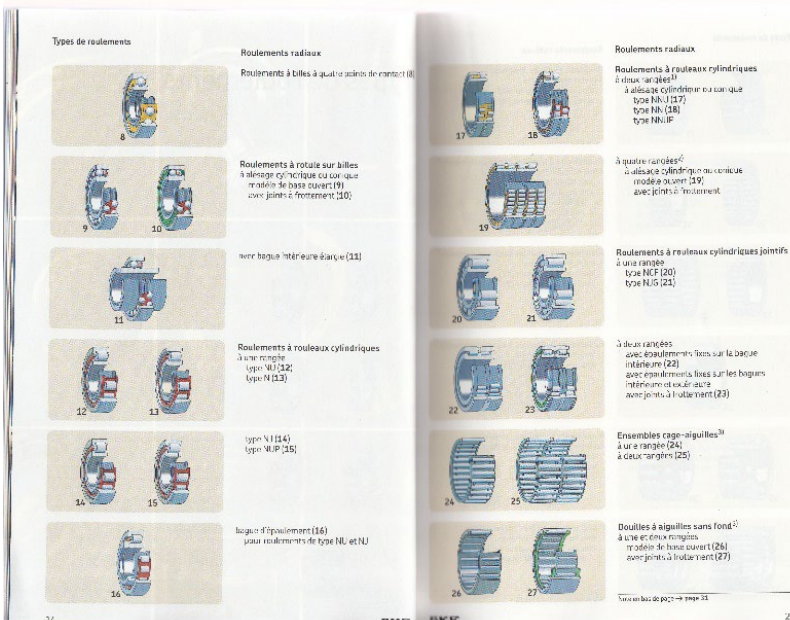
Mécatronique 955

Accessoires pour roulements 973

Paliers 1031

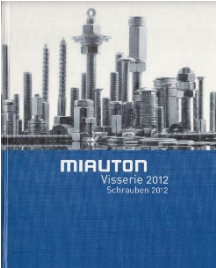
Produits de maintenance et de lubrification 1069

Autres produits SKF 1081



Eléments normalisés

➤ Miauton



BRW

Anwendungshinweise, Index	Indications d'utilisation, Index	Avvertenze, Indice	
Innensechskant- und Innensechsrund-Schrauben	Vis à six pans creux et à six lobes internes	Viti con esagono incassato e con cava esalobata	
Sechskantschrauben	Vis à tête hexagonale	Viti a testa esagonale	
Muttern, Gewindeinsätze	Ecrous, douilles filetées	Dadi, Inserti filettati	
Grobschrauben, Dübel	Vis exécution grossière, Chevilles	Bulloni grossolani, Tasseili	
Schiltz-, Kreuzschiltz-, Kombischrauben	Vis à fente, vis à empreinte cruciforme, vis combinées	Viti con intaglio, viti con impronta a croce, viti con rosetta preassemblata	
Gedrehte Schrauben, Gewindestangen, Gewindestifte, Schlauchbriden	Vis décollées, tiges filetées, vis sans tête, colliers de serrage	Viti forni, barre filettate, viti senza testa, fascette stringitubo	
Scheiben, Sicherungselemente	Rondelles, éléments de sécurité	Rosette, elementi di sicurezza	
Stifte, Nieten, Keile	Goupilles, rivets, clavettes	Spine, rivetti, linguette	
Bleischrauben, Bohrschrauben, gewindeformende Schrauben	Vis à tôle, vis autoperceuses, vis autoformeuses	Viti autofilettanti, viti autoperforanti, viti automaschianti	
Holzschrauben	Vis à bois	Viti per legno	
Verbindungselemente aus INOX	Éléments d'assemblages en INOX	Elementi di fissaggio in INOX	
Verbindungselemente aus diversen Werkstoffen	Éléments d'assemblage en divers matériaux	Elementi di collegamento in altri materiali	
Elektrotechnische Verbindungselemente	Éléments de fixation pour l'électrotechnique	Elementi di fissaggio per l'elettrotecnica	

Innensechskant- und Innensechsrund-Schrauben	Vis à six pans creux / à six lobes internes	Viti con esagono incassato / con cava esalobata			
1	Innensechskant- und Innensechsrund-Schrauben Vis à six pans creux / à six lobes internes Viti con esagono incassato / con cava esalobata				ab Seite des la da pagina
	Zylinderschrauben mit Innensechskant Vis à tête cylindrique à six pans creux Viti a testa cilindrica con esagono incassato	ohne Schaft - 8,8 mit Schaft - 8,8 ohne Schaft - 12,9 mit Schaft - 12,9 mit/ohne Schaft UNC/UNF mit niedrigem Kopf - 8,8/-10,9	entièrement filetés - 8,8 partiellement filetés - 8,8 entièrement filetés - 12,9 partiellement filetés - 12,9 ent / part. filetés UNF/UNC avec tête basse - 8,8/-10,9		1.004 1.010 1.016 1.023 1.030 1.034
	Sicherungsschrauben mit Innensechskant Vis de sécurité à six pans creux Viti di sicurezza con esagono incassato	Linenschrauben mit Flansch - 10,9 Zylinderschrauben mit Flansch - 12,9 Zylinderschrauben mit geripptem Flansch 100	Vis à tête bombée avec embase - 10,9 Vis à tête cylindrique à coleretto - 12,9 Vis à tête cylindrique à embase nervurée 100		1.042 1.044 1.046
	Diverse Formen mit Innensechskant Formes diverses à six pans creux Forme diverse con esagono incassato	Passe-Schuttschrauben - 12,9 Linenschrauben - 10,9 Senkschrauben - 10,9	Vis ajustables à épaulement - 12,9 Vis à tête bombée - 10,9 Vis à tête fraisée - 10,9		1.048 1.051 1.055
	Diverse Formen mit Innensechskant Formes diverses à six lobes internes Forme diverse con cava esalobata	Zylinderschrauben - 8,8 Linenschrauben - 8,8 Senkschrauben - 8,8	Vis à tête cylindrique - 8,8 Vis à tête bombée 8,8 Vis à tête fraisée - 8,8		1.061 1.065 1.072
	Gewindestifte mit Innensechskant Vis sans tête à six pans creux Viti senza testa con esagono incassato	mit Kegelhülse mit Spitze mit Zapfen mit Ringschneide	avec bout plat avec bout tronconique avec téton avec bout cussette		1.075 1.082 1.086 1.089
1	Innensechskant- und Innensechsrund-Schrauben Vis à six pans creux / à six lobes internes Viti con esagono incassato / con cava esalobata				ab Seite des la da pagina
	Gewindestifte mit Innensechskant Vis sans tête à six lobes internes Viti senza testa con cava esalobata	mit Kegelhülse mit Ringschneide	avec bout plat avec bout cussette		1.094 1.096
	Verschlusschrauben Bouchons filetés Tappi con esagono incassato	metrisches Feingewinde Rohrgewinde	filetage métrique à pas fin filetage au pas du gaz		1.098 1.100
	Eindehwerkzeuge Outils de montage Utensili per serraggio	Stiftschlüssel Schraubendreher-Einsätze Steckschlüssel-Einsätze	Clés mâles Embout de tournevis Douilles		1.102 1.108 1.118

- *Cours de construction mécanique*

Simulation par éléments finis

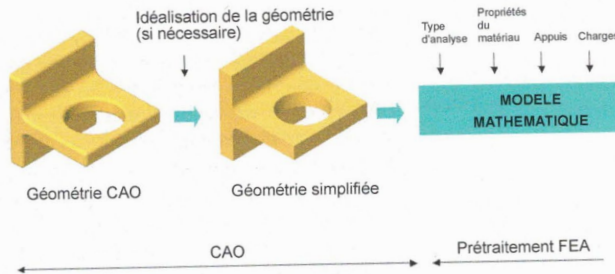
- Principe
- Contraintes & limites
- Hypothèses & Vérifications
- Modélisation & Maillage
- Solveurs
- Analyse des Résultats

Simulation par éléments finis

➤ Principe: Discrétisation -> Stratégie -> Simplifications (Solidworks simulation pp. 12-22)

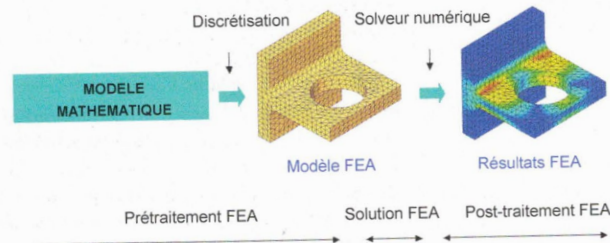
Après avoir préparé une géométrie qui soit maillable, mais qui n'est pas encore maillée, nous devons définir les propriétés de matériau, les charges, les déplacements imposés et les contraintes, ainsi que fournir des informations sur le type d'analyse qui nous intéresse.

Cette procédure est la dernière étape de la création d'un modèle mathématique. Comme vous l'aurez constaté, la création du modèle mathématique n'est pas un processus spécifique à l'analyse par éléments finis. A ce stade, l'analyse par éléments finis n'entre pas encore en jeu.



Créer un modèle d'éléments finis

A présent, nous fractionnons le modèle mathématique en éléments finis par discrétisation ou maillage. La discrétisation est visuellement représentée par le maillage de la géométrie. Toutefois, les charges et les appuis sont également discrétisés. Une fois le modèle maillé, les charges et les appuis discrétisés sont appliqués aux nœuds du maillage à éléments finis.



Résoudre le modèle d'éléments finis

Après avoir créé le modèle d'éléments finis, nous faisons appel à un solveur présent dans SOLIDWORKS Simulation pour générer les données qui nous intéressent.

Types d'éléments disponibles dans SOLIDWORKS Simulation

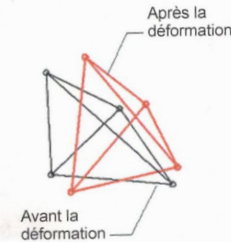
Eléments tétraédriques volumiques de premier ordre

Cinq types d'éléments sont disponibles dans SOLIDWORKS Simulation : les éléments tétraédriques volumiques de premier ordre, ceux de deuxième ordre, les éléments coque triangulaires de premier ordre et ceux de deuxième ordre et les éléments poutre à deux nœuds. Les paragraphes suivants les décrivent dans cet ordre.

Dans SOLIDWORKS Simulation, les éléments de premier ordre sont des éléments de **qualité moyenne** et ceux de deuxième ordre des éléments de **haute qualité**.

Les éléments tétraédriques (de qualité moyenne) de premier ordre modélisent les champs des déplacements de premier ordre (linéaires) dans leur volume, le long des faces et des arêtes. Les champs des déplacements linéaires (de premier ordre) donnent leur nom aux éléments : éléments de premier ordre. S'il vous reste quelques notions de *Résistance des matériaux*, la déformation est la dérivée première du déplacement. De ce fait, la déformation (obtenue par dérivation du déplacement) et, par conséquent, la contrainte sont constantes dans les éléments tétraédriques de premier ordre.

Chaque élément tétraédrique de premier ordre a un total de quatre nœuds, un par sommet. Chaque nœud a trois degrés de liberté, ce qui signifie que les déplacements des nœuds peuvent être entièrement décrits par trois composantes de translation. Une description plus détaillée des degrés de liberté vous est donnée plus loin dans ce chapitre.

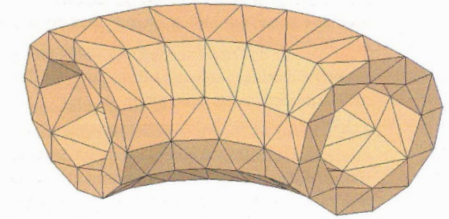


Les arêtes des éléments de premier ordre sont droites et les faces planes. Ces arêtes et ces faces doivent rester droites et planes une fois que les éléments sont déformés sous l'effet d'une charge.

Cette situation impose une limitation très stricte à la capacité d'un maillage créé avec des éléments de premier ordre pour modéliser les champs de déplacements et de contraintes, quelle que soit la complexité réelle. En outre, les arêtes droites et les faces planes ne correspondent pas convenablement à une géométrie de coude.

La figure suivante, qui présente une géométrie de coude, illustre l'absence d'association entre d'une part des arêtes droites et des faces planes et d'autre part une géométrie de coude qui utilise des éléments tétraédriques de premier ordre.

Pour les besoins de la démonstration, des éléments extrêmement grands (par rapport à la taille du modèle) sont utilisés pour ce maillage. Ce maillage ne serait pas suffisamment fin pour n'importe quel type d'analyse.



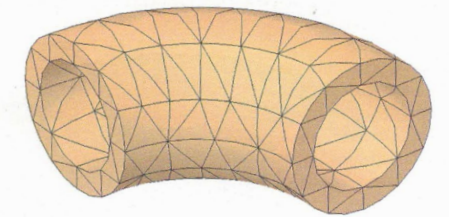
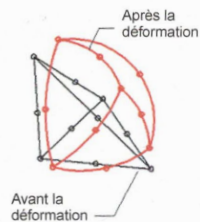
Eléments tétraédriques volumiques de deuxième ordre

Les éléments tétraédriques de deuxième ordre (de haute qualité) modélisent les champs de déplacements de deuxième ordre (parabolique) et par conséquent les champs de contraintes de premier ordre (linéaire). Sachez que la dérivée d'une fonction parabolique est une fonction linéaire. Les champs de déplacements de deuxième ordre donnent leur nom aux éléments : éléments de deuxième ordre.

Chaque élément tétraédrique de deuxième ordre a dix nœuds (quatre aux angles et six au centre de chaque côté) et chaque nœud a trois degrés de liberté.

Les arêtes et les faces des éléments volumiques de deuxième ordre peuvent revêtir des formes de coude si les éléments doivent être associés à une géométrie de coude ou durant la déformation si les éléments sont déformés sous l'effet d'une charge.

Ainsi, ces éléments sont précisément associés à la géométrie de coude, comme l'illustre la même géométrie de coude.



Simulation par éléments finis

➤ Principe

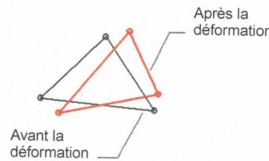
Nous rappelons que pour les besoins de la démonstration, des éléments extrêmement grands (par rapport à la taille du modèle) sont utilisés pour ce maillage. Ce maillage n'est pas suffisamment fin pour l'analyse, même s'il utilise des éléments de deuxième ordre qui nécessitent un maillage beaucoup moins fin que ceux de premier ordre.

Pour obtenir des résultats de contraintes précis, il est généralement conseillé d'utiliser au moins deux couches d'éléments de deuxième ordre sur l'épaisseur de la paroi.

Grâce à leur meilleure capacité de projection et à leur faculté de modéliser le champ des déplacements de deuxième ordre, les éléments tétraédriques de deuxième ordre sont utilisés pour une grande partie des analyses dans SOLIDWORKS Simulation, même s'ils demandent des calculs plus longs que les éléments tétraédriques de premier ordre.

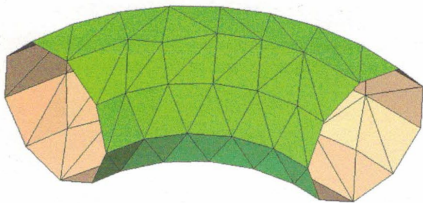
Similaires aux éléments volumiques de premier ordre, les éléments coque triangulaires de premier ordre modélisent les champs de déplacements linéaires ainsi que les déformations et les contraintes constantes le long des faces et des arêtes. Les arêtes des éléments coque de premier ordre sont droites et doivent le rester lorsque les éléments sont déformés.

Chaque élément coque de premier ordre a trois nœuds (à tous les angles) et chaque nœud a six degrés de liberté, ce qui signifie que ses déplacements sont entièrement décrits par trois composantes de translation et trois composantes de rotation.



Si nous représentons le coude avec une surface du plan médian et le maillon avec des éléments coque de premier ordre, notez le manque de précision dans l'association entre les éléments coque et la géométrie de coude.

Ce résultat ressemble à celui démontré précédemment concernant l'association entre des éléments de premier ordre et une géométrie de coude.

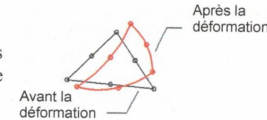


Eléments coque triangulaires de deuxième ordre

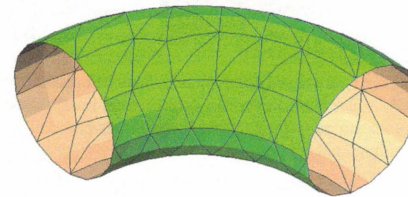
Comme les éléments volumiques de premier ordre précités, tous les éléments coque sont trop grands pour une analyse réelle. Dans l'illustration, des couleurs différentes sont utilisées pour faire la distinction entre la face supérieure (en marron) de l'élément et la face inférieure (en vert). L'orientation et les couleurs sont arbitraires. Vous pouvez les modifier en inversant les éléments coque. Elles ne font aucunement référence à l'orientation ou à la géométrie du modèle.

Les éléments coque triangulaires de deuxième ordre (de haute qualité) modélisent les champs de déplacements de deuxième ordre et les champs de contraintes de premier ordre (linéaires).

Chaque élément coque de deuxième ordre a six nœuds : trois aux angles et trois au centre de chaque côté. Les arêtes et les faces des éléments coque de deuxième ordre peuvent revêtir des formes de coude dans le processus de maillage si les éléments doivent être associés à une géométrie de coude ou durant la déformation si les éléments sont déformés sous l'effet d'une charge.



Ce maillage d'éléments coque créé avec des éléments de deuxième ordre est associé avec précision à une géométrie de coude comme l'illustre le modèle coudé.



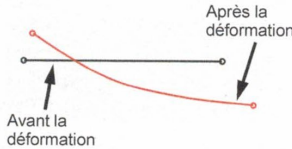
Bien que ce maillage soit très pratique pour mettre en évidence les capacités de projection, la taille d'élément est trop grande pour l'analyse, même si le maillage utilise des éléments coque de deuxième ordre qui nécessitent un maillage beaucoup moins fin que les éléments coque de premier ordre.

Contrairement aux éléments volumiques et aux éléments coque de premier ordre, les éléments poutre à deux nœuds modélisent les deux flèches hors plan sous la forme de fonctions cubiques tandis que les translations axiales et les termes de torsion le sont sous la forme de fonctions linéaires. Un élément poutre à deux nœuds présente initialement une forme droite mais peut avoir la forme d'une fonction cubique après déformation.

Eléments poutre

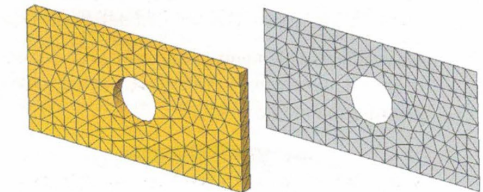
Choix entre des éléments volumiques ou des éléments coque

Chaque élément poutre à deux nœuds possède six degrés de liberté à chaque nœud d'extrémité : trois translations et trois rotations.



Les considérations concernant l'association des éléments volumiques et des éléments coque de premier ordre au maillage s'appliquent aussi aux éléments poutre à deux nœuds.

Certaines classes de formes peuvent être modélisées à l'aide d'éléments volumiques ou coque, tels que le modèle coudé traité plus haut. Le choix du type d'élément, volumique tétraédrique ou coque triangulaire, utilisé pour la modélisation peut dépendre des objectifs de l'analyse. Pourtant, le plus souvent, c'est la nature de la géométrie qui dicte le type d'élément à utiliser pour le maillage. Par exemple, les pièces moulées seront maillées avec des éléments volumiques alors qu'une tôle de métal le sera avec des éléments coque.



Une plaque percée, traitée dans la leçon suivante, peut être maillée avec des éléments volumiques créés par maillage d'une géométrie de solides ou avec des éléments coque créés par maillage d'une surface médiane.

Les éléments de premier ordre, volumiques ou coques, s'utilisent uniquement dans des études préliminaires avec des objectifs particuliers, par exemple, celui de vérifier les directions des charges ou des déplacements imposés ou encore de calculer des forces de réaction.

Il faut utiliser des éléments de haute qualité pour la modélisation des études prêtes aux derniers calculs (par exemple celles dans lesquelles la configuration adéquate a été vérifiée à l'aide d'éléments de qualité moyenne) et celle des études qui s'intéressent à la distribution des contraintes (particulièrement à travers l'épaisseur de la pièce).

➤ Contraintes & limites

Interprétation des résultats de l'analyse par éléments finis

Les résultats de l'analyse par éléments finis sont fournis soit sous la forme de déplacements, contraintes et déformations pour une analyse structurale, soit sous la forme de températures, gradients de température et flux de chaleur pour une analyse thermique. Tournons-nous à présent vers l'analyse structurale qui est plus intuitive. Comment déterminer si une conception a réussi ou échoué ?

Pour répondre à ces questions, nous devons établir certains critères afin d'interpréter les résultats de l'analyse par éléments finis. Il peut s'agir de déformation maximale acceptable, de contrainte maximale ou de fréquence naturelle acceptable.

Bien que les critères de déplacement ou de fréquence soient faciles à établir, ceux des contraintes le sont beaucoup moins. Supposons que nous menons une analyse des contraintes pour savoir si elles sont comprises dans une plage acceptable. Pour évaluer les résultats des contraintes, nous devons comprendre ce qui conduirait à une éventuelle rupture. Si la pièce se casse, quelle composante de contrainte en serait à l'origine ?

Il s'agit là d'un sujet que nous n'aborderons pas dans le présent manuel. Il est traité dans quasiment tous les ouvrages de résistance des matériaux. Ici, nous préférons limiter la discussion à l'identification des différences entre les contraintes de von Mises et les contraintes principales, qui sont les deux mesures de contrainte les plus adoptées pour évaluer la sécurité d'une structure.

La contrainte de von Mises, ou d'Huber, est une mesure de contrainte qui tient compte des six composantes de contrainte d'un état 3D général de contrainte.

Deux composantes de contrainte de cisaillement et une composante de contrainte normale sont exercées sur un cube élémentaire. Du fait des conditions d'équilibre, l'état 3D général de la contrainte est caractérisé par seulement six composantes de contrainte en raison des égalités :

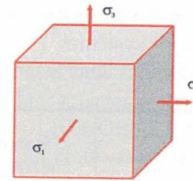
$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

L'équation de la contrainte de von Mises peut être exprimée par des composantes de contrainte définies dans un système de coordonnées global sous la forme :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{0.5[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

Contraintes principales : P1, P2 et P3

L'état de contrainte peut également être décrit par trois composantes de contraintes principales : $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ dont les directions sont la normale aux faces d'un cube élémentaire subissant les contraintes.



La contrainte de von Mises est ensuite exprimée sous la forme :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{0.5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Vous remarquerez que la contrainte de von Mises est une valeur scalaire non négative. La contrainte de von Mises est une mesure de contrainte couramment utilisée car la sécurité structurale de nombreux matériaux qui possèdent des propriétés élastoplastiques, comme l'acier, est parfaitement décrite par la grandeur des contraintes de von Mises.

En ce qui concerne ces matériaux, le coefficient de sécurité à la limite d'élasticité ou à la limite de rupture se calcule en divisant la contrainte limite (aussi appelée limite élastique) ou la limite de rupture (résistance à la rupture) du matériau par la contrainte de von Mises.

Dans SOLIDWORKS Simulation, les contraintes principales sont représentées par P1, P2 et P3.

La contrainte P1, généralement de type traction, est utilisée pour évaluer les contraintes dans des pièces faites d'un matériau cassant, dont la sécurité s'associe davantage à une contrainte P1 qu'à une contrainte de von Mises. La contrainte P3 permet d'examiner des contraintes de type pression et compression.

- Milieu homogène
- Contrainte linéaire
- Petites déformations
- Charges statiques
- Modélisation simplifiée de l'environnement

Simulation par éléments finis

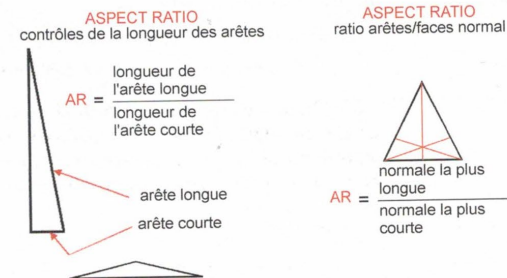
➤ Hypothèses & Vérifications (Solidworks simulation pp. 520-530)

Vérification de l'aspect ratio

Vous obtenez une meilleure précision numérique avec un maillage d'éléments tétraédriques ou triangulaires uniformes et parfaits, dont les arêtes sont de même longueur. Dans le cadre d'une géométrie générale, il est impossible de créer un maillage d'éléments tétraédriques parfaits. En raison des petites arêtes, de la géométrie de courbes, des entités fines et des angles saillants, certains éléments générés risquent de présenter des arêtes beaucoup plus longues que d'autres. Dans ce cas, la précision des résultats se détériore.

L'aspect ratio d'un élément tétraédrique parfait sert de base au calcul des aspects ratios d'autres éléments. Pour un élément tétraédrique parfait, l'aspect ratio désigne le rapport entre l'arête la plus longue et la normale la plus courte projetée depuis un sommet vers la face opposée normalisée. Par définition, l'aspect ratio d'un élément tétraédrique parfait est de 1,0. La vérification de l'aspect ratio est mise automatiquement en œuvre par le programme pour contrôler la qualité du maillage ; elle suppose la présence d'arêtes droites reliant les nœuds aux quatre angles.

Dans le cadre de cette vérification, SOLIDWORKS Simulation effectue un contrôle de la longueur des arêtes, du rayon du cercle inscrit et un contrôle de la longueur des normales.



Cette mesure de l'aspect ratio ne reconnaît pas les éléments "plats" comme étant incorrects.

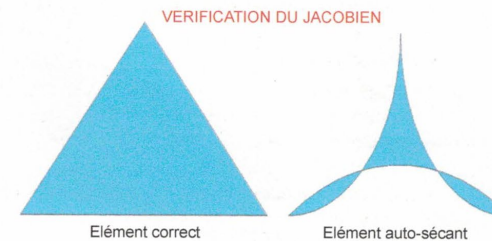
Vérification du Jacobien

Les éléments de deuxième ordre sont associés à une géométrie de courbes de manière beaucoup plus précise que les éléments linéaires de même taille. Les nœuds au centre de chaque côté des arêtes aux limites d'un élément sont placés sur la géométrie réelle du modèle. Dans le cas de limites saillantes ou de courbes, le fait de placer des nœuds au centre de chaque côté sur la géométrie réelle peut aboutir à des éléments déformés dont les arêtes se chevauchent.

Le Jacobien d'un élément extrêmement déformé devient négatif. Un élément dont le Jacobien est négatif entraîne l'arrêt du programme d'analyse.

La vérification du Jacobien tient compte d'un nombre de points situés dans chaque élément. Comme base de la vérification du Jacobien, SOLIDWORKS Simulation vous propose un choix de 4, 16 ou 29 points de Gauss ou l'option **Aux nœuds**.

Le coefficient du Jacobien de 1,0 est donné à un élément tétraédrique parabolique dont les nœuds au centre de chaque côté sont situés exactement au milieu des arêtes droites. Le coefficient du Jacobien augmente avec la courbure des arêtes. Le coefficient du Jacobien à un point à l'intérieur de l'élément fournit une mesure du degré de déformation de l'élément à cet endroit. SOLIDWORKS Simulation calcule le coefficient du Jacobien du nombre sélectionné de points de Gauss pour chaque élément tétraédrique.

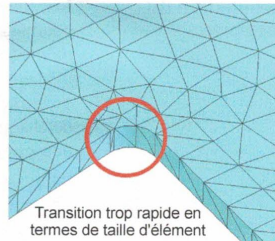


Un coefficient du Jacobien inférieur ou égal à 40 est en principe acceptable. SOLIDWORKS Simulation ajuste automatiquement les emplacements des nœuds au centre de chaque côté des éléments déformés pour garantir que tous les éléments font l'objet d'une vérification du Jacobien.

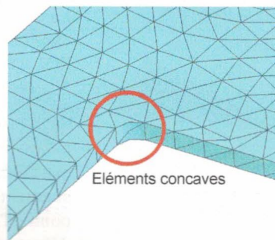
Même si cette vérification de la qualité du maillage ne génère aucun avertissement, il convient d'éviter les éléments trop concaves. Pour ce faire, vous appliquez des contrôles de maillage ou modifiez la taille d'élément globale.

Remarque

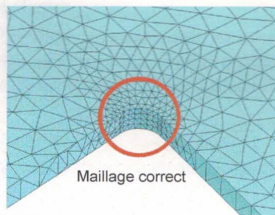
SOLIDWORKS Simulation tente de placer deux éléments sur un arc de 90°. Ce processus, combiné à une taille d'élément trop importante, risque de générer le placement de très petits éléments à côté des grands.



Si l'arc est supérieur à 90°, un seul élément est placé dessus, ce qui entraîne la création d'éléments avec des faces concaves.



L'application de contrôles de maillage (ici à la face arrondie) permet de générer un maillage correct.

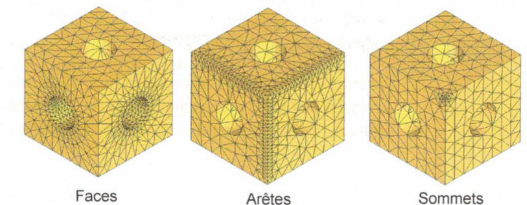


Contrôles de maillage

Nous avons mis en pratique l'application des contrôles de maillage dans plusieurs leçons. Examinons-les dès maintenant.

En principe, les contrôles de maillage peuvent être appliqués à des faces, des arêtes, des sommets et à des composants d'assemblage.

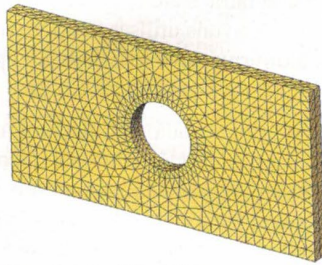
Contrôle de maillage appliqué aux :



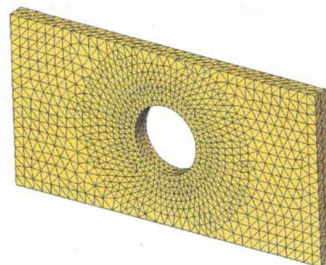
➤ Modélisation & Maillage

L'application de contrôles de maillage à une pièce revient à définir les paramètres suivants :

- La taille d'élément sur l'entité sélectionnée.
- Le rapport de la taille d'élément entre les couches.



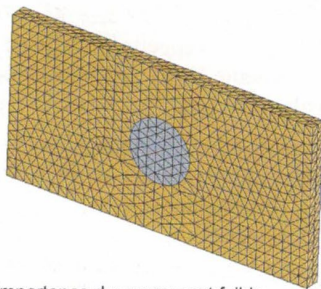
Rapport de la taille d'élément entre les couches = 1,5



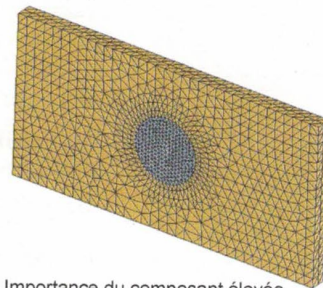
Rapport de la taille d'élément entre les couches = 1,1

La définition des contrôles de maillage appliqués à un composant revient à spécifier l'**Importance du composant** qui, en fonction de la position du curseur, indique au mailleur d'utiliser une taille d'élément différente pour chaque composant sélectionné.

L'extrémité gauche du curseur correspond à l'utilisation d'une taille d'élément globale par défaut de l'assemblage. L'extrémité droite du curseur correspond à l'utilisation d'une taille d'élément par défaut si le composant est maillé seul.



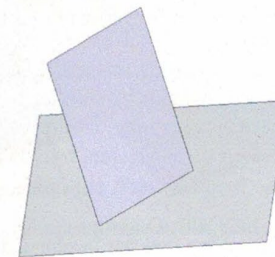
Importance du composant faible



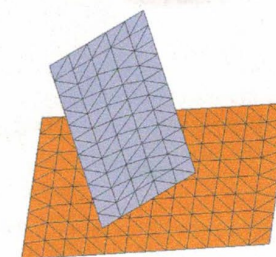
Importance du composant élevée

Si l'option **Utiliser la même taille d'élément** est sélectionnée, tous les composants sélectionnés sont maillés avec la taille d'élément spécifiée dans la fenêtre **Contrôle de maillage**.

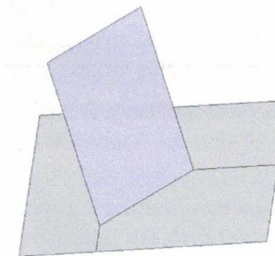
Si une géométrie surfacique doit être maillée, vous pouvez être amené à utiliser des lignes de séparation aux endroits où les surfaces se rencontrent pour garantir l'alignement des nœuds, ainsi que la compatibilité du maillage. Cependant, un maillage incompatible avec des nœuds mal alignés n'est pas non plus permis.



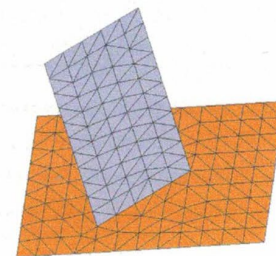
Pas de ligne de division



Maillage incompatible



Lignes de division ajoutées



Maillage compatible

Matériel nécessaire pour le maillage

Le maillage est l'étape la plus critique du processus d'obtention d'une solution. La taille maximale du maillage, c'est-à-dire la plus petite taille d'élément qui peut être utilisée, dépend de la taille de la mémoire RAM.

Plus elle est importante, meilleures seront les performances. Nous vous conseillons au minimum 2 Go pour travailler sur des modèles réels et complexes.

Simulation par éléments finis

➤ Solveurs & convergence

Solveurs dans SOLIDWORKS Simulation

Après avoir maillé le modèle, il ne nous reste plus qu'une seule étape pour obtenir une solution.

Généralement, si un modèle peut être maillé, il peut être résolu. La résolution est une étape moins cruciale que le maillage.

Cependant, plusieurs difficultés risquent de survenir. Le solveur peut détecter des problèmes liés à la définition du modèle. Par exemple, le matériau ou les chargements n'ont pas été spécifiés. Les types de difficultés rencontrées lors de la résolution dépendent évidemment du type d'analyse (statique, fréquentielle, etc.).

Le solveur peut également détecter des mouvements rigides en raison de déplacements imposés insuffisants. Vous pouvez remédier aux mouvements rigides à l'aide des options du solveur, comme **Utiliser une faible raideur pour stabiliser le modèle** ou **Utiliser la relaxation inertielle**.

Les options du solveur qui vous sont proposées dépendent du type d'analyse.

Analyse statique	Analyse fréquentielle	Analyse de flambage
Faible raideur	Faible raideur	Faible raideur
Effets dans le plan	Effets dans le plan	
Relaxation inertielle		

Le modèle maillé est présenté au solveur sous la forme de multiples équations algébriques linéaires. Ces équations peuvent être résolues à l'aide de deux catégories de méthodes : directe et itérative.

La méthode directe résout les équations à l'aide de techniques numériques exactes. La méthode itérative les résout à l'aide de techniques d'approximation pour lesquelles, dans chaque itération, une solution hypothétique est émise et les erreurs associées sont évaluées. Les itérations se poursuivent jusqu'à ce que les erreurs deviennent acceptables.

Les simulations peuvent également être résolues depuis un autre ordinateur avec SOLIDWORKS Simulation Network Manager si SOLIDWORKS Simulation Premium est installé sur les deux ordinateurs.

SOLIDWORKS Simulation présente quatre solveurs :

- Solveur Direct
- Direct de problème volumineux
- Intel Direct Sparse
- FFEPlus (itératif)

Statique

Options Méthode adaptative Effets thermiques/Ecoulement Notification Remarque

Méthode adaptative

☐ Aucune

☒ Méthode adaptative H

☐ Méthode adaptative P

Options de la méthode adaptative H

Précision souhaitée: Basse Haute 98 %

Tendance de précision: Locale (plus rapide) Globale (plus lent)

Nbre maximum de boucles 3

☐ Grossissement du maillage

Options de la méthode adaptative P

Arrêter la Énergie totale de déformation est 1 % ou moins

Mettre à jour les éléments avec une erreur d'énergie de déformation relative de 2 % ou plus

Ordre p de départ 2

Ordre p maximum 5

Nbre maximum de boucles 4

➤ Déplacements et contraintes augmente en affinant le maillage

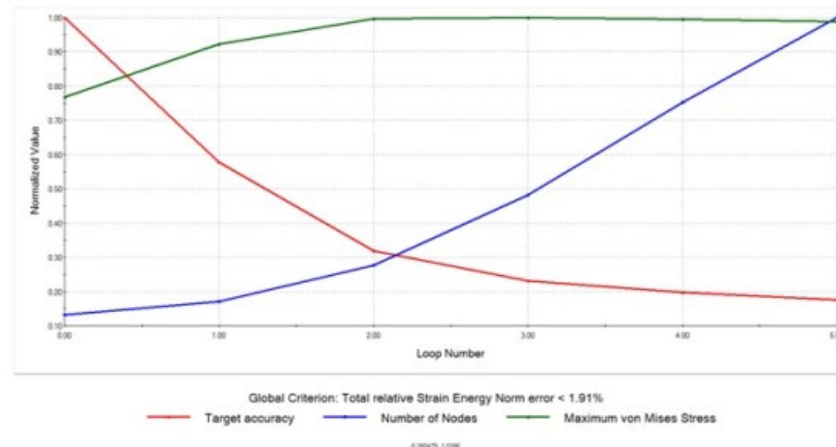
➤ Calcul des déplacements (polynomial 2^{ème} ordre)

➤ Puis des contraintes

➤ Limite itérative converge vers la solution

➤ Adaptative H (amélioration du maillage)

➤ Adaptative P (augmentation du degré polynomial



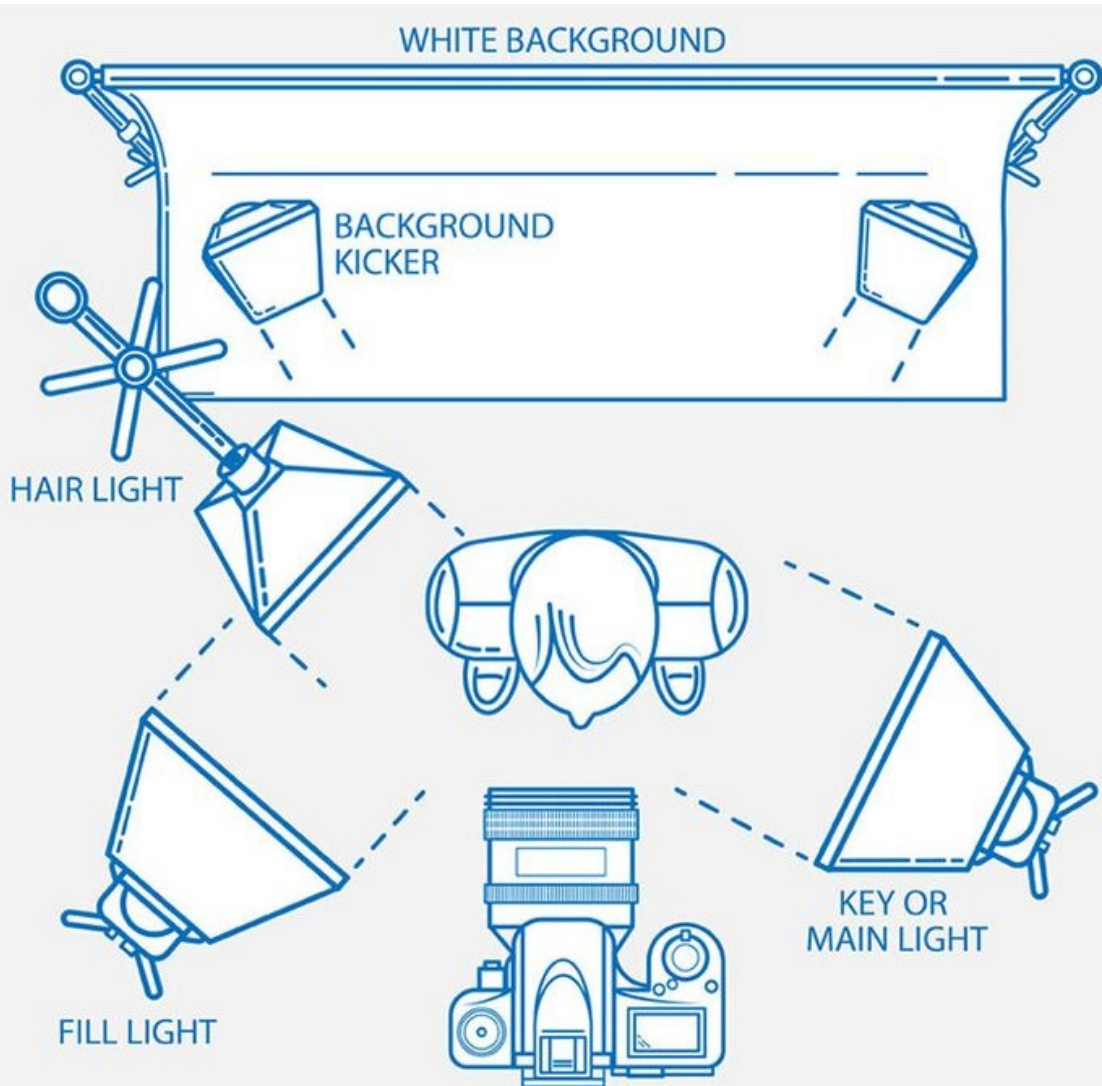
- *Cours de construction mécanique*

Rendu Photo

- Matériaux
- Éclairage
 - https://youtu.be/lhZ_w4v4rCQ?si=K5-cP53dRW0B52XH&t=749
- Scène
 - https://youtu.be/lhZ_w4v4rCQ?si=Zwl3Vc7RUB9oP3ar&t=89
- Caméra
- Blum
 - https://youtu.be/lhZ_w4v4rCQ?si=4XjeGGq5T2LUz9l0&t=2097
 - Luxology.com

Rendu

➤ Éclairage



Rendu

➤ Scène



➤ Matériaux

