

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Supérieure en Génie Électrique et Énergétique d'Oran



Département des classes préparatoires
Section technologique

INGÉNIERIE

Cours 2^{em} Année classes préparatoires
Ingénierie 1, Partie Mécanique
Partie 3 & 4

Dr. KADDOURI Djamel

2019 - 2020

INGÉNIERIE 1

Partie 3 ÉLÉMENTS STANDARD DE
CONSTRUCTION

Partie 4 PROCÉDES D'ÉLABORATION DES
PIECES

AVANT-PROPOS

Ce polycopié est destiné aux étudiants de la deuxième année des classes préparatoires. Il est élaboré conformément au programme officiel fixé par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Le contenu de ce polycopié permet à l'étudiant d'acquérir les connaissances de base de l'ingénierie mécanique. Ce qui leur permet de répondre à autant de questions qui concernent la fabrication et le fonctionnement d'un mécanisme.

Organisation de la polycopie

Ce polycopié est constitué de deux parties essentielles. La première est intitulée **Élément standard de construction**, tandis que la deuxième est intitulée **Procédés d'élaboration des pièces**.

La première partie est composée de cinq cours : Généralité, Guidage, Lubrification, Etanchéité, Transmission de puissance

Le 1er cours, j'ai lui donné le nom **Généralité**. Le contenu de ce cours permet à l'étudiant d'acquérir les connaissances relatives aux différents types de dessins, schématisation des liaisons entre pièces et organe machine.

Dans le 2em cours intitulé **Guidage**, on a représenté leur importance en mécanique. Le guidage est une action assurée par un joint cinématique dans un mécanisme. Dans le guidage, une ou plusieurs pièces permettent à un élément de se déplacer d'une certaine façon. Le guidage décide si le mouvement est une rotation ou une translation.

Le lubrifiant est un produit qui, interposé entre les deux surfaces frottantes d'un mécanisme. La fonction d'un lubrifiant est de favoriser le mouvement ou le glissement entre deux surfaces frottantes. D'une manière générale, les lubrifiants augmentent la durée de vie et améliorent le rendement d'un mécanisme. Ces informations ont été représentées dans le 3em cours **Lubrification**.

Le 4em cours de la polycopie est l'**Étanchéité**. Une enceinte est dite parfaitement étanche s'il ne peut y avoir aucune circulation de fluide et/ou de particules entre l'intérieur et l'extérieur de cette enceinte. Une étanchéité correspond donc à une interdiction de passage. La fonction de service d'une étanchéité en général, est de réaliser une frontière matérielle entre deux milieux ambiants différents. Ces deux milieux se différencient par la nature des fluides qui les composent. L'étanchéité peut être décrite en fonction des critères suivants : étanchéité statique

directe et indirecte, étanchéité dynamique directe et indirecte.

Le 5^{me} cours est consacré à la représentation de la **Transmission de puissance mécanique** et hydraulique. Une transmission est un dispositif mécanique permettant de transmettre un mouvement d'une pièce à une autre. Cet élément de la chaîne d'énergie a pour fonction l'adaptation du couple et de la vitesse entre l'organe moteur et l'organe entraîné. La transmission du mouvement est l'une des fonctions les plus courantes des éléments de la mécanique générale, c'est-à-dire des dispositifs mécaniques destinés à remplacer la main de l'homme.

La deuxième partie est composée de quatre cours : Procédés de mise en forme, Procédés d'usinage, Procédés de soudage et Les Matériaux.

Le 6^{me} cours est intitulé **Procédé de mise en forme**. Le contenu de ce cours permet à l'étudiant Saisir l'importance de ce procédé dans la fabrication des pièces, l'objectif premier de la mise en forme des métaux et les principaux procédés de mise en forme.

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces par enlèvement de la matière. Le principe de l'usinage est réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement de la matière à froid et sans déformation, de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues.. L'opérateur utilise des machines dites machines-outils pour réaliser l'usinage d'une pièce. Cette phase fera l'objet du 7^{me} cours intitulé **Procédés d'usinage**.

Le 8^{me} cours est intitulé **Procédés de soudage**. Parmi les procédés d'assemblages, la soudage occupe une place prépondérante dans la construction des différentes structures. Car il permet d'adapter au mieux les formes de construction. La clé des problèmes qui se posent lors d'une opération de soudage relève du métier du soudeur ou du constructeur soudeur dont la démarche doit inclure, outre l'opération de soudage, les problèmes se posant en amont et en aval de celle-ci.

Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée. La science des matériaux émerge comme un ensemble cohérent, elle est couplée au génie des matériaux qui a pour objectif la réalisation de matériaux aux propriétés déterminées. Le 9^{em} cours est intitulé **Matériaux**.

TABLE DES MATIERES

ÉLÉMENT STANDARD DE CONSTRUCTION

Généralité	1
Guidage	10
Lubrification	21
Étanchéité	33
Transmission de puissance	44

PROCÉDÉS D'ÉLABORATION DES PIÈCES

Procédés de mise en forme	56
Procèdes d'usinage	65
Procédés de soudage	77
Les métaux	96

Partie 1

ÉLÉMENTS STANDARD DE CONSTRUCTION

1- GÉNÉRALITÉ

1. Dessin Technique

Pour pouvoir réparer ou fabriquer un objet, il faut d'abord le comprendre. Quelles sont les pièces du mécanisme ? Comment sont-elles assemblées ? Où se situent-elles dans le mécanisme ? Autant de questions auxquelles il faut répondre pour comprendre un mécanisme. Un moyen simple d'y parvenir est le dessin technique, souvent appelé plan.

Le dessin technique est donc un moyen d'expression universel à tout technicien. Il suit des règles, des normes précises et rigoureuses dans un souci d'efficacité. Tout professionnel qui utilise ou agit sur des mécanismes (machines, engins, automobiles...) doit pouvoir décoder un dessin technique, sans quoi il serait vite perdu et inefficace. Savoir décoder et utiliser un dessin technique nécessite de la rigueur et de l'organisation.

Il existe plusieurs types de dessins techniques, tous complémentaires. Prenons l'exemple d'un batteur pour les œufs et étudions l'ensemble des dessins qu'il est possible d'établir (Fig. 1.1).



Fig. 1.1 batteur pour les œufs

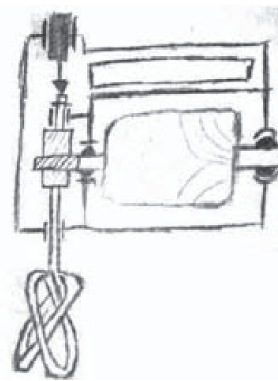


Fig. 1.2 Le croquis

1.1 Croquis

C'est un dessin (ou une esquisse) établi, en majeure partie à main levée sans respecter de règles précises (Fig. 1.2). Il permet de visualiser une idée, un avant-projet.

1.2 Dessin de définition

Ce dessin est le complémentaire du précédent (Fig. 1.3). Il représente une pièce extraite du dessin d'ensemble. Il doit définir la pièce intégralement de la manière la plus complète possible. Ce plan servira pour la fabrication de la pièce.

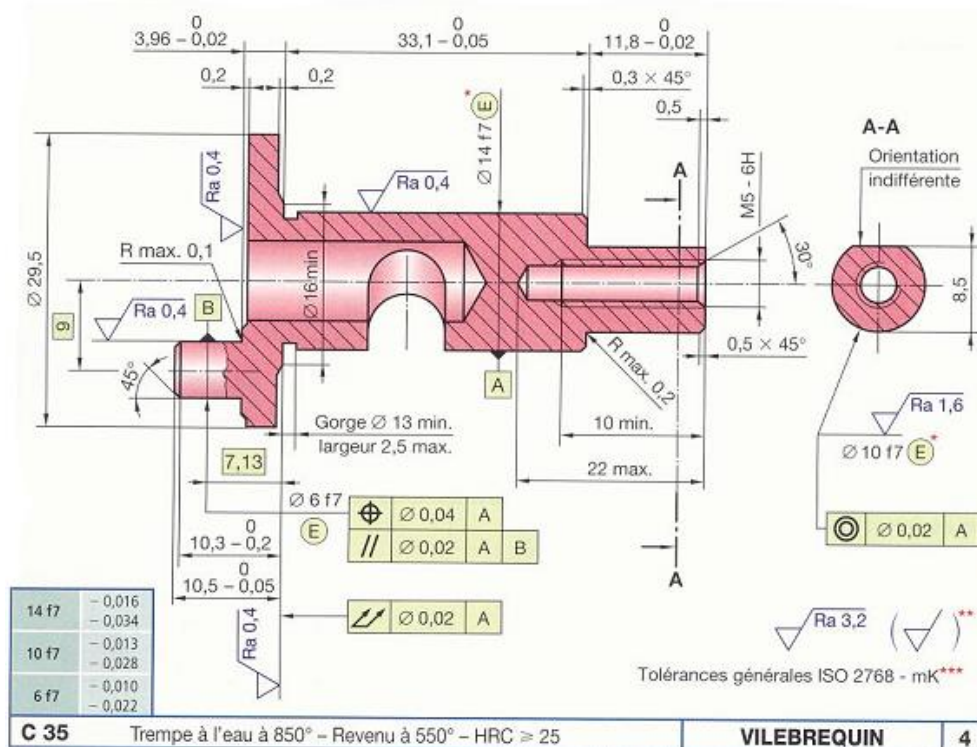


Fig. 1.3 Dessin de définition

1.3 Dessin d'ensemble

C'est le « plan » du mécanisme, plus ou moins détaillé, à une certaine échelle. Le mécanisme est représenté assemblé, montrant tous groupes et parties d'un produit complètement assemblé (Fig. 1.4).

1.3.1 Cartouche

Le cartouche est un cadre regroupant de nombreuses informations relatives au dessin : c'est la fiche d'identité du dessin (Fig. 1.4). Il contient les renseignements suivants : le titre de l'objet représenté, l'échelle, le format, le nom de l'entreprise, le nom du dessinateur, la date et le symbole ISO de disposition des vues. La forme du cartouche varie d'une entreprise à l'autre. La position du cartouche sur le dessin est souvent en bas et à droite.

1.3.2 Nomenclature

La nomenclature est une liste qui regroupe tous les éléments (pièces) du mécanisme dessiné. Cette liste est généralement sous forme de tableau composé de cinq colonnes (Fig. 1.4) :

- Dans la colonne Repère (Rep.), on trouve un chiffre différent attribué à chaque pièce différente. Cela permet d'identifier rapidement un élément sur le dessin ;

- Dans la colonne Nombre (Nbre), un chiffre correspondant au nombre de pièces du même repère est noté ; cela permet de connaître le nombre total de chaque pièce identique ;
- Dans la colonne Désignation, chaque pièce est nommée, souvent en relation avec sa fonction;
- Dans la colonne Matière, la désignation normalisée de la matière de la pièce est renseignée ;
- Dans la colonne Observations, se trouve toute information complémentaire jugée utile pour le lecteur.

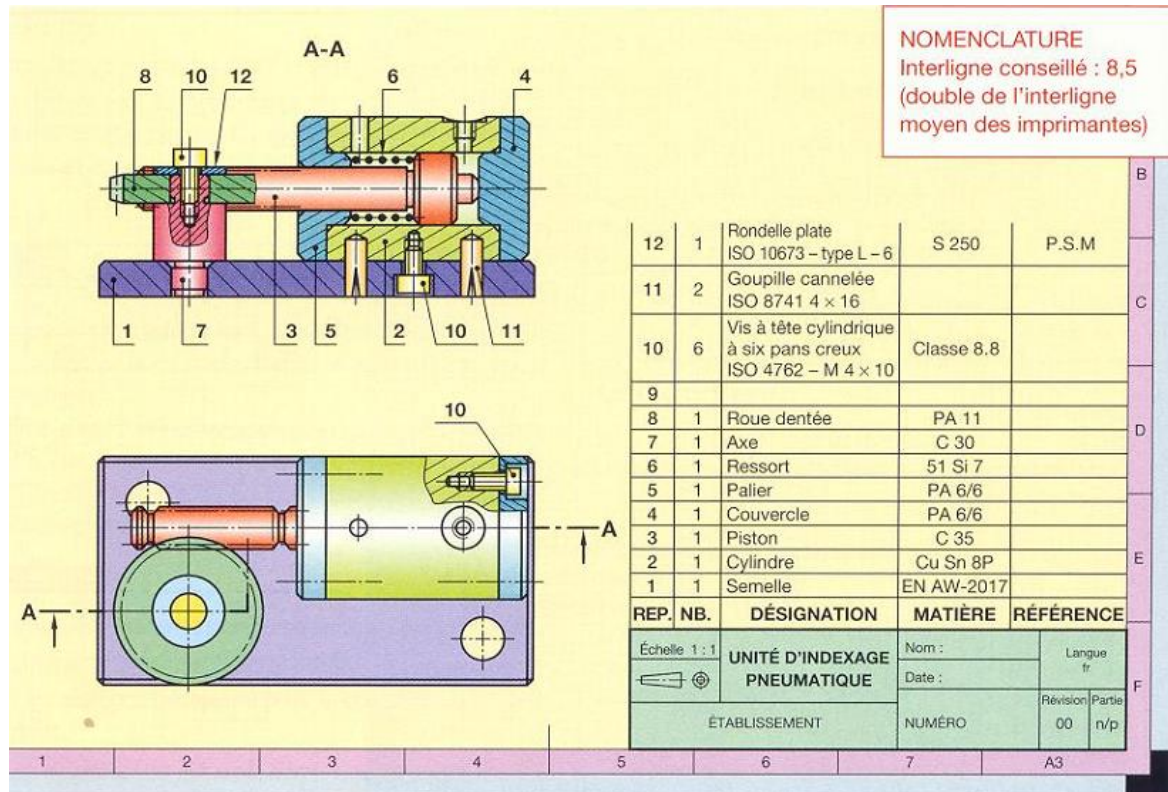


Fig. 1.4 Dessin d'ensemble, Cartouche, Nomenclature.

1.4 Schéma

C'est un dessin tracé à partir d'une famille de symboles (Fig. 1.5). Il permet de représenter de manière simple un mécanisme, une installation (électrique, hydraulique, mécanique ou pneumatique). Le schéma permet surtout de décrire facilement le fonctionnement plus ou moins complexe d'un système.

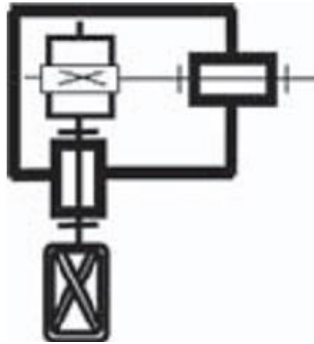


Fig. 1.5 Schéma

2. Schéma Cinématique

Les mécanismes réels sont souvent complexes (Fig. 1.6). De nombreuses pièces participent à la réalisation technologique de ces mécanismes, ce qui peut rendre difficile la compréhension du fonctionnement du mécanisme.

Le schéma cinématique est une représentation simplifiée et codée du mécanisme (Fig. 1.7), qui ne tient compte ni des formes, ni des dimensions du mécanisme, et qui obéit à une norme.

Il traduit de façon simple le fonctionnement cinématique du mécanisme et est utilisé en:

- Analyse pour appréhender rapidement le fonctionnement.
- Conception pour exprimer rapidement la solution technique liée à une fonction de service.

Pour établir un schéma cinématique, on considère :

- Que les surfaces en contact sont géométriquement exactes et indéformables ;
- Que les mouvements autorisés sont théoriquement sans jeu.

Les schémas cinématiques montrent les possibilités de mouvement relatifs entre des solides cinématiquement liés. Ces schémas sont réalisés à l'aide de symboles graphiques qui modélisent les liaisons cinématiques entre les solides.

2.1 Liaison Cinématique

C'est un modèle cinématique du mécanisme (c'est à dire une interprétation en termes de mouvements relatifs possibles entre pièces). On dira que deux ensembles sont en liaison s'ils restent en contact par l'intermédiaire de surfaces au cours de l'utilisation du mécanisme. Nous verrons cependant que la connaissance des surfaces de contact n'est pas toujours suffisante pour connaître les possibilités de mouvement, et donc pour définir la liaison mise en jeu.

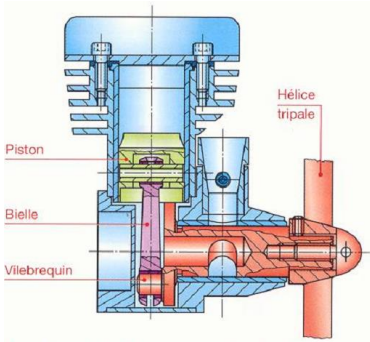


Fig. 1.6 Micromoteur 2 temps

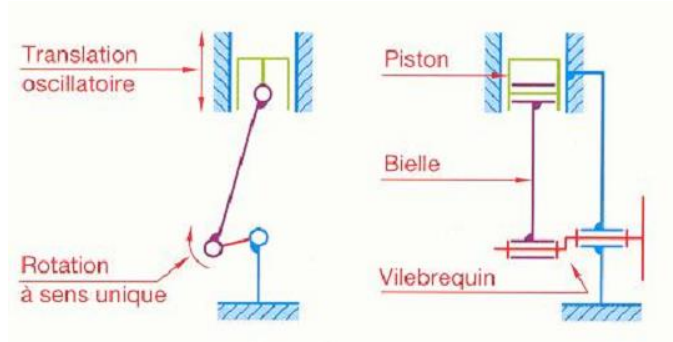


Fig. 1.7 Schémas cinématique

2.2 Degrés de Liberté

Une liaison cinématique entre deux solides est caractérisée par les degrés de liberté (DDL) qu'elle autorise. Le nombre de degrés de liberté entre deux solides est égale au nombre de mouvement relatifs indépendants existant entre ces deux solides. A un degré de liberté correspond la possibilité d'un mouvement de rotation ou de translation entre deux solides. Un solide qui n'a aucune liaison possède six degrés de liberté (Fig. 1.8) :

- Trois degrés de liberté en translation, T_x, T_y et T_z ;
- Trois degrés de liberté en rotation, R_x, R_y et R_z .

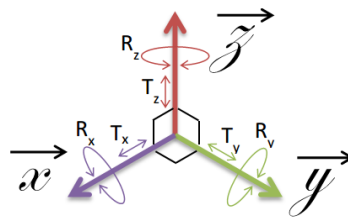


Fig. 1.8 Six degrés de liberté

2.3 Notion de solide

Dans les corps solides, on fera la différence entre un solide réel et un solide parfait:

2.3.1 Solide réel

Le solide réel est un solide avec toutes ces caractéristiques réelles (géométriques, physiques, mécaniques, ...).

2.3.2 Solide parfait

Le solide parfait est un modèle théorique du solide réel. Ce modèle théorique est indéformable quels que soient les efforts qui lui sont appliqués et il a une géométrie parfaite. C'est le solide théorique que l'on considère dans la plupart des études mécaniques. En pratique, on considérera : soit des solides parfaits, soit des solides déformables suivants une loi connue (Ressort,...).

2.4 Étude des Liaisons


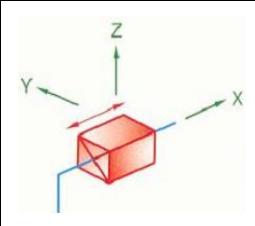
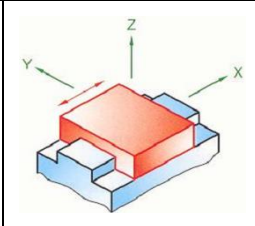
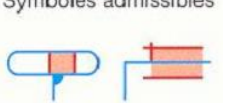

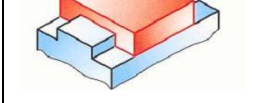
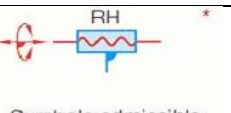
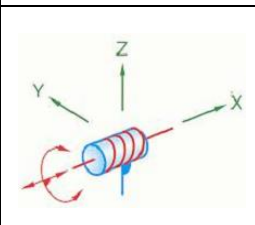
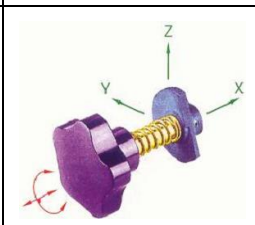
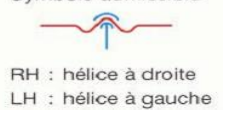


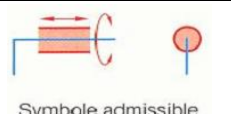
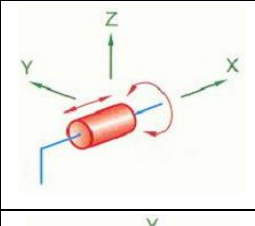
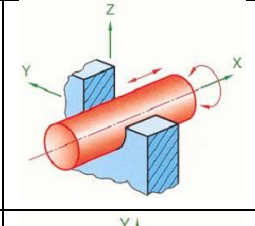
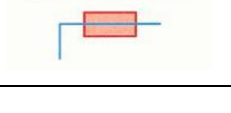
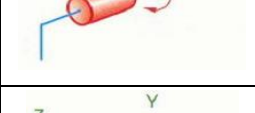
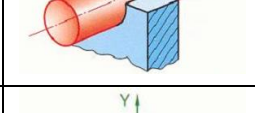
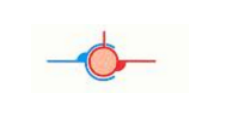
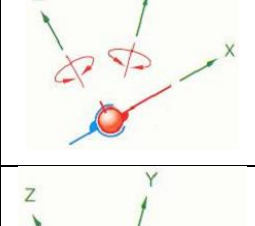
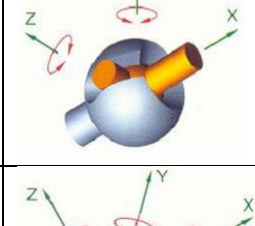
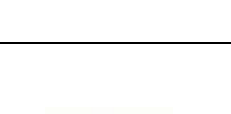
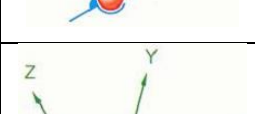
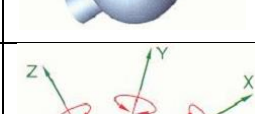
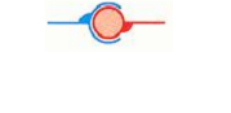
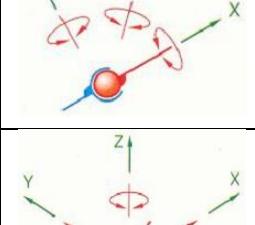
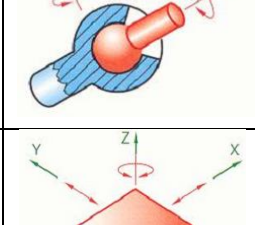
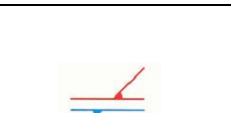

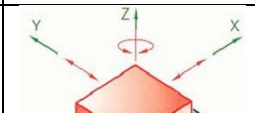
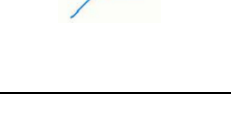
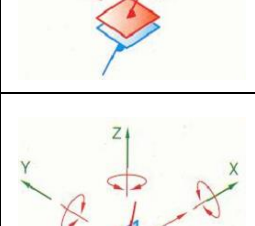
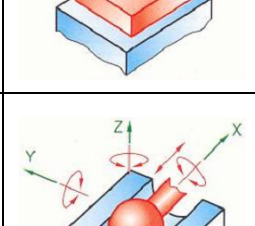
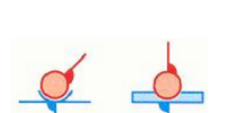
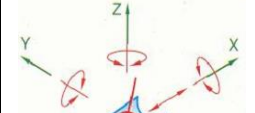
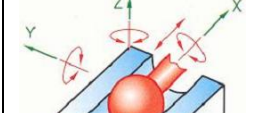

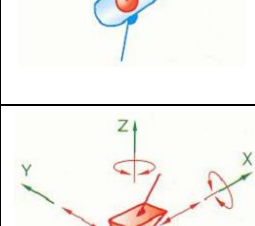
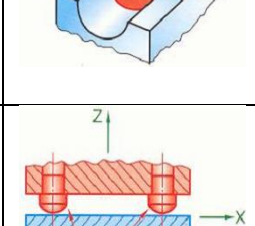
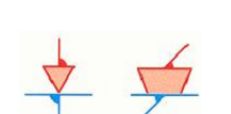
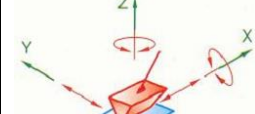
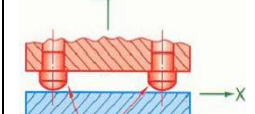

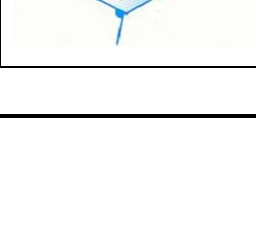
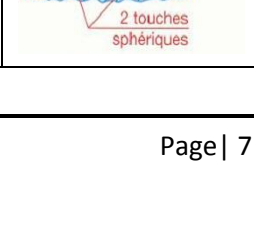


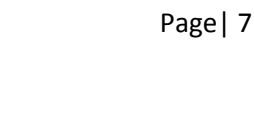
En construction mécanique pour étudier les mouvements d'un mécanisme, on construit des modèles qui mettent en évidence les relations cinématiques entre ses constituants. C'est pourquoi il est intéressant de modéliser les liaisons mécaniques, c'est-à-dire les possibilités de mouvements compatibles avec les surfaces de contact. La modélisation est faite sous les hypothèses suivantes :

- Solides indéformables en mouvement relatif ;
- Surfaces géométriquement parfaites et positionnement géométrique relatif parfait des surfaces ;
- Contact sans jeu et sans adhérence pour les pièces en mouvement relatif ;
- Liaisons considérées permanentes.

2.5 Les Liaisons Mécaniques

Une liaison entre deux solides existe lorsqu'il y a contact entre les surfaces de ces deux solides. L'analyse des formes des surfaces en contact permettent de déterminer quels sont les degrés de liberté supprimés. Pour identifier la liaison mécanique équivalente entre deux pièces d'un mécanisme, il faut dans un premier temps identifier et caractériser les différents contacts entre ces pièces pour en déduire les degrés de liberté autorisés. Ensuite, avec les degrés de liberté autorisés par les contacts, il est facile d'en déduire la liaison mécanique équivalente. Le tableau 1.1 représente les différentes liaisons mécaniques équivalentes.

Nom de la liaison	Degré de liberté (DDL)	Mouvements relatifs	Symbole		Exemple
			Représentation plan	Perspective	
Encastrement ou fixe	0	0 Translation			
		0 Rotation			
Pivot	1	0 Translation			
		1 Rotation			

Glissière	1	1	Translatio n	 Symboles admissibles		
		0	Rotation			
Hélicoïdale	2	1	Translatio n	 Symbole admissible		
		1	Rotation	 RH : hélice à droite LH : hélice à gauche		
Pivot- glissant	2	1	Translatio n	 Symbole admissible		
		1	Rotation			
Sphérique à doigt	2	0	Translatio n			
		2	Rotation			
Rotule ou Sphérique	3	0	Translatio n			
		3	Rotation			
Appui plan	3	2	Translatio n			
		1	Rotation			
Sphère- Cylindre Ou Linière annulaire	4	1	Translatio n			
		3	Rotation			
Rectiligne	4	2	Translatio n			
		2	Rotation			


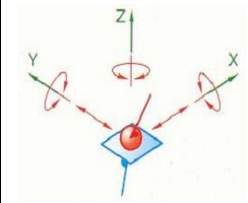
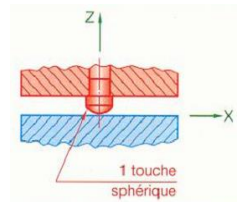
Sphère-plan Ou ponctuelle	5	2	Translatio n			
		3	Rotation			

Tableau 1.1 Les différentes liaisons mécaniques.

3. Les Fonctions Mécaniques Élémentaires

Les systèmes techniques ont plusieurs composantes. Chaque composante dans un système joue un rôle important dans la fonction globale du système. Le rôle de chaque composante ou d'un groupe de composantes dans un système technique est appelé la fonction mécanique. Les **composantes** est les parties dans un objet technique qui ont chacune une fonction mécanique. Un **Organe** est un élément d'un système ayant une fonction précise. Les quatre fonctions mécaniques élémentaires sont :

- **Liaison** : Est assurée par un organe d'assemblage qui relie deux parties ou plus dans un objet technique.
- **Guidage** : Une ou plusieurs composantes d'un objet technique qui contrôle le mouvement d'au moins une partie de l'objet.
- **Lubrification** : Il s'agit de la fonction d'une substance qui permet de réduire le frottement.
- **Étanchéité** : Il s'agit de la fonction d'un organe qui empêche un fluide (liquide ou gazeux) de s'échapper de son contenant.

4. Liaisons

Une liaison se connecte, se joint, ou relie deux composantes ou plus dans un objet technique. (Exemples: clou, écrou, vis, colle, boulon) (Fig. 1.9).



Fig. 1.9 Les éléments qui assure une liaison

4.1 Caractéristiques des liaisons

Une liaison a 4 caractéristiques : Directe ou indirecte, rigide ou élastique, démontable ou indémontable, complète ou partielle.

4.1.1 Directe

Deux parties peuvent se tenir ensemble sans un intermédiaire. Doivent avoir des formes complémentaires (Fig. 1.10).



Fig. 1.10 Liaison directe

4.1.2 Indirecte

Deux parties se tiennent ensemble avec un intermédiaire (Fig. 1.11).

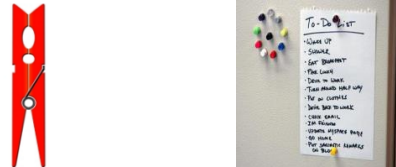


Fig. 1.11 Liaison indirecte

4.1.3 Rigide

Ne permet aucun changement de position des éléments assemblés (Fig. 1.12).



Fig. 1.12 Liaison rigide

4.1.4 Élastique

Les pièces peuvent changer de position lors de leur assemblage (Fig. 1.13).



Fig. 1.13 Liaison élastique

4.1.5 Démontable

Les pièces peuvent être séparées sans dommage (Fig. 1.14).



Fig. 1.14 Liaison démontable

4.1.6 Indémontable

La séparation des pièces causera la détérioration (Fig. 1.15).



Fig. 1.15 Liaison indémontable

4.1.7 Complète

Il n'y a aucun mouvement entre les pièces liées (Fig. 1.16).

4.1.8 Partielle

Au moins une pièce est capable de bouger dans certaines directions sans que l'autre ne se déplace (Fig. 1.17).



Fig. 1.16 Liaison complète



Fig. 1.17 Liaison partielle

2- GUIDAGE

1. Définition

En mécanique, le **guidage** est une action assurée par un joint cinématique dans un mécanisme. Dans le guidage, une ou plusieurs pièces permettent à un élément de se déplacer d'une certaine façon. Le guidage décide si le mouvement est une translation ou une rotation.

2. Guidage en translation

Le guidage en translation est la solution constructive qui réalise une liaison glissière entre deux pièces ou ensembles de pièces. Le seul mouvement relatif possible entre les deux pièces ou ensembles de pièces est une translation rectiligne.

2.1 Fonctions d'un guidage en translation

Le guidage en translation de deux pièces d'un mécanisme doit assurer les fonctions suivantes:

- positionner les deux pièces entre elles ;
- permettre un mouvement relatif de translation rectiligne ;
- transmettre et supporter les efforts ;
- résister au milieu environnant ;
- être d'un encombrement minimal et assurer un fonctionnement silencieux.

Le choix d'une solution constructive associée à un guidage en translation se fonde sur les indicateurs de qualité suivants :

- précision du guidage ;
- vitesse de déplacement maximale ;
- intensité des actions mécaniques transmissibles ;
- fiabilité, maintenance ;
- encombrement ;
- coût.

2.2 Solutions constructives d'un guidage en translation

Un guidage en translation peut être réalisé de plusieurs manières. Ces solutions peuvent être classées en fonction des surfaces en contact entre les pièces :

- Contacts plans ;
- Contacts cylindriques ;
- Contacts linéaires ;
- Contacts ponctuels.

Ces contacts peuvent être aussi classés en deux familles distinctes :

- Contact direct ;
- Contact indirect.

2.3 Guidage par contact direct

Dans ce cas, les pièces de la liaison sont directement en contact. Le contact varie en fonction de la forme des pièces.

2.3.1 Guidage par association de deux pièces cylindriques

L'assemblage de deux pièces cylindriques donne une liaison pivot glissant. Il faut donc annuler la rotation pour obtenir une liaison glissière. Deux exemples sont représentés sur les figures 2.1 et 2.2. Le mouvement nécessite un jeu entre les deux pièces cylindriques qui ne doit être ni trop important ni trop faible. Il en est de même pour la longueur du guidage.

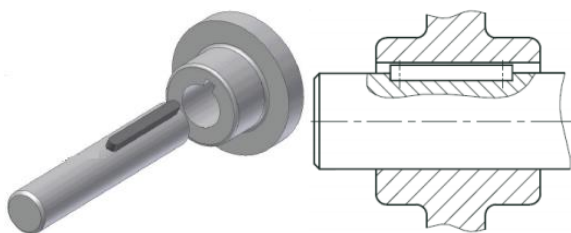


Fig. 2.1 Clavetage libre

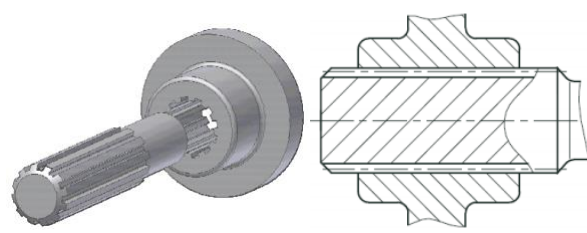


Fig. 2.2 Arbre cannelé

2.3.2 Guidage par deux pièces cylindriques

Sur la figure 2.3, la glissière 1 est composée de deux colonnes cylindriques, le coulisseau 2 possède deux alésages. Pour un bon fonctionnement de ce guidage, il est nécessaire que l'entraxe e soit le même sur la pièce 1 et sur la pièce 2 et que les deux colonnes cylindriques soient parallèles.

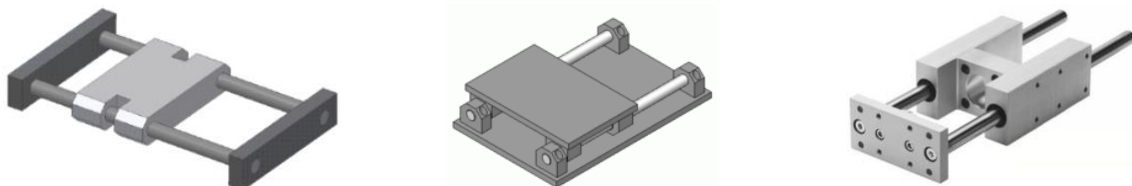


Fig. 2.3 Glissière par colonnes cylindriques

2.3.3 Guidage par surfaces planes

La glissière et le coulisseau possèdent des formes complémentaires. Les surfaces de contact planes sont prépondérantes. La géométrie des surfaces de contact n'est pas forcément rectangulaire, elle peut être en queue d'aronde (Fig. 2.4).



Fig. 2.4 Guidage par surfaces planes

2.4 Guidage par contact indirect

Il existe une grande variété d'éléments roulants standards permettant de réaliser une liaison glissière. Le frottement est réduit et les efforts sont importants avec ce type de guidage. Ces éléments admettent des vitesses importantes, un bon rendement et une grande précision.

2.4.1 Guidage par douilles à billes

Les billes circulent dans des cages tubulaires, de forme oblongue, ce qui permet des courses illimitées (Fig. 2.5). Il existe plusieurs sortes de douilles à billes (fendue, ouverte...).

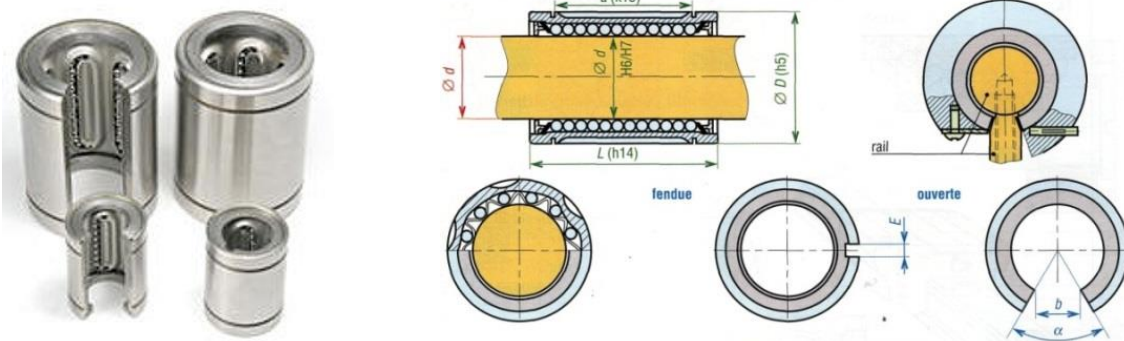


Fig. 2.5 Guidage par douilles à billes

2.4.2 Guidage par rails, patins, roues et galets

Les éléments roulants (pièces interposées) sont des galets, des roues ou des patins (Fig. 2.6).

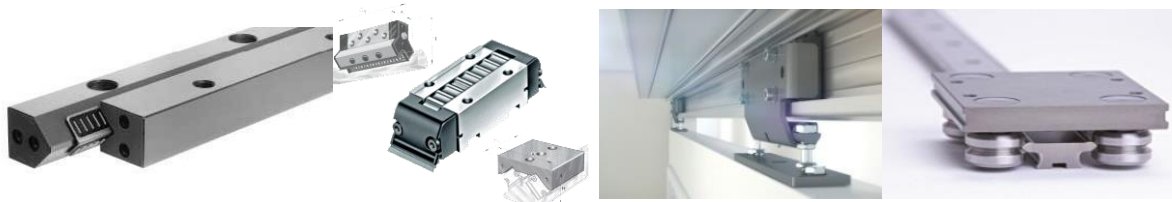


Fig. 2.6 Guidage par rails, patins, roues et galets

Deux types de montage existent, selon les actions mécaniques auxquelles est soumis le guidage.

2.4.2.1 Guidage maintenu

Le guidage est dit maintenu lorsqu'il peut être soumis à des couples ou des forces agissant suivant des directions quelconques sans se désassembler (Fig. 2.7). Ce guidage peut être utilisé dans n'importe quelle position : verticale, horizontale...

On peut donner comme exemples une machine à mesurer tridimensionnelle et une colonne de mesure en métrologie. La fonction Guider en translation doit être rigoureusement précise dans ce cas pour mesurer correctement.

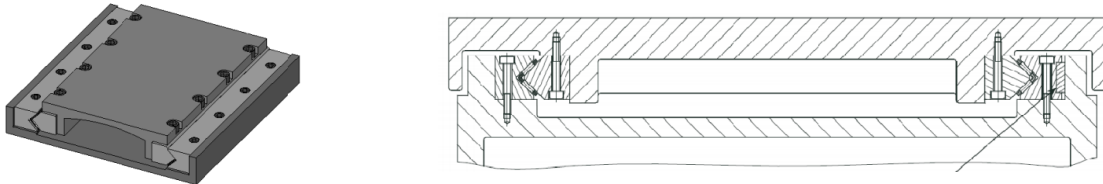


Fig. 2.7 Guidage maintenu

2.4.2.2 Guidage non maintenu

Le guidage est dit non maintenu lorsqu'il ne peut être soumis qu'à des actions de direction perpendiculaire à la surface de contact (Fig. 2.8). Ce guidage est surtout utilisé en position horizontale.



Fig. 2.8 Guidage non maintenu

3. Guidage en rotation

Un mouvement relatif de rotation entre deux parties mécaniques se révèle nécessaire dans de nombreux systèmes mécaniques. On utilise couramment les termes arbre et alésage pour désigner les deux parties en rotation relative. Pour l'alternateur (figure 1.9), la fonction Guider le rotor (arbre) par rapport au stator (alésage) est très importante. Il s'agit de trouver les éléments adéquats permettant de réaliser cette fonction.

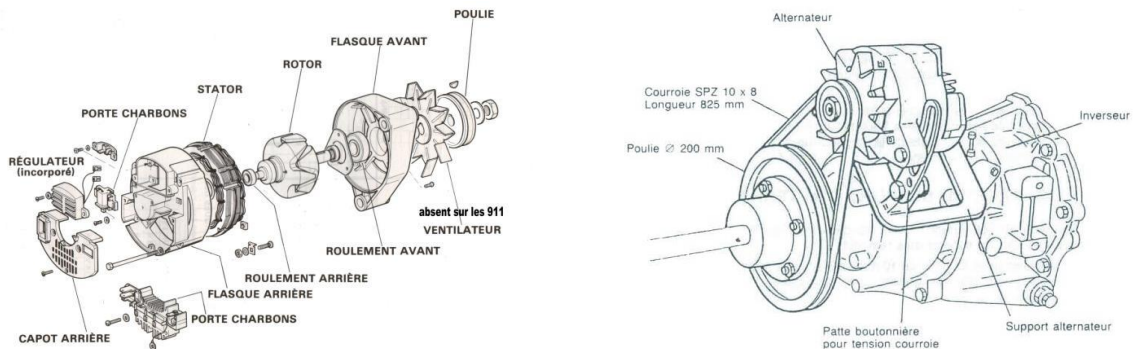


Fig. 1.9 Alternateur.

La solution constructive qui réalise la fonction est la liaison pivot (Fig. 2.10)



Fig. 2.10 Représentation de la liaison pivot.

3.1. Expression fonctionnelle du besoin

Un guidage en rotation entre deux pièces doit assurer les fonctions suivantes :

- positionner les deux pièces et autoriser une rotation entre elles autour d'un axe ;
- transmettre les efforts ;
- résister et s'adapter au milieu environnant ;
- être d'un encombrement minimal ;
- assurer un fonctionnement silencieux.

Le choix d'une solution constructive associée à un guidage en rotation se fonde sur les indicateurs de qualité suivants :

- degré de précision et encombrement ;
- puissance transmissible et température de fonctionnement ;
- rendement mécanique, durée de vie et fiabilité ;
- entretien ;
- coût.

3.2. Les différents types de guidages en rotation :

- guidage en rotation par contact direct entre surfaces ;
- guidage en rotation par interposition de bagues de frottement ;
- guidage en rotation par interposition d'éléments roulants.

3.2.1. Guidage en rotation par contact direct

3.2.1.1. Principe

Le guidage en rotation par contact direct peut être obtenu à partir du contact entre des surfaces cylindriques complémentaires et de deux arrêts qui suppriment le degré liberté en translation suivant l'axe des cylindres.

Il existe deux distributions principales de la géométrie du contact : l'une dite en porte-à faux (Fig. 2.11a) et l'autre appelée chape (Fig. 2.11b).

Le guidage en rotation peut également être obtenu à partir du contact direct entre deux surfaces coniques complémentaires d'angle d'inclinaison suffisant pour éviter le coincement.

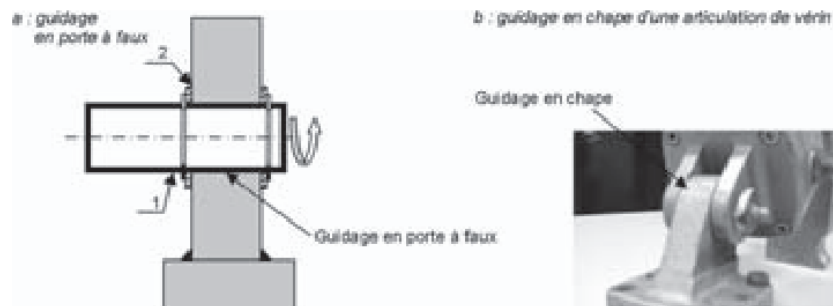


Fig. 1.11 Guidage en porte-à-faux et guidage en chape d'une articulation de vérin (Festo)

3.2.1.2. Avantages et inconvénients

D'un coût peu élevé, le guidage par contact direct entre surfaces a pour conséquence des résistances passives importantes qui limitent ses possibilités d'utilisation à de faibles vitesses et à des efforts transmissibles modérés. Dans le cas contraire, un échauffement important se produirait. La détermination des caractéristiques d'un guidage par contact direct entre surfaces s'appuie sur :

- la pression maximale admissible ;
- le comportement thermique ;
- la durée de vie souhaitée.

3.2.2. Guidage en rotation obtenu par contact indirect

L'interposition de bagues de frottement entre les pièces qui font l'objet d'un guidage en rotation permet d'atteindre des performances bien supérieures à celles obtenues avec un contact direct entre surfaces :

- réduction du coefficient de frottement ;
- augmentation de la durée de vie, fonctionnement silencieux ;
- report de l'usure sur les bagues.

Les principaux types de bagues de frottement utilisées pour assurer un guidage en rotation peuvent être classés en deux catégories : les coussinets et les bagues en tôle roulée.

Outre ces deux solutions, on peut placer dans la catégorie « bagues de frottement » les articulations sphériques qui s'utilisent par paire.

3.2.2.1 Coussinets frittés

Un coussinet est une bague, avec ou sans collerette, monté serré dans l'alésage et glissant dans l'arbre (Fig. 2.12).

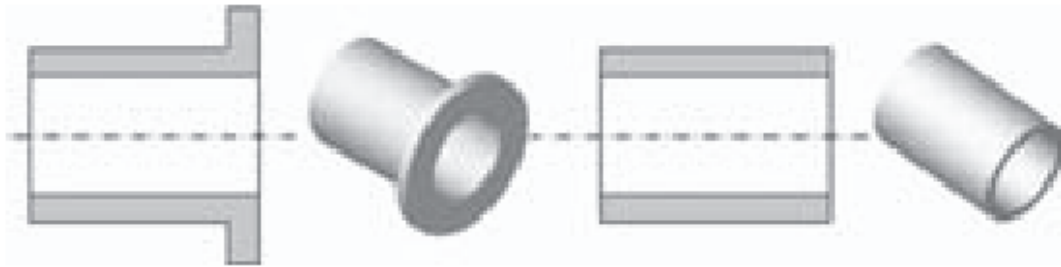


Fig. 1.12 Coussinets.

Les coussinets sont réalisés à partir de différents types de matériaux : bronze, matières plastiques (Nylon, Teflon), etc. Ils peuvent être utilisés à sec ou lubrifiés.

Les coussinets autolubrifiants sont obtenus à partir d'un métal fritté (poudre comprimée et chauffée en atmosphère contrôlée) dont la porosité varie entre 10 % et 30 % du volume du coussinet.

Ils sont imprégnés d'huile jusqu'à saturation, ou chargés de lubrifiant solide. Sous l'effet de la rotation de l'arbre et de l'élévation de la température (Fig. 2.13), l'huile est aspirée et assure une excellente lubrification. À l'arrêt de l'arbre, du fait de la porosité du coussinet, le lubrifiant reprend sa place.

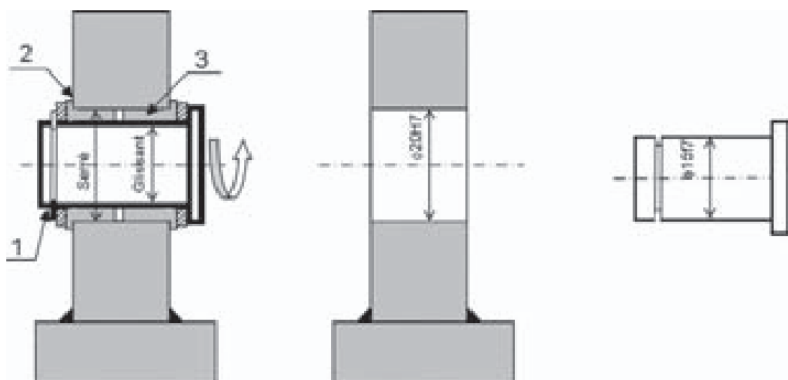


Fig. 1.13 Coussinets autolubrifiants.



Fig. 1.14 Bague en tôle.

3.2.2.2 Bagues en tôle roulée

Elles sont constituées d'une tôle roulée recouverte d'une couche de bronze fritté et d'une couche de résine PTFE imprégnée de lubrifiant solide (graphite ou plomb, etc.) (Fig. 2.14). Le coefficient de frottement entre la résine PTFE et l'acier se situe vers 0,03 suivant les conditions de fonctionnement.

3.2.2.3 Articulations Sphériques

Les articulations sphériques sont constituées de deux bagues dont l'assemblage résulte du contact entre deux surfaces sphériques complémentaires. On les utilise pour réaliser un guidage en rotation admettant des décalages angulaires et un défaut d'alignement. Sur le moteur du presse-agrumes (Fig. 2.15), les articulations sphériques sont clipsées sur les paliers 22. Le palier 22 réalise le positionnement axial de l'arbre 20 par rapport au stator du moteur.

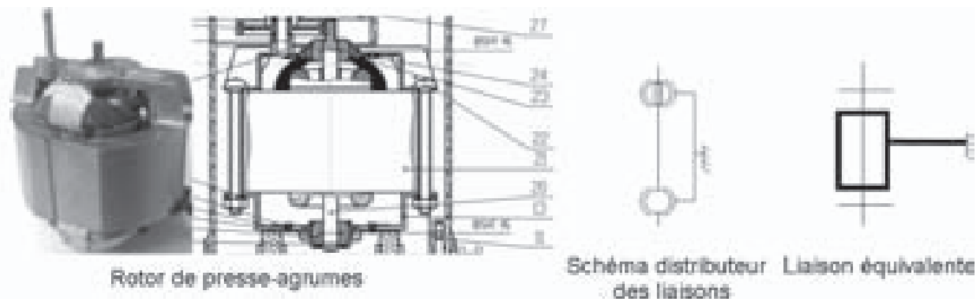


Fig. 2.15 Articulation sphériques sur presse-agrumes (conservatoire Seb, Lyon).

3.2.2.4 Guidage en rotation réalisé par roulement

Un roulement est constitué d'éléments (billes, rouleaux ou aiguilles) interposés entre une bague intérieure ajustée sur l'arbre à guider et une bague extérieure qui positionne le roulement dans l'alésage. Une cage d'espacement maintient les éléments roulants à intervalles égaux si nécessaire (Fig. 2.16 a, b et c). Le frottement de roulement ou résistance au roulement est réduit par rapport au frottement de glissement.

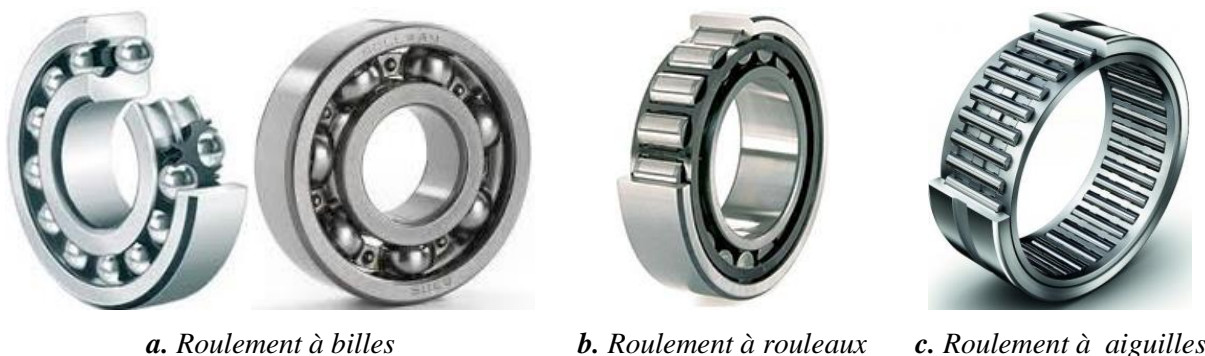


Fig. 2.16 Roulement

3.2.2.5 Butées à billes ou à aiguilles

A. Butées à billes

Peu utilisées, elles n'acceptent que des charges axiales pures. Ces butées (Fig. 2.17) existent dans des modèles à simple effet acceptant des charges axiales dans un seul sens et dans des modèles à double effet qui acceptent des charges axiales dans les deux sens. Les butées à billes doivent être associées à d'autres types de roulements qui assurent le centrage de l'arbre par rapport au logement.

B. Butées à aiguilles

Elles peuvent supporter de fortes charges axiales et sont peu sensibles aux chocs. Les montages obtenus sont très rigides et d'un encombrement réduit (Fig. 2.18).



Fig. 2.17 Butées à billes.



Fig. 2.18 Butées à aiguilles.

3.3 Liaison pivot obtenue par interposition d'un film d'huile

3.3.1 Paliers hydrodynamiques

Les paliers lisses hydrodynamiques (Fig. 2.19) sont constitués de coussinets qui comportent une rainure permettant l'arrivée d'un lubrifiant sous pression. De l'huile sous pression est envoyée dans une rainure dès que l'arbre a atteint une vitesse de rotation assez grande. Un film d'huile est alors créé : il n'y a plus de contact métal sur métal entre l'arbre et le coussinet. Ce film d'huile, dont l'épaisseur varie de 0,002 à 0,020 mm, sépare les pièces en mouvement.

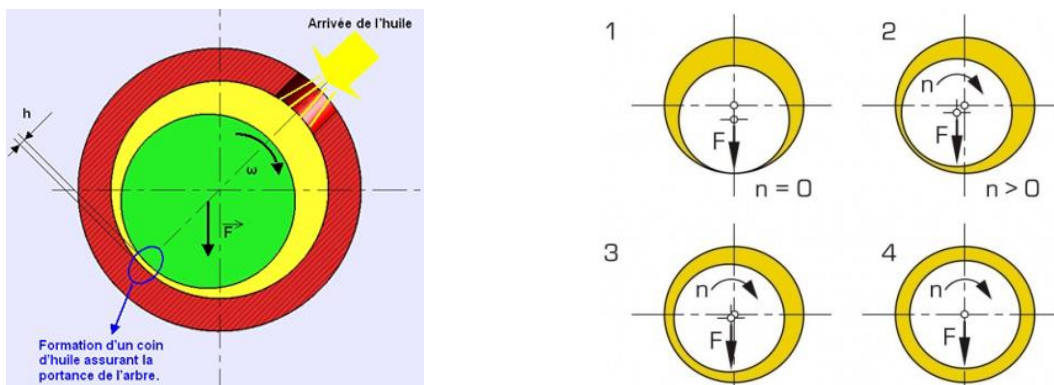


Fig. 2.19 Palier hydrodynamique.

La formation du film d'huile dépend :

- des conditions de fonctionnement (vitesse et pression) ;
- du lubrifiant (viscosité) ;
- de l'état des surfaces (rugosité $R_{max} < 0,25 h_{min}$ avec h_{min} la hauteur du film d'huile).

En fonctionnement normal (régime hydrodynamique), il n'y a pas de contact métal sur métal entre l'arbre et le coussinet, sauf au démarrage.

Le palier hydrodynamique, tout en acceptant des charges plus importantes, permet une vitesse et une durée de vie supérieures aux autres types de solutions. L'arrivée du lubrifiant doit être placée dans la zone de dépression ou de pression nulle.

Dans ce type de palier hydrodynamique, le débit d'huile doit être suffisant pour compenser les fuites latérales.

Le coefficient de frottement obtenu f est faible :

$$0,002 < f < 0,01$$

La longueur L du coussinet est telle que :

$$0,25D < L < 0,75D$$

Applications types : moteurs à combustion interne (paliers de vilebrequin et de bielles), paliers de turbines.

3.3.2 Paliers hydrostatiques

Leur principe de fonctionnement est différent de celui des paliers hydrodynamiques, il n'y a pas de formation de coin d'huile, la pression est fournie par une pompe qui envoie le fluide sous pression dans quatre chambres munies d'un étranglement constant (Fig. 2.20). L'huile s'échappe par l'intermédiaire des canalisations de retour au réservoir. L'arbre est sustenté au centre du mécanisme par la pression du fluide.

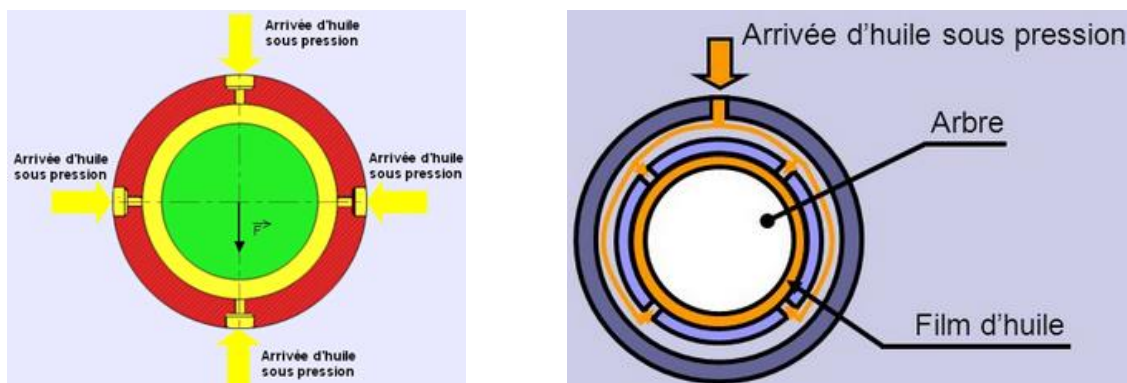


Fig. 1.18 Palier hydrostatiques.

Tableau comparatif des différentes familles de guidages en rotation

Type de guidage	Avantages	Limites d'utilisation	Applications
Contact direct	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût faible ▪ Réalisation simple 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vitesse maximale faible ▪ Frottement important ▪ Efforts transmissibles modérés 	
Paliers lisses	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Encombrement radial réduit ▪ Fonctionnement sans lubrification à faible vitesse ▪ Utilisation possible en milieu agressif avec des revêtements de type PTFE Coût global réduit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jeu radial important, de l'ordre de quelques centièmes de millimètre ▪ Encombrement en longueur ▪ Sensibilité aux défauts d'alignement ▪ Capacité de charge inversement proportionnelle à la vitesse ▪ Usure 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Moteurs électriques pour outillage ou électroménager : axe monté sur bagues Autolubrifiantes ▪ Paliers des vilebrequins de moteur d'automobile lubrifié par film d'huile sous pression
Paliers à roulements	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Composants normalisés universels ▪ Précision élevée ▪ Supportent des charges radiales et axiales ▪ Frottements internes réduits 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Encombrement radial important ▪ Durée de vie fonction de la charge ▪ Vitesse maximale possible, pouvant parfois être une limite 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Roues, réducteurs, moteurs, poulies, pompes, broches, cylindres d'imprimantes, etc.
Paliers hydro-dynamiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très grande précision ▪ Frottements internes très réduits ▪ Capacité en vitesse élevée 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ils ne permettent que la rotation de l'arbre ▪ Étanchéité difficile ▪ Ils supportent uniquement des charges radiales ▪ Prix très élevé 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Moteurs à combustion interne (paliers de vilebrequin et de bielles) ▪ Paliers de turbines

Tableau 2.1 Tableau comparatif des familles de guidages en rotation.

3- LUBRIFICATION

1. Introduction

Le lubrifiant est un produit qui, interposé entre les deux surfaces frottantes d'un mécanisme. La fonction d'un lubrifiant est de favoriser le mouvement ou le glissement entre deux surfaces frottantes.

D'une manière générale, les lubrifiants réduisent les frottements et l'usure, évitent le grippage, participent au refroidissement, évacuent les impuretés (poussières, débris d'usure...), augmente la durée de vie, protègent contre la corrosion, peuvent avoir une fonction nettoyante (détergente) et parfois participer à l'étanchéité, améliore le rendement d'un mécanisme, d'où une diminution de la consommation d'énergie.

Chacune de ces fonctions peut être plus ou moins développée selon l'application. De tous les lubrifiants, enrichis ou non, les huiles et les graisses minérales à base de pétrole sont les plus utilisées. Les produits de synthèse (fabriqués chimiquement) occupent une place grandissante. Remarques : À elles seules, les huiles représentent plus de 95 % du total des lubrifiants employés. Le tableau ci-dessous représente les principaux lubrifiants

Principaux Lubrifiants			
	Solides	Liquides	Pâteux
Lubrifiants naturels	<ul style="list-style-type: none"> - Graphite - Bisulfure de MoS₂ - Biséléniures - Cires, résines... 	<ul style="list-style-type: none"> - Huiles minérales de pétroles : aromatiques paraffiniques et naphthéniques - Huiles siccatives 	<ul style="list-style-type: none"> - Graisses (à base d'huile de pétrole) - Pâtes lubrifiantes - Lanoline, suif, brais...
Lubrifiants de synthèse ou artificiels	<ul style="list-style-type: none"> - Plastiques fluorés (PTFE) - Polyamides - Vernis de glissements 	<ul style="list-style-type: none"> - Huiles synthétiques, polyglycols, esters, silicones, phosphates - Huiles composés ou compound... 	<ul style="list-style-type: none"> - Graisses de synthèse (silicones...)

Tableau 3.1 Principaux Lubrifiants

2. Frottement

Dans un mécanisme, lors du mouvement relatif entre deux pièces en contact, sous une charge normale \vec{F} , l'application du modèle de Coulomb nous dit que l'effort tangentiel \vec{T} nécessaire pour produire le déplacement est tel que $T = f.F$ (avec f désignant le coefficient de

frottement). Si la vitesse relative entre les deux pièces est V , la puissance dissipée en chaleur est TV et est directement proportionnelle au coefficient de frottement.

Diminuer ces frottements, c'est augmenter le rendement des mécanismes et diminuer leur usure. Il est donc important de chercher à réduire le coefficient de frottement au sein d'une liaison. Cette résistance au déplacement est fonction d'un grand nombre de paramètres (matériau en contact, état des surfaces en contact, etc.), la lubrification éventuelle du mécanisme est un critère très important pour la diminution de la résistance au déplacement.

Le frottement entre deux surfaces est dit immédiat, ou à sec, dans le cas de surface directement en contact. Il est dit médiat, lorsqu'une substance quelconque, appelée lubrifiant, est interposée. Suivant l'épaisseur de cette pellicule interposée, le régime est dit onctueux ou hydrodynamique ; dans ce dernier cas, les surfaces baignent dans l'huile et la force de frottement sert à vaincre les résistances tangentielles qu'opposent les couches de lubrifiant à leur glissement mutuel. Le frottement entre deux surfaces frottantes peut être décrit par quatre comportements typiques.

2.1 Le frottement sec

Le régime sec, qui est caractérisé par une absence de lubrifiant et un contact direct entre les surfaces. Le glissement y est le plus difficile et l'usure la plus rapide ; il est caractérisé par des contacts locaux fréquents sur les aspérités des surfaces, des échauffements, des arrachements et des microsoudures (Fig. 3.1 a).

2.2 Le frottement onctueux

Le régime onctueux, lorsqu'un film de produit lubrifiant est interposé entre les deux surfaces en contact (épilamen : très fine couche) et que l'épaisseur de ce film est faible devant la hauteur maximale des aspérités des surfaces en contact, le frottement et l'usure sont diminués. Le frottement est diminué ($f \approx 0,05$ à $0,20$) et le glissement favorisé. Les contacts locaux directs, sans épilamen, sont plus rares ; il y a moins d'arrachements, de microsoudures et d'usure (Fig. 3.1 b).

2.3 Le frottement hydrodynamique

Le régime hydrodynamique, lorsque l'épaisseur du film de lubrifiant est supérieure à la hauteur des aspérités et qu'il ne reste plus aucune partie des surfaces en contact. Celles-ci sont toujours séparées par une couche de lubrifiant d'épaisseur minimale e de $0,02$ à $0,008$ mm. Les résistances au mouvement correspondent au cisaillement des différentes couches de fluide entre la surface fixe et la surface mobile (viscosité). Pour peu que la vitesse relative soit

suffisante, le frottement est très réduit ($f \approx 0,002$ à $0,01$) et l'usure quasi nulle (pas de contact direct) (Fig. 3.1 C).

2.4 Le frottement mixte

Le régime mixte, c'est un mélange de frottement onctueux et de frottement hydrodynamique, caractérisé par une portance hydrodynamique et quelques contacts locaux avec épilamen, le frottement ($f \approx 0,04$ à $0,1$) et l'usure sont encore diminué,

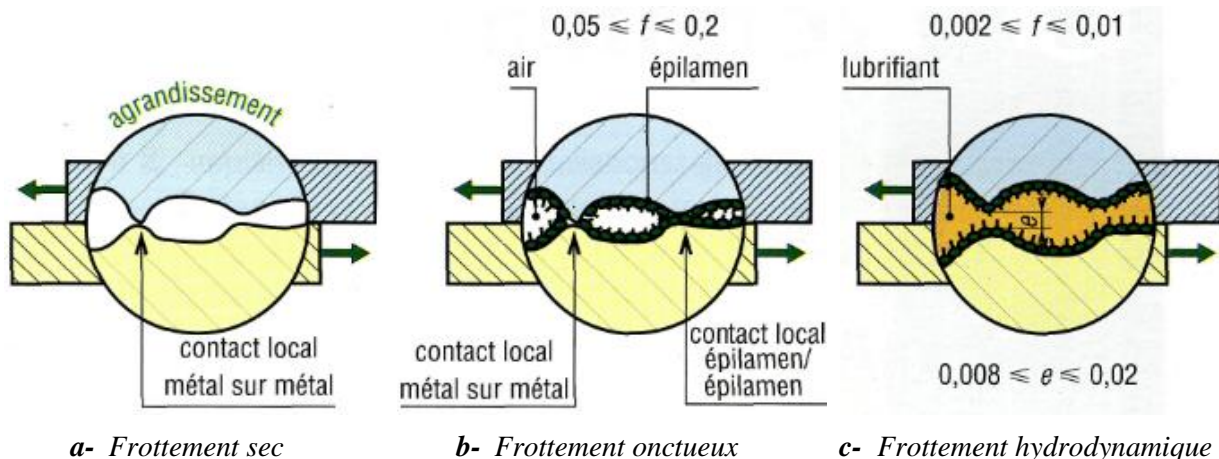


Fig. 3.1 Principaux cas de frottement entre deux surfaces.

3. Fonction réalisée par le système de lubrification

- Réduire les frottements, tout en favorisant le mouvement ou le glissement afin d'éviter le grippage entre deux surfaces frottantes (par exemple pour les moteurs à combustion interne, diminuer la consommation de carburant).
- Protéger les organes mécaniques contre l'usure et la corrosion (garantir la longévité et l'efficacité du composant).
- Maintenir la propreté, garantir la longévité du composant en maintenant l'ensemble des pièces dans un bon état de propreté tout en évacuant les impuretés vers un filtre à huile, en assurant des vidanges régulières et le remplacement du filtre.
- Participer à l'étanchéité (indispensable pour assurer un fonctionnement correct).
- Évacuer efficacement la chaleur (refroidir le composant pour éviter la déformation des différentes pièces : ceci nécessite souvent un échangeur de chaleur).

4. Lubrification Solide

Les lubrifiants solides sont des matières qui réduisent en phase solide les frottements entre surfaces glissant l'une contre l'autre, sans avoir besoin d'un milieu liquide. Ils sont capables de fournir une meilleure lubrification à des températures supérieures par rapport à des lubrifiants à base d'huile traditionnels. Les propriétés de faible friction de lubrifiants secs

résultent de leur structure en couches au niveau moléculaire avec une faible adhérence entre couches. De telles couches sont capables de coulisser par rapport à l'autre avec un minimum de force appliquée, par conséquent, leur donnant leurs propriétés de faible friction. Cependant, une structure cristalline en couches seul ne suffit pas nécessairement pour la lubrification. Il existe des matières solides avec des structures non lamellaires qui fonctionnent bien en tant que lubrifiants secs dans certaines applications telles que le polytétrafluoroéthylène (PTFE ou Teflon). Les lubrifiants solides les plus couramment utilisés sont:

- Disulfure de molybdène. (MoS₂)
- Graphite. (C) Disulfure de molybdène. (MoS₂)
- Polytétrafluoroéthylène (PTFE ou Teflon)

4.1 Caractéristiques des lubrifiants solides

❖ Principales utilisations

- Températures élevées,
- Pressions de contact élevées,
- Environnement chimique hostile...,
- La lubrification à sec ("frottement sec") est la seule possible.

❖ Principaux inconvénients

- Frottement assez élevé (0,02 à 0,3),
- Le film lubrifiant protecteur a une durée de vie limitée (1000 à 1000000 de cycles),
- Le lubrifiant ne participe pas au refroidissement des surfaces en contact (pas d'évacuation de la chaleur)...

❖ Modes d'application

- Par frottage des surfaces avec une poudre sèche fine du lubrifiant,
- Par incorporation à une résine ou à un liant (résines, sels métalliques, céramiques...) sous forme de fine couche protectrice (0,02 mm),
- Par réaction chimique avec le métal de base des surfaces.

4.2 Principaux lubrifiants solides

4.2.1 Bisulfure de molybdène MoS₂

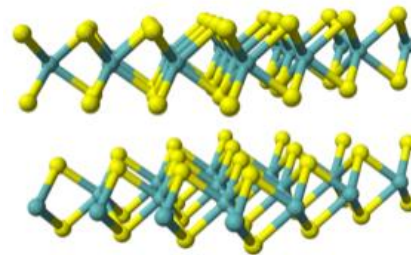
C'est un lubrifiant solide ou sec à structure en réseau à plusieurs couches (lamellaire comme le graphite) ayant une grande capacité portante et un faible coefficient de frottement. Non soluble, il reste sous forme de grains très fins en suspension (moins de 0,2 µm dans le cas de roulements) incorporés aux huiles, aux graisses, aux pâtes lubrifiantes extrêmes pressions et à

des vernis de glissement. On le trouve à l'état naturel dans les mines de fer mêlé aux autres minéraux, au-dessus de 400°C il se combine avec l'oxygène (donne du MoO₃).

La molybdénite (Fig. 3.2) est une espèce minérale formée de sulfure de molybdène de formule MoS₂ avec des traces de rhodium, rhénium, argent, or et sélénium. Elle est dimorphe de la jordisite pour les deux polytypes.



Molybdénite



*Structure cristalline du bisulfure de molybdène MoS₂.
Le molybdène est en bleu-vert, le soufre en jaune.*

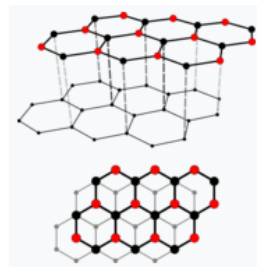
Fig. 3.2 Molybdène MoS₂

4.2.2 Graphite

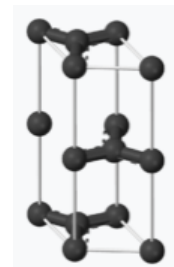
Il tire ses propriétés frottantes (faible frottement) de sa structure cristalline lamellaire. Il se caractérise également par son caractère réfractaire, une conductibilité électrique élevée et une faible dureté. Au-dessus de 550°C il se combine avec l'oxygène (Fig. 3.3).



Graphite natif



Structure du graphite.



Maille élémentaire.

Fig. 3.3 Structure du PTFE.

4.2.3 Polytétrafluoroéthylène PTFE (Téflon)

Le polytétrafluoroéthylène (Fig. 3.4), c'est un matériau thermoplastique n'ayant qu'une faible tendance à adhérer aux surfaces des autres matériaux. Il possède des propriétés remarquables qui le distinguent des autres polymères thermoplastiques, notamment une excellente résistance thermique et chimique, ainsi qu'un coefficient de frottement extrêmement faible. Température d'utilisation limitée à 300°C environ.

Dans la vie courante, le Téflon (Fig. 3.5) est largement utilisé comme revêtement antiadhésif dans les ustensiles de cuisine.

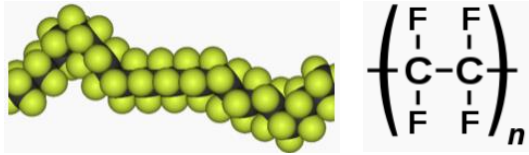


Fig. 3.4 Structure du PTFE.



Fig. 3.5 Le Téflon

Le tableau ci-dessous représente les différents Coefficient de frottement Gamme de température maximal pour les différents lubrifiants solides

Produit	Coefficient de frottement	Gamme de température Max
Graphite	0.11 to 0.2	450°C-538°C
MoS2	0.10 to 0.15	343°C-399°C
PTFE	0.06 to 0.10	260°C-302°C

Tableau 3.2 Coefficient de frottement et Gamme de température Max pour les différents lubrifiants solides

5. Lubrification à L’huile

La lubrification à l’huile permet d’obtenir un frottement onctueux, mixte ou hydrodynamique (dépend de la géométrie, de l’état des surfaces en contact, du jeu, etc.). Elles se présentent sous la forme d’une base (huile minérale ou de synthèse) avec des additifs (anti-usure, extrême pression, anticorrosion...) pour améliorer les caractéristiques ou adapter l’huile à l’application choisie. Les huiles sont caractérisées par leur viscosité, en (m^2/s) ou centistoke ($10000 ST = 1 m^2/s$). Les principaux dispositifs de lubrification à l’huile sont :

- Lubrification à l’huile par barbotage ou bain d’huile
- Lubrification à l’huile par brouillard d’huile
- Lubrification à l’huile par circulation d’huile

La viscosité et le point d’écoulement sont les propriétés principales.

5.1 Viscosités

Plus une huile est épaisse, plus sa viscosité est élevée. La fluidité est la propriété inverse de la viscosité. La viscosité de la majorité des fluides diminue lorsque la température augmente.

5.1.1 Viscosité cinématique (ν)

On la détermine en mesurant, à une température donnée, la durée de l’écoulement d’un volume connu de liquide à travers un appareil comportant un orifice ou tube calibré (tube capillaire) de dimensions normalisées (Fig. 3.6).

5.1.2 Viscosité dynamique (μ)

Elle est égale au produit de la viscosité cinématique (ν) par la masse volumique du fluide (ρ) ($\mu = \rho \cdot \nu$) (Fig. 3.7)

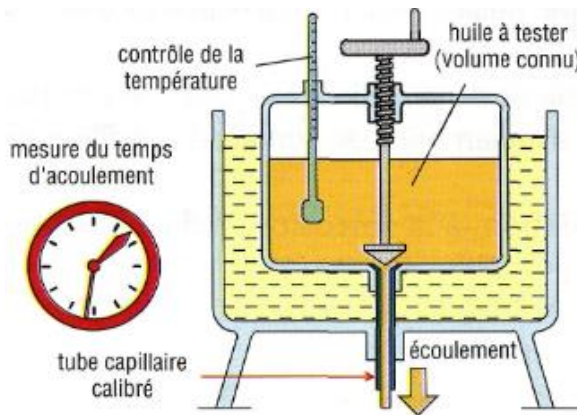


Fig. 3.6 Viscosités cinématiques

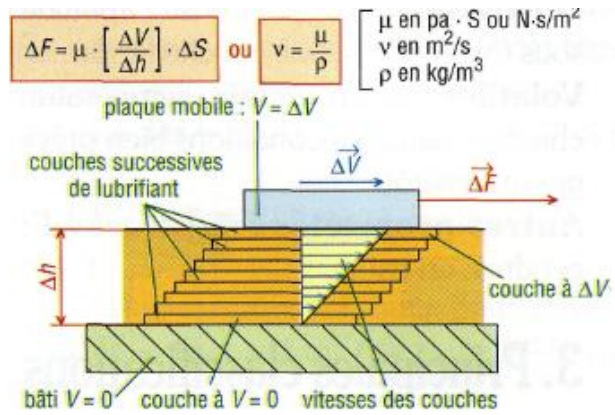


Fig. 3.7 Viscosités cinématiques

Le tableau ci-dessous représente la viscosité cinématique (ν), la masse volumique du fluide (ρ) et la viscosité dynamique (μ) à la température d'ambiante 20° c

	viscosité cinématique ν (cSt)	masse volumique ρ (kg/m ³)	viscosité dynamique μ (Pa. s)
Essence	≈ 0,74	743	0,00055
Gas oil	≈ 14	893	0,013
Huile SAE 10	≈ 95	909	0,088
Huile SAE 30	≈ 320	909	0,290
Huile SAE 40	≈ 770	909	0,700

Tableau 3.2 (ν), (ρ) et (μ) à 20° c

5.2 Types d'huiles

On peut encore entendre des termes comme « huile machine » ou « huile de broche », mais ils ont cessé d'être utilisés comme désignations commerciales. On parle maintenant d'huiles lubrifiantes, qui sont classées en huiles minérales, synthétiques, animales ou végétales. Les huiles lubrifiantes les plus courantes pour roulements sont les huiles minérales. Il s'agit d'huiles de pétrole brut raffinées. Elles peuvent être paraffiniques ou naphthéniques ou une combinaison des deux.

5.2.1 Huiles minérales

Dans la plupart des cas, les huiles minérales de haute qualité sont les mieux adaptées pour la lubrification des roulements. L'huile minérale pure est exempte de composés instables, tels que l'azote, l'oxygène, les composés sulfurés et les acides, qui peuvent affecter la durée de

service des roulements. Les huiles les plus usuelles d'aujourd'hui, sont des huiles paraffiniques hautement raffinées.

5.2.2 Huiles synthétiques

Les huiles de synthèse ne sont utilisées que pour des applications spéciales et principalement à des températures de fonctionnement supérieures à 90°C ou à très basse température.

5.2.3 Huiles animales et végétales

Les huiles animales et végétales ne doivent pas être utilisées, en général, pour les roulements, car il existe un risque d'altération de la qualité ou de formation d'acide après peu de temps. Dans des cas spéciaux, cependant, des huiles dites composeuses, c'est-à-dire des huiles minérales avec 10% au maximum d'huile animale ou végétale, peuvent être utilisées. Elles sont plus communes dans l'industrie alimentaire. Suivre les recommandations du fabricant en ce qui concerne l'utilisation de ces huiles.

5.3 Lubrification à l'huile par barbotage ou bain d'huile :

Un ensemble de pièces en mouvement dans un mécanisme est baigné dans l'huile (Fig. 3.8 et 3.9). Dans ce dispositif, on utilise les propriétés de l'huile, viscosité, onctuosité pour son entraînement vers les surfaces à lubrifier, soit par l'organe même (engrenages par exemples figure 3.8 et 3.9), soit par un organe interposé (chaîne, anneau, disque centrifuge etc....). La figure ci-dessous propose un système de lubrification classique appelé communément, lubrification par barbotage.

Le choix de la quantité d'huile est très important : trop d'huile, il risque d'y avoir des pertes d'énergie et un échauffement dus au brassage, pas assez d'huile et la lubrification de tous les éléments ne sera pas assurée, le refroidissement incomplet. Le niveau d'huile doit pouvoir être vérifié régulièrement.

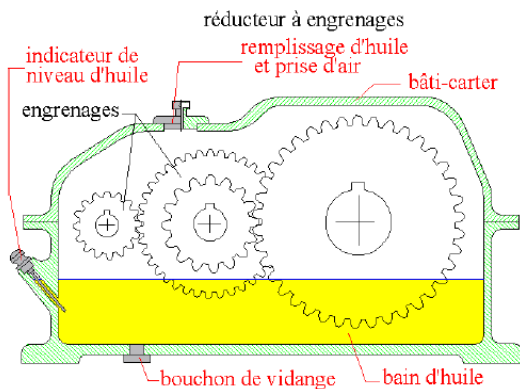


Fig. 3.8 Principe de la lubrification par barbotage

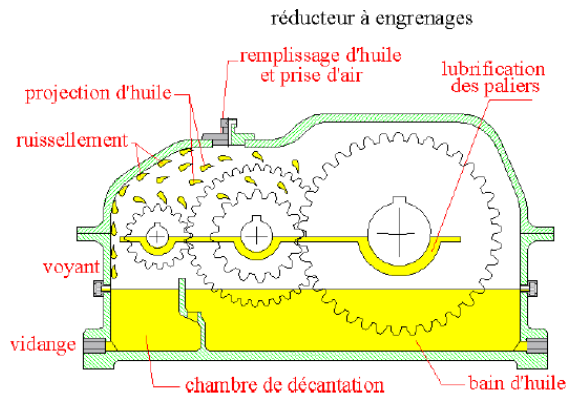


Fig. 3.9 Principe de la lubrification par barbotage et projection.

5.4 Lubrification à l'huile par brouillard d'huile:

Ce type de lubrification est utilisée dans le cas de vitesses très élevées, c'est aussi ce type de lubrification que l'on utilise pour les réseaux d'air pneumatique. Le débit d'air participe au refroidissement du système. Un compresseur pulvérise une certaine quantité de gouttelettes d'huile sur les éléments à étancher (roulements, engrenages) (Fig. 3.10).

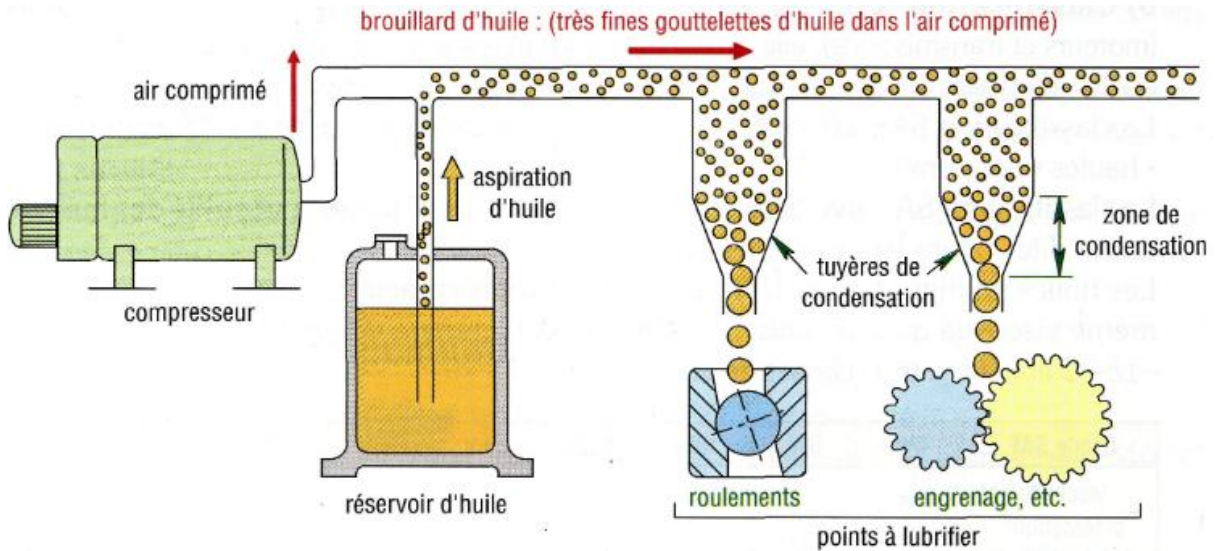


Fig. 1.10 Principe de la lubrification par brouillard d'huile.

5.4.1 Lubrification à l'huile par circulation d'huile

Ce système de lubrification est le plus complexe et le plus coûteux. Une même pompe permet d'envoyer l'huile vers les différents composants du système à lubrifier, le système est complété par des échangeurs thermiques pour le refroidissement et un filtre pour éliminer les impuretés. C'est le type de lubrification que l'on retrouve dans un moteur thermique. Une pompe assure la circulation de l'huile vers les éléments à lubrifier, par interposition d'un film d'huile. Elle permet aussi de réguler la température (exemple : lubrification des paliers dans le moteur d'une automobile) (Fig. 3.11).

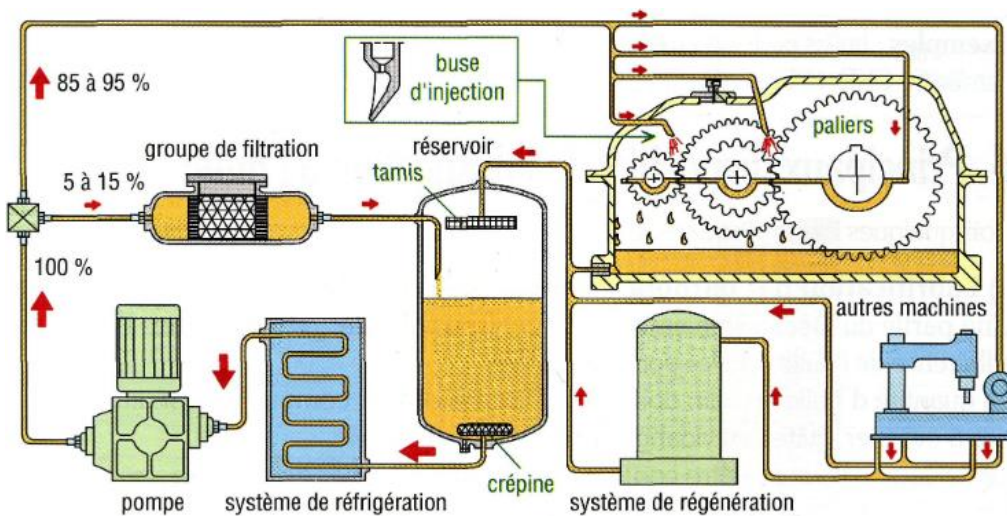


Fig. 1.11 Lubrification par circulation d'huile.

6. Lubrification à la graisse

Elles permettent un frottement onctueux ou un frottement mixte. Du fait de leur consistance, elles sont stables au repos et se comportent comme un solide. En service, sous l'action des charges, elles réagissent comme un liquide : la fluidité augmente et se rapproche de celle de l'huile de base. Les graisses, composées d'huiles minérales et d'additifs tels que le plomb pour les extrêmes pressions ou le lithium, sont caractérisées par leur onctuosité. Elles sont utilisées lorsque les températures et les vitesses sont faibles, et les charges fortes de manière générale.

6.1 Constitution des graisses

Elles sont obtenues par dispersion d'agents épaississants appelés savons (origine métalliques déterminant les propriétés physiques : consistance, etc.) dans une huile de base (minérales ou synthétique) représentant 85 à 97 % de la masse totale plus des additifs (Sont les additifs les plus courants) (Fig. 3.12).

- Le graphite,
- Le bisulfure de molybdène,
- Le plomb (qualité extrême pression),
- Les colorants et les charges (talc...)

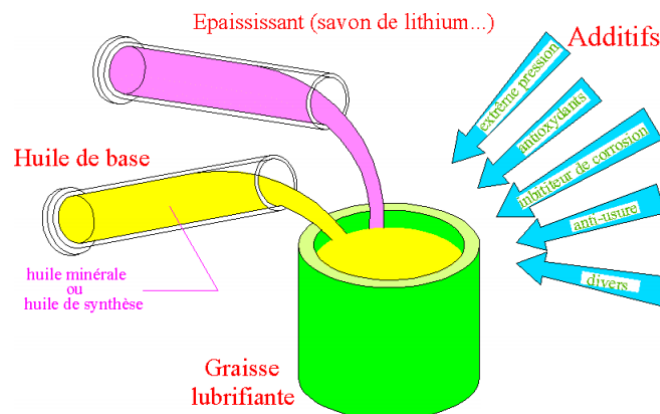


Fig. 3.12 Constitution des graisses

6.2 Propriétés des graisses

6.2.1 Consistance

C'est la propriété principale. Elle exprime la résistance à la déformation de la graisse. Étroitement liée à l'adhérence et à l'onctuosité, elle diminue lorsque la température augmente (comportement du beurre).

6.2.2 Point de goutte

Il caractérise la tenue de la graisse à la chaleur en précisant la température de début de liquéfaction.

6.3 Graissage à vie

La graisse est mise en place et jamais renouvelée, ce qui suppose une très bonne étanchéité. Citons les roulements étanches avec joints à lèvres frottantes, certains moteurs électriques et l'électroménager.

6.4 Graissage périodique

On rencontre deux types de situations dans la maintenance des appareils :

- Le changement de la graisse usagée s'effectue après démontage du mécanisme lors d'un entretien prévu ;
- La graisse est renouvelée sans démontage de l'appareil ; il faut alors prévoir un dispositif d'apport de graisse (graisseur + conduit) et un système d'évacuation ou récupération de graisse usagée.

6.5 Graisseurs

6.5.1 Graisseurs à haute et moyenne pression

6.5.1.1 Les graisseurs « Hydraulic »

Ils conviennent pour le graissage à haute pression ((Fig. 3.13)). La forme de la tête est prévue pour un accrochage rapide de la pompe de graissage. Ces graisseurs peuvent être montés soit dans des trous taraudés (série standard), soit dans des trous lisses (graisseurs auto-taraudants).

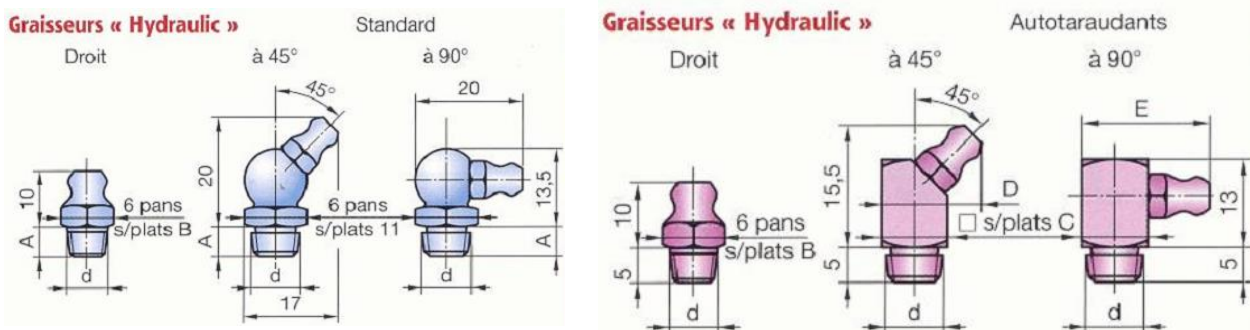


Fig. 3.13 Graisseurs « Hydraulic ».

6.5.1.2 Les graisseurs « six pans »

Ils conviennent pour le graissage à moyenne pression (Fig. 3.14). La forme de la tête permet un accrochage de l'agrafe de la pompe par déplacement radial.

6.5.2 Graisseurs à basse pression

Ils conviennent pour le graissage à l'huile ou à la graisse peu épaisse à basse pression (Fig. 3.15). Le graisseur « Lub » lisse est destiné à être monté à force dans un trou de même diamètre nominal.

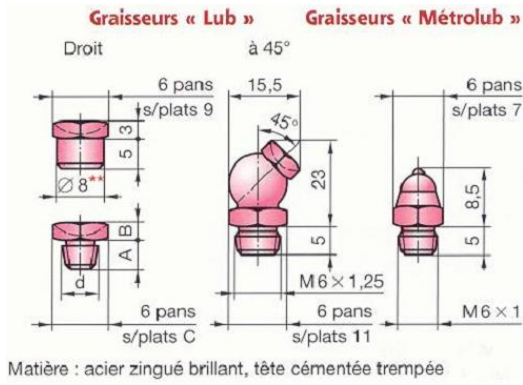


Fig. 3.14 Graisseurs à basse pression.

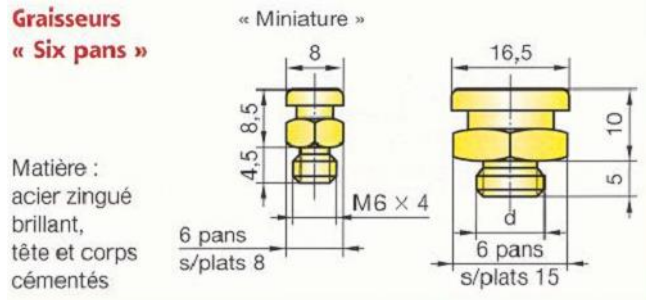


Fig. 3.15 Graisseurs « six pans ».

4- ÉTANCHÉITE

1. Introduction

Une enceinte est dite parfaitement étanche s'il ne peut y avoir aucune circulation de fluide et/ou de particules entre l'intérieur et l'extérieur de cette enceinte. Une étanchéité correspond donc à une interdiction de passage.

La fonction de service d'une étanchéité en général, est de réaliser une frontière matérielle entre deux milieux ambiants différents. Ces deux milieux se différencient par la nature des fluides qui les composent.

L'étanchéité peut être décrite en fonction des critères suivants :

- **Étanchéité statique:** Étanchéité entre deux pièces sans mouvement relatifs (ou de très faibles amplitudes).
- **Étanchéité dynamique:** Étanchéité entre deux pièces avec mouvement relatifs de rotation et/ou de translation.
- **Étanchéité directe:** Étanchéité directe entre les surfaces (sans interposition de joints).
- **Étanchéité indirecte:** Étanchéité avec interposition d'éléments déformables (joints, segments).

Les critères à prendre en compte lors du choix d'un type d'étanchéité sont :

- Nature du fluide à étancher,
- Pression du fluide,
- Température et dilatation,
- Mouvement relatif des surfaces et vitesse de ce mouvement,
- Formes des surfaces,
- Rugosité des surfaces,
- Durée de vie souhaitée,
- Tolérance de fuite,
- Compatibilité chimique entre le joint et le fluide à étancher,
- Porosité des matériaux,
- Simplicité de la conception,
- Entretien,
- Coût.

2. Étanchéité statique

Une étanchéité est dite **statique** lorsque les pièces en contact sont immobiles l'une par rapport à l'autre. Les surfaces en contact présentent des défauts (aspérités), le fluide peut donc s'échapper de la zone sous pression. Pour empêcher le fluide de se glisser entre les aspérités, plusieurs solutions peuvent être envisagées pour réaliser cette étanchéité :

- Augmenter l'effort de serrage entre les surfaces en contact pour déformer les aspérités, solution peu intéressante.
- Diminuer les aspérités en polissant les surfaces en contact.
- Réduire la taille d'une des surfaces pour permettre un écrasement des aspérités, solution simple mais souvent indémontable.
- Interposer un élément déformable (joint, pâte, colle...) qui comble les aspérités, solution la plus utilisée.

2.1 Étanchéité directe

Etanchéité assurée uniquement par l'état des surfaces en contact entre S1 et S2, sans élément d'étanchéité supplémentaire (sans joint). En pressant fortement deux surfaces métalliques l'une contre l'autre, leurs aspérités s'écrasent et les îlots de contact s'élargissent jusqu'à réaliser une bonne étanchéité même à de fortes pressions : les déformations locales des matériaux des surfaces en contact permettent le maintien de cette étanchéité jusqu'à des pressions élevées. Cette étanchéité peut être réalisée soit :

- En rodant les surfaces de contact à l'une sur l'autre afin d'obtenir des états de surfaces parfaits. Exemple : Raccord à joint conique (Fig. 4.1).
- En utilisant un produit de collage et d'étanchéité.

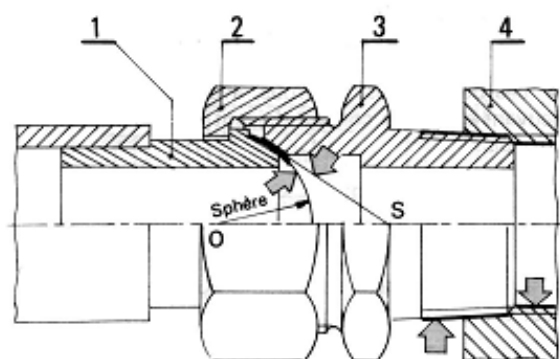


Fig. 4.1 Raccord à joint conique.

2.2 Étanchéité indirecte

Etanchéité réalisée en interposant entre les deux surfaces à étancher un joint de commerce. Un joint interposé entre deux pièces doit :

- remplir entièrement les dépressions entre les aspérités,
- supporter la pression et la température de service,
- résister à l'agression chimique des fluides à étancher.

Pour obtenir une étanchéité correcte, il faut que :

- le matériau du joint présente un comportement plastique (Fig. 4.2),
- le matériau soit tendre (élastomère, fibres agglomérées, cuivre recuit, aluminium, fer doux),
- la surface de contact soit étroite afin de pouvoir comprimer le joint avec une pression convenable.

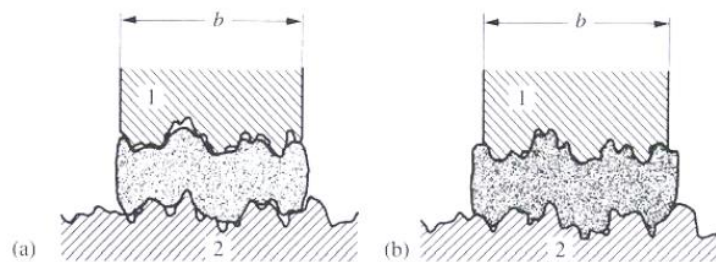


Fig. 4.2 Joint d'étanchéité.

L'épaisseur des joints diminue avec le temps (plastification du matériau, fluage). On peut limiter le fluage latéral du joint en l'emprisonnant dans une gorge. Lors du démontage d'un ensemble mécanique, il faut absolument remplacer l'ancien joint car celui-ci s'est généralement durci et ne peut plus s'adapter aux surfaces. Pour des joints en caoutchouc et élastomères, il faut s'assurer que les surfaces en contact soient polies.

2.3 Les différents joints pour l'étanchéité statique

2.3.1 Joint plat de formes quelconques

Ces joints sont découpés aux formes voulus dans de grandes plaques (Fig. 4.3).

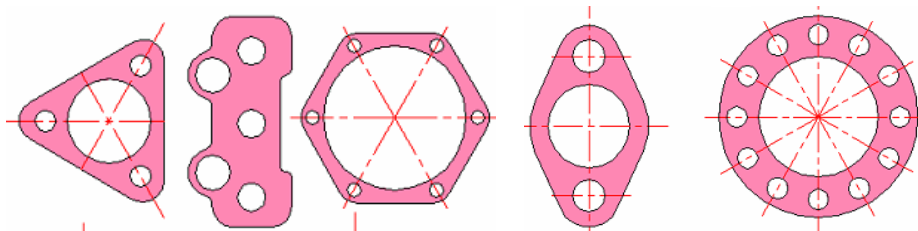


Fig. 4.3 Joint plat de forme quelconque.

Les matériaux de cc joints sont :

- Les papiers, constitués de fibres permettant d'obtenir des joints peu épais adaptés notamment aux états de surface de qualité.
- L'amiante associé à des liants divers ;

- Le liège associé à d'autres composants ;
- Des fibres (par exemple les joints pour canalisations d'eau) ;
- Les élastomères (néoprène, Viton, perbunan...) ;
- Les métaux enrobant d'autres matériaux formant l'ensemble des joints métaloplastiques.

2.3.2 Joint plat pour bride

Certaines pièces mécanique sont assemblées par des formes appelées **brides** (Fig. 4.4).



Fig. 4.4 Brides.

Ces brides peuvent s'emboîter (Fig. 4.5-a et b) ou ne présenter qu'un plan d'appui (Fig. 4.5-c et d). Le serrage s'effectue par vissage.

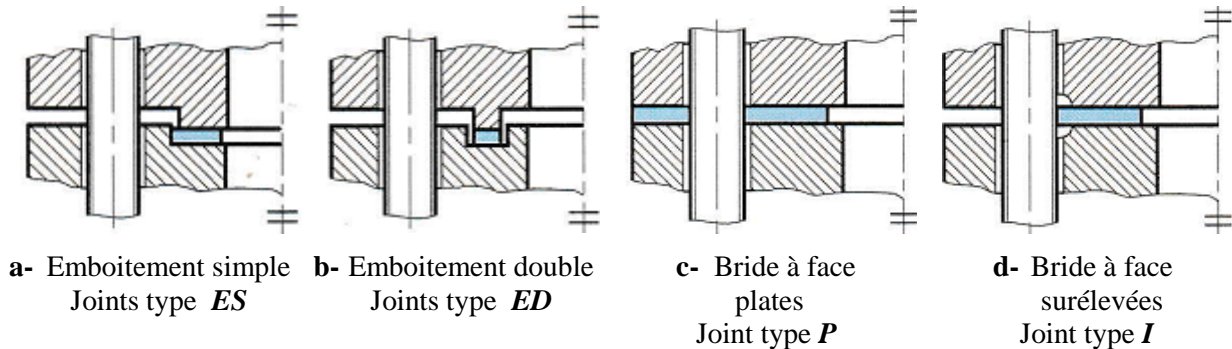


Fig. 4.5 Brides et types de joints.

2.3.3 Joint toriques

Ces joints sont très efficaces et d'un prix réduit. La plage des températures compatibles va de -50 °C à +250 °C. Pour certains joints, la pression va du vide poussé à 100 MPa. Les joints toriques (Fig. 4.6) sont principalement utilisés en étanchéité statique (figure) mais aussi donnent également satisfaction dans certaines applications dynamiques.



Fig. 4.6 Joints toriques.

Le choix d'un joint s'effectue en plusieurs étapes. La matière du joint doit être compatible avec le fluide en présence, la température de service et le matériau en contact (surtout alliages de cuivre et matières plastiques). Pour un même matériau, il existe plusieurs duretés qui permettent au joint de résister à la pression de service.

Dans les assemblages, les jeux peuvent être amplifiés par les déformations liées aux effets de la pression et aux dilatations. Les risques d'extrusion dus à la pression et au jeu diminuent quand la dureté augmente.

Les joints sont généralement placés dans des gorges rectangulaires (Fig. 4.7) ou éventuellement trapézoïdales, s'il faut empêcher un joint de sortir de sa gorge lors d'un démontage de pièces.

Le volume de la gorge doit toujours être supérieur au volume du joint en service. Les cotes D et G sont fonction de d , diamètre du tore et du type de montage (Fig. 4.8 et Fig. 4.9).

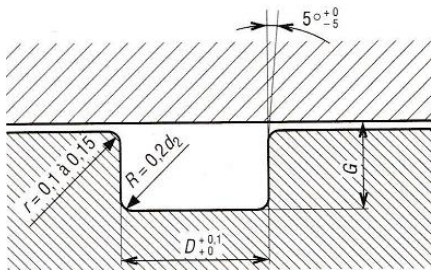


Fig. 4.7 Gorge rectangulaire

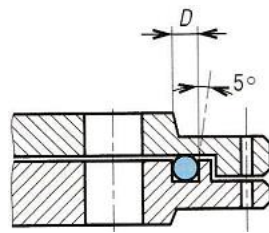


Fig. 4.8 Montage sur brides

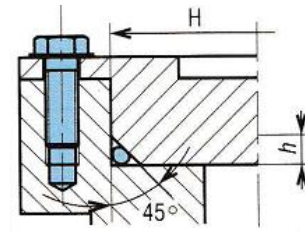


Fig. 4.9 Montage sous couvercle

2.3.4 Joints à quatre lobes

Comme les joints toriques, ils sont obtenus par moulage d'élastomères synthétiques (nitrile, éthylène-propylène, fluoroélastomères). En étanchéité statique, ils sont montés dans des gorges trapézoïdales (Fig. 4.10). Leur section est sensiblement carrée et comporte quatre lobes (Fig. 4.11). Il est cependant préférable d'utiliser les joints toriques.

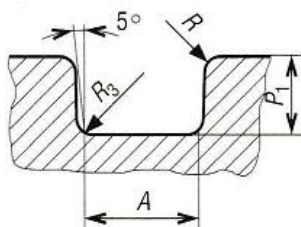


Fig. 4.10 Gorge, montage statique.

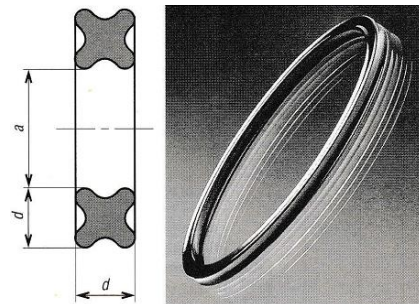


Fig. 4.11 Joints à quatre lobes.

2.3.5 Bagues BS

La bague BS est une rondelle étanche constituée d'un anneau trapézoïdale de caoutchouc synthétique adhérent sur une rondelle métallique (Fig. 4.12). Après serrage, la base du trapèze se transforme en deux lèvres plaquées par la pression sur les surfaces d'étanchéité (Fig. 4.13). Ces bagues sont utilisées avec des éléments filetés (vis, écrous borgnes, etc) et des assemblages par brides. La bague BS standard est centrée dans un lamage. La bague BS auto-centré est munie d'une lèvre de centrage sur la vis.

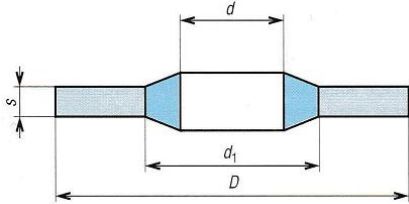


Fig. 4.12 Bague BS.

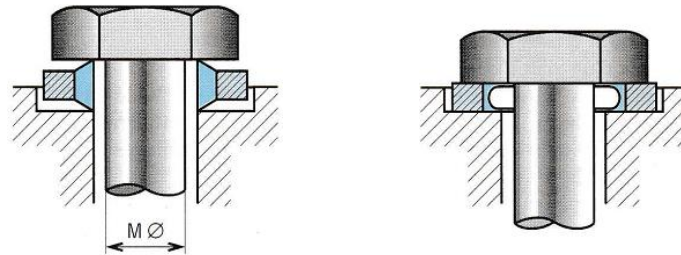


Fig. 4.13 Bague BS avant et après le serrage

3. Étanchéité dynamique

Une étanchéité est dite dynamique lorsque que les surfaces d'étanchéité sont mobiles. On distingue principalement deux cas suivant le type de mouvement entre les pièces (translation ou rotation).

3.1 Translation

Le mouvement est parallèle au gradient de pression (Fig. 4.14), la pièce mobile balaie périodiquement une partie de la surface de la pièce fixe. Si le fluide à étancher est un liquide, il existe toujours un film de quelques microns d'épaisseur qui reste accroché à la surface. En passant dessus, la pièce mobile entraîne une faible quantité de liquide dans son mouvement et agit comme une pompe à viscosité. Le film ainsi réalisé lubrifie les surfaces et de ce fait diminue leur usure. Ce cas se rencontre dans tous les pistons et tiges de pistons (Fig. 4.15).

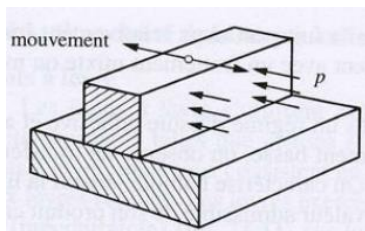


Fig. 4.14 Mouvement parallèle au gradient de pression

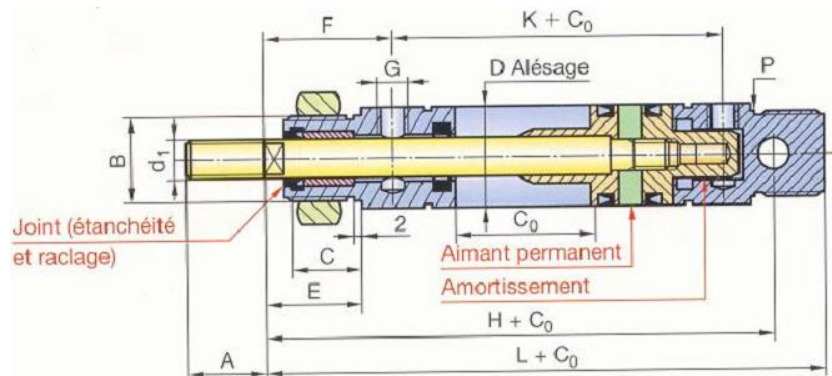


Fig. 4.15 vérin

3.2 Rotation

En général le mouvement est perpendiculaire au gradient de pression (Fig. 4.16). Les passages d'arbre à travers des parois (carters) conduisent à un mouvement perpendiculaire au gradient de pression. A défaut de mesures spéciales, les surfaces ne sont pas lubrifiées par le fluide alors que la vitesse relative est souvent très élevée, d'où une usure importante.

On peut distinguer deux classes ;

- les étanchéités radiales (surface d'étanchéité cylindrique) (Fig. 4.17 a)
- les étanchéités axiales (surface d'étanchéité plane perpendiculaire à l'axe de rotation), dans ce dernier cas, l'étanchéité est meilleure dans le cas (Fig. 4.17 b).

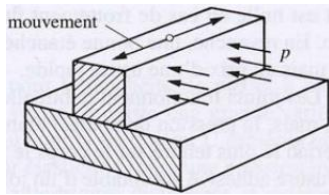


Fig. 4.16 Mouvement perpendiculaire au gradient de pression

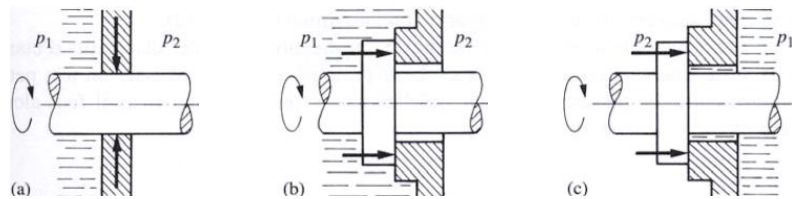


Fig. 4.17 étanchéités radiales et axiales

Les solutions utilisées dans ce cas peuvent se répartir en deux catégories :

- Les solutions avec frottement qui sont principalement les joints à lèvres (axiale ou/et radiale), les joints toriques et quatre lobes, les presse-étoupe à tresse et à joint à lèvres ; etc. ; on doit aussi citer les protections du type soufflet et éléments télescopiques (courant en machine-outil).
- Les solutions sans frottement, parmi lesquelles on trouve le passage étroit, la chicane, le labyrinthe (pouvant être remplis de graisse), la turbine à vis, le déflecteur.

3.3 Étanchéité dynamique directe

Les pièces sont en contact par deux surfaces compatibles, cylindre ou plan. Il faut avoir une géométrie complémentaire et un jeu de fonctionnement le plus faible afin de diminuer les fuites qui peuvent être très faibles si le fluide est très visqueux. L'étanchéité directe sera qualifiée par un débit de fuite.

3.4 Étanchéité dynamique indirecte

Elle est réalisée par l'interposition d'un joint entre les deux surfaces en mouvement de rotation. Plusieurs problèmes sont à régler :

- Lubrification des surfaces au contact du joint pour diminuer le frottement donc la température.

- La protection du joint des agents extérieurs (poussières abrasives par exemple).
- Montage correct du joint pour minimiser le débit de fuite (géométrie des surfaces, ajustement, pression de serrage etc...).

3.5 Les différents joints pour l'étanchéité dynamique

3.5.1 Joints à lèvres pour arbres tournants

Ces joints sont très utilisés pour l'étanchéité à l'huile. Il existe de nombreux types de joints, qui comportent tous au moins les éléments de la figure 4.18.

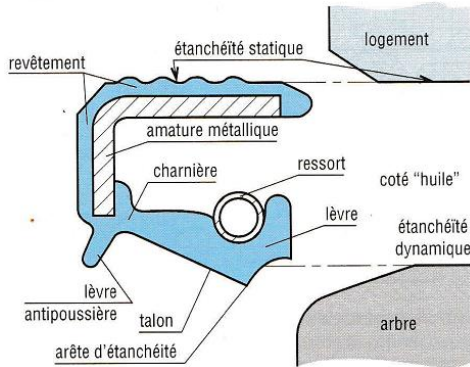


Fig. 4.18 Joints à lèvres pour arbres tournants.

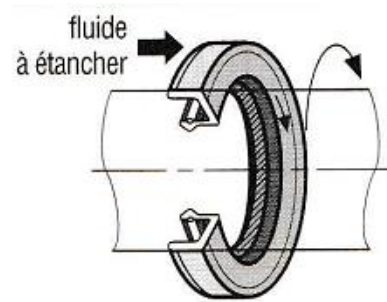


Fig. 4.19 Stries sur un joint

Le fluide dont il faut empêcher le passage est toujours situé du côté F. éventuellement, une lèvre anti-poussière peut exister pour empêcher les poussières extérieures de pénétrer dans le mécanisme (on place de la graisse entre les deux lèvres).le ressort exerce une pression radiale sur l'arrête d'étanchéité. Des stries réalisées sur le talon de la lèvre améliorent l'efficacité du joint (Fig. 4.19).

Le joint est monté serré dans un logement. Si le joint est positionné par un épaulement, ce dernier doit être situé du côté extérieur du joint (Fig. 4.20). Si le joint est positionné par l'outil de montage, les deux montages de la figure 4.21 sont corrects. Il ne faut pas utiliser le montage de la figure 4.22, car l'action de l'outil de montage risque de plier l'armature du joint.

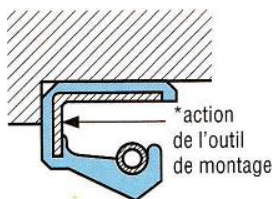


Fig. 4.20 avec épaulement.

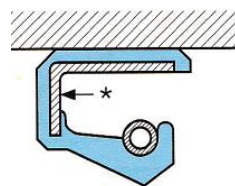


Fig. 4.21 positionné par outil de montage.

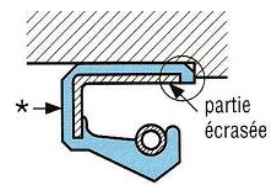
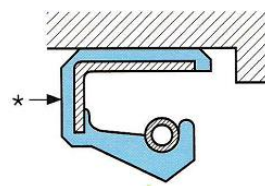


Fig. 4.22 montage à éviter.

Les formes admises pour le logement sont données sur la figure 4.23. l'état de surface de l'alésage est R de 4 à 12,5 μm , pour un joint enrobé, et R de 3 à 8 μm , pour une armature métallique.

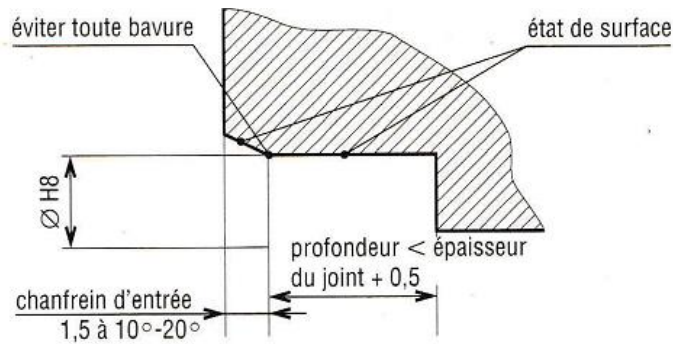


Fig. 4.23 formes de logement préconisées.

3.5.2 Joints Torique

Ces joints sont surtout utilisés en hydraulique où ils sont bien lubrifiés. On les réserve aux courses et vitesse faibles (V_{max} de 0,2 à 0,3 m/s), en raison des frottements dus à la compression du joint (d'environ 6%). En pneumatique, pour les mouvements de translation, les joints sont moins comprimés (2 à 6 %).

L'état de surface général conseillé est $0,2 < R_a < 0,4$, et les finitions recommandées sont le rodage, le polissage, le galetage afin d'aplanir les aspérités.

Extrusion des joints, c'est un phénomène de fluage (écoulement) du caoutchouc dans les jeux de l'assemblage, sous l'effet de la pression (Fig. 4.24). Ce phénomène fait intervenir le jeu de l'assemblage, la pression du fluide et la dureté DIDC du joint. La norme NF T 46-003 définit l'essai de dureté internationale des caoutchoucs vulcanisés. On définit des Degrés Internationale des de Dureté du Caoutchouc : DIDC (de 30 à 94).

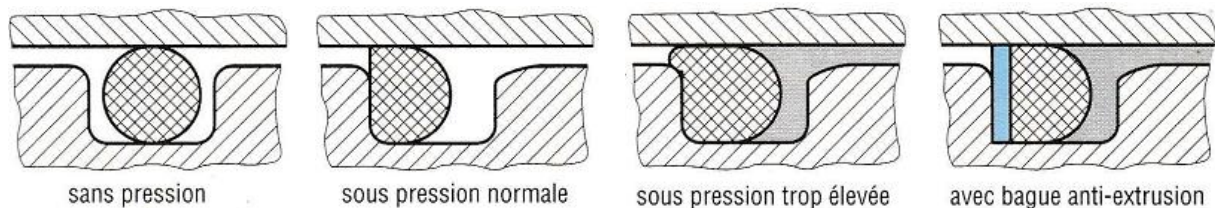


Fig. 4.24 Extrusion, parade à l'extrusion.

3.5.3 Joints à quatre lobes

Ce joint assure l'étanchéité par la flexion des lobes et non par compression comme le joint torique. L'effort de contact de la lèvre sur le cylindre est proportionnel à la pression. Le joint n'a pas de sens de montage, le lubrifiant emprisonné entre les lobes favorise le déplacement. Il n'y a pas de vrillage.

Les joints sont montés dans des gorges rectangulaires (Fig. 4.25) parfaitement lisse et munies de rayons. Des chanfreins sont à prévoir pour ne pas détériorer les joints (Fig. 4.25). La distance $P_2 + j$, est comprise entre le fond de la gorge et le cylindre d'appui du joint, est constant pour une section donnée de joint (Fig. 4.25).

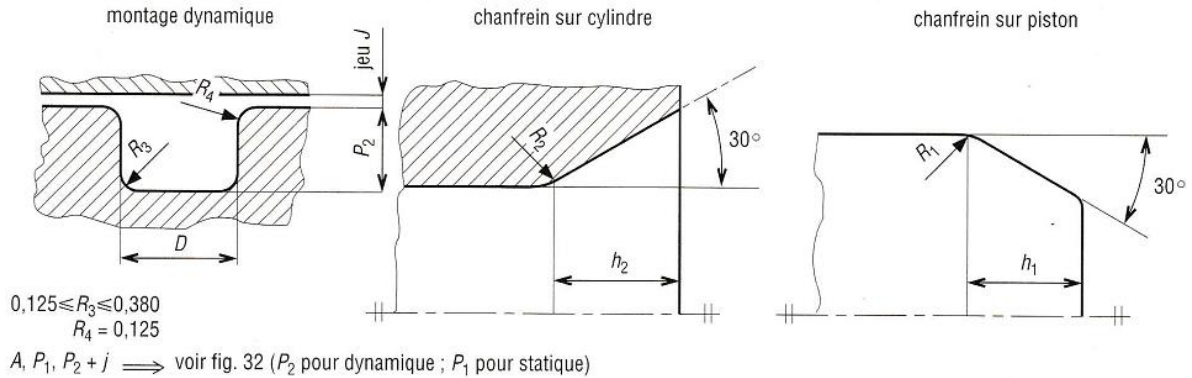


Fig. 4.25 Gorges et chanfrein.

La figure 4.26 résume les grands cas rencontrés.

- Mouvements rotatifs : les joints sont montés dans la partie fixe; la vitesse circonférentielle est inférieure à 1 m/s ;
- Mouvements alternatifs : avec les jeux recommandés, la pression peut aller jusqu'à 25 MPa.
- Montages double effet (pression des deux côtés) : si la pression est supérieure à 0,7MPa, prévoir deux bagues montés dans deux gorges successives, si la pression est inférieure à 0,7MPa, une seule bagues suffit.

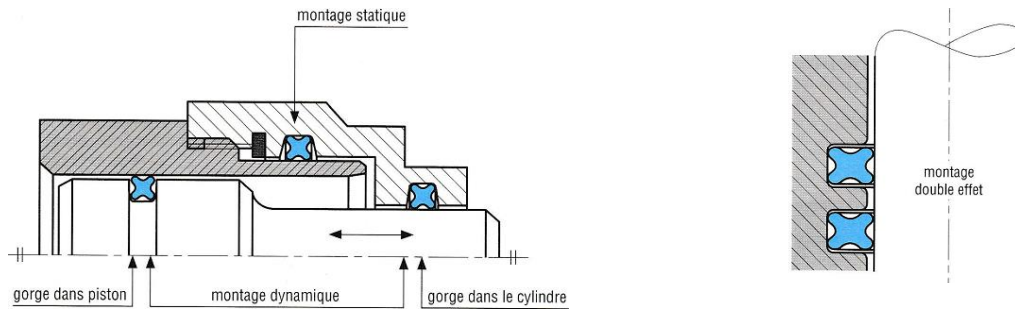


Fig. 4.26 Gorges et chanfrein.

3.5.4 Joints à lèvres en U

Ce sont des joints simple effet pour tige ou piston. Le tableau 4.1 indique des domaines d'emploi.

	Hydraulique		Pneumatique	
	V (m/s)	Pression (MPa)	V (m/s)	Pression (MPa)
Élastomères	< 0,5	25	< 1	1,2
PTFE	15	35		

Tableau. 4.1 Vitesses et pressions admissibles suivant matière et domaine d'emploi.

C'est le fluide sous pression qui plaque les lèvres sur les surfaces (gorge et cylindre ou tige), assurant un contact efficace donc une bonne étanchéité (Fig. 4.27). Les fabricants proposent des joints très élaborés : les valeurs de ce tableau ne sont qu'indicatives et ne remplacent en aucun cas leurs catalogues.

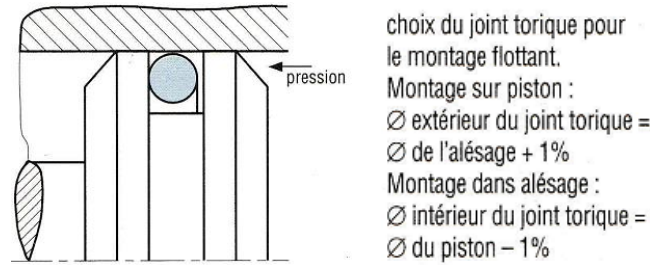


Fig. 4.27 Montage flottant.

La figure 4.28 donne quelques dimensions et un exemple de montage d'un joint symétrique SIMRIT EN NBR, pression $\leq 16\text{MPa}$, vitesse $\leq 0,5\text{ m/s}$ pour l'hydraulique.

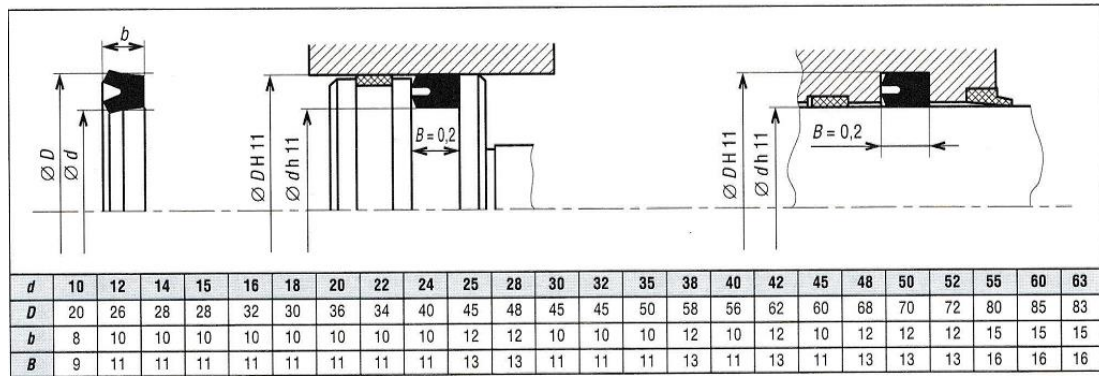


Fig. 4.28 joint U.

3.5.5 Joints composés

Pour pallier les problèmes de frottement de joints toriques, on les associe à une bague en matériaux à faible coefficient de frottement avec l'acier (PTFE). Le tableau 4.2 indique

	Hydraulique		Pneumatique	
	V (m/s)	Pression (MPa)	V (m/s)	Pression (MPa)
Tore + bague	2 à 15	16 à 80	< 5	2,5

Tableau. 4.2 Vitesses et pressions admissibles suivant le domaine d'emploi.

3.5.6 Joints V

Ils assurent une protection efficace contre les protections d'eau, de boue et d'huile. Ils agissent de plusieurs façons :

- Joints frottant ;
- Déflecteur ;
- Effet de soupape.

Ce joint est le plus souvent monté sur l'arbre (à l'intérieur pour l'huile, à l'extérieur pour la graisse) et sa lèvre frotte sur une surface plane et perpendiculaire à l'arbre.

Le joint V (Fig. 4.29) assure l'étanchéité tout en acceptant les défauts suivants :

- Obliquité ($4,5^\circ$ pour petits diamètre à 1° pour diamètre de 150 mm) ;
- Excentration (0,4 à 3,6 suivant la taille) ;
- Déplacement axial.

Il est particulièrement adapté à l'étanchéité des rotules ou des paliers d'arbres montés sur roulements à rotule. Le tableau 4.3 précise l'état de surface conseillé suivant les conditions d'utilisations (différence des pressions nulle).

$R_a \mu\text{m}$	Huile-eau	Poussières	Graisse
$V < 10 \text{ m/s}$	0,8 à 1,6	1,6 à 2	1,6 à 2
$V > 10 \text{ m/s}$	0,4 à 0,8	0,8 à 1,6	0,8

Tableau. 4.3 Etat de surface pour joint V.

Le joint (en nitrille) est monté sur l'arbre ; il faut prendre les précautions de montage suivantes :

- $V > 8 \text{ m/s} \Rightarrow$ blocage axial.
- $V > 12 \text{ m/s} \Rightarrow$ blocage axial + radial.
- $V > 18 \text{ m/s} \Rightarrow$ joint monté sur la partie fixe (risque de décollement de la lèvre).

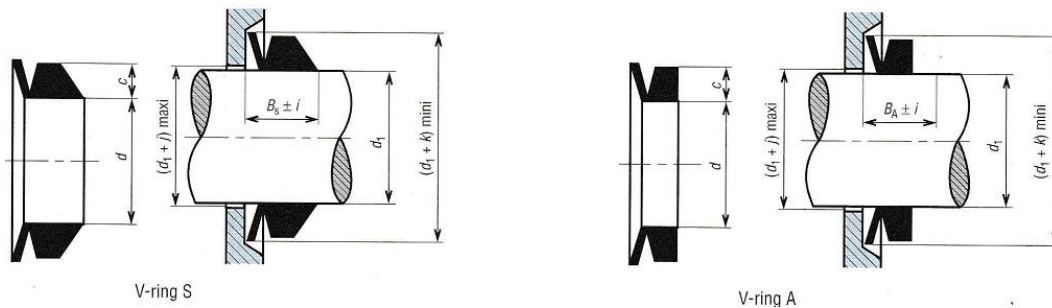


Fig. 4.28 joint V.

5- TRANSMISSION DE PUISSANCE

1. Introduction

Une transmission est un dispositif mécanique permettant de transmettre un mouvement d'une pièce à une autre. Cet élément de la chaîne d'énergie a pour fonction l'adaptation du couple et de la vitesse entre l'organe moteur et l'organe entraîné.

La transmission du mouvement est l'une des fonctions les plus courantes des éléments de la mécanique générale, c'est-à-dire des dispositifs mécaniques destinés à remplacer la main de l'homme.

Selon les mécanismes, la transmission est dimensionnée suivant des considérations concernant :

- la position d'une partie du mécanisme ;
- le mouvement souhaité ;
- la force, ou le couple recherché ;
- la puissance.

2. Transmission de puissance mécanique

2.1. Introduction

Dans de nombreuses applications industrielles, on est amené à choisir, pour des raisons économiques, comme actionneur un moteur dont le couple nominal et/ou la vitesse nominale ne correspondent pas aux conditions de l'application.



Fig. 5.1 TUCANO EMB 312 FF.

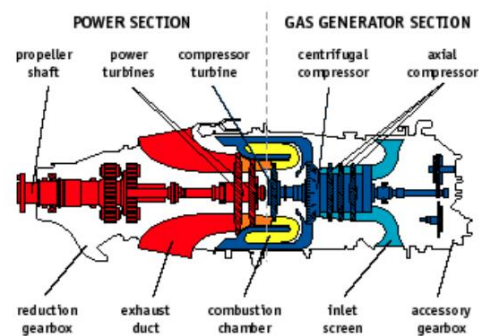


Fig. 5.2 Schéma de principe du turbopropulseur PT6A

L'actionneur dans cette avion (Fig. 5.1) est un turbopropulseur (Fig. 5.2) qui transmet sa puissance mécanique à l'hélice (Le terme français turbopropulseur est en fait dérivé du mot anglais turboprop composé de turbo et de propeller (hélice) et qui signifie littéralement moteur à hélice entraîné par une turbine).

- La vitesse en bout de pale ne doit pas atteindre la vitesse du son ; ce qui impose une vitesse de rotation de l'hélice de : $\omega_{hélice} = 3\,200 \frac{tour}{min}$
- L'arbre de la turbine de puissance tourne à : $\omega_{turbine} = 3\,300 \frac{tour}{min}$.

On constate que les vitesses de rotation $\omega_{hélice}$ et $\omega_{turbine}$ sont différentes. On ne peut donc pas relier directement l'hélice à l'arbre de la turbine de puissance. Pour satisfaire le besoin, le concepteur a intercalé entre le turbopropulseur et l'hélice un réducteur de vitesse à engrenages. La figure 5.3 présente la chaîne fonctionnelle de la transmission de puissance.

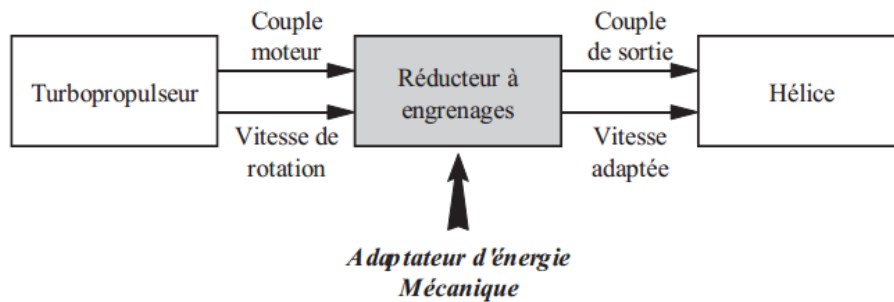


Fig. 5.3 Chaîne fonctionnelle de la transmission de puissance

La figure 5.4 représente le schéma du réducteur de vitesse à engrenage du groupe turbopropulseur sur TUCANO EMB 312 FF.

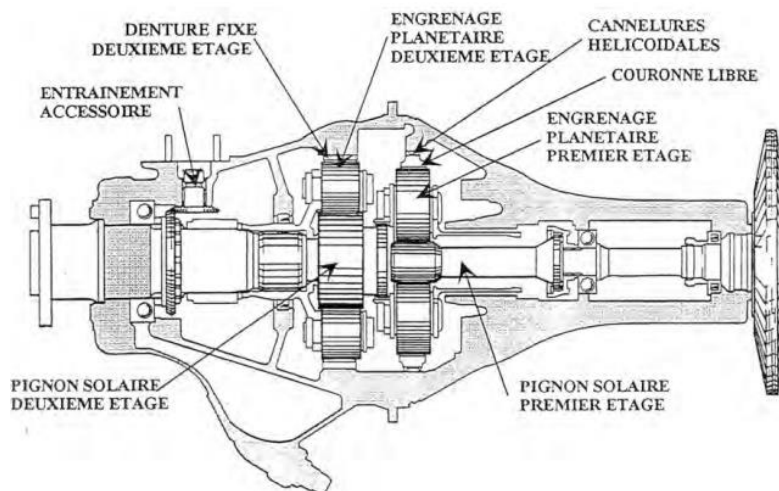


Fig. 5.4 Schéma du réducteur du groupe turbopropulseur du Tucano 312 FF

Un réducteur de vitesse réalise deux fonctions principales au sein de la chaîne fonctionnelle :

- Transmettre la puissance mécanique du moteur (turbopropulseur) vers le récepteur (hélice).
- Adapter cette puissance mécanique pour obtenir les caractéristiques désirées (couple et vitesse de rotation).

Ainsi, pour l'exemple choisi, on obtient :

- vitesses de rotation : $\omega_{hélice} < \omega_{turbine}$.
- Couple : $C_{hélice} > C_{turbine}$

a. Généralisation

Les réducteurs et multiplicateurs sont des transmetteurs de puissance (Fig. 5.5). Leur place dans la chaîne d'énergie est la suivante :

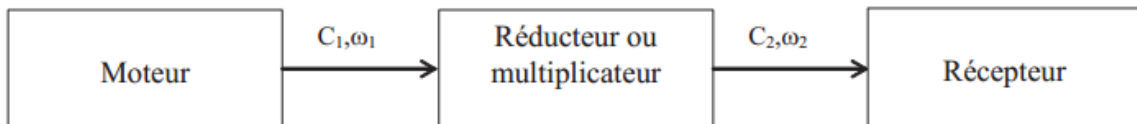


Fig. 5.5 Chaîne fonctionnelle d'une transmission de puissance

L'actionneur associé aux réducteurs et multiplicateurs, est principalement un moteur électrique, thermique, hydraulique ou pneumatique.

i. Aspect cinématique

La norme ISO 1122-1 de 1998, ainsi que la norme NF E 23-001 définissent la notion de rapport de transmission. Le rapport de transmission est défini comme étant le quotient de la vitesse angulaire de l'arbre d'entrée ω_1 par celle de l'arbre de sortie ω_2 du système transmetteur de puissance.

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad 1.1$$

Le rapport de transmission est positif lorsque les vitesses angulaires sont de même sens et négatif lorsqu'elles sont de sens inverse.

Très souvent, on utilise l'inverse du rapport de transmission pour déterminer les lois d'entrée-sortie dans un système de transmission de puissance. En effet, on connaît très souvent la vitesse de rotation à l'entrée et on recherche celle de sortie.

$$r = \frac{1}{i} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_s}{\omega_e} \quad 1.2$$

Lorsque l'on a $|r| = \frac{1}{i} = \left| \frac{\omega_2}{\omega_1} \right| < 1$, on parle de système réducteur et de rapport de réduction.

Lorsque l'on a $|r| = \frac{1}{i} = \left| \frac{\omega_2}{\omega_1} \right| > 1$, on parle de système multiplicateur et de rapport de multiplication.

On parle aussi d'inverseur lorsqu'il y a inversion du sens de rotation.

ii. Aspect énergétique

Si le rendement du réducteur ou du multiplicateur est idéal, on a la relation de conservation de la puissance mécanique entre l'entrée et la sortie du système de transmission de puissance :

$$P = C_1 \omega_1 = C_2 \omega_2 \quad 1.3$$

On en déduit alors :

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad 1.4$$

Dans le cas d'un réducteur de fréquence de rotation, il y a multiplication du couple. Dans le cas d'un multiplicateur de fréquence de rotation, il y a réduction du couple.

Si l'on prend en compte le rendement η de la transmission, on a :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{C_2 \cdot \omega_2}{C_1 \cdot \omega_1} = \frac{C_2}{C_1} \cdot r \quad 1.5$$

iii. Les principales solutions constructives

Dans le cas du groupe turbopropulseur du TUCANO, l'organe de transmission et d'adaptation de la puissance est un réducteur à engrenages. Le réducteur à engrenages n'est pas la seule solution constructive qui permet de réaliser les fonctions désirées. On classe généralement l'ensemble des solutions en deux familles.

1- Les transmissions de puissance par adhérence parmi lesquelles on distingue :

- Les transmissions de puissance par poulies - courroie.
- Les transmissions de puissance par roues de friction.

2- Les transmissions de puissance par obstacle parmi lesquelles on distingue :

- Les transmissions de puissance par pignons et chaîne.
- Les transmissions de puissance par engrenage.

Il est clair que la transmission de puissance par engrenage est la transmission phare des systèmes techniques industriels du fait de sa compacité et des rendements associés.

2.2. Transmission de puissance par poulie-courroie

C'est certainement la transmission de puissance la plus ancienne (Fig. 5.6) ; elle est utilisée depuis le début de l'époque industrielle. Elle permet de véhiculer l'énergie mécanique entre

deux arbres parallèles et relativement éloignés (En fait, on peut avoir aussi des montages de courroie entre des arbres inclinés ou perpendiculaires).



Fig. 5.6 a courroie



Fig. 5.7 b Poulie

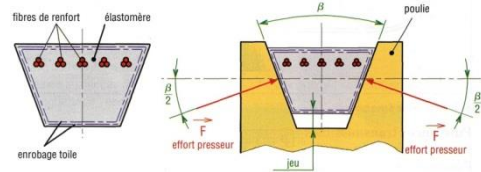


Fig. 5.8 c poulie-courroie

Ce type de transmission de puissance est encore énormément utilisé, par exemple dans l'industrie automobile (courroie d'accessoires, courroie de distribution, courroie d'alternateur). Ce type de transmission est constitué (Fig. 5.7) :

- Une poulie motrice (1), assemblée à l'arbre moteur,
- Une poulie réceptrice (2) liée à l'organe à entraîner,
- Une courroie (3) qui s'enroule sur chacune des poulies.

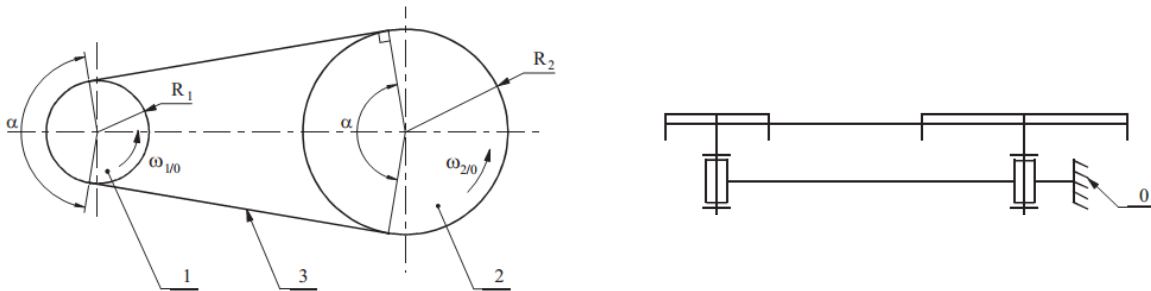


Fig. 5.7 Système poulies-courroie

Le mouvement est transmis de l'arbre moteur à l'arbre récepteur par l'adhérence de la courroie sur les deux poulies. Les courroies peuvent être plates, trapézoïdales, striées ou synchrones (Une courroie synchrone est un système de transmission de puissance par obstacle).

Au passage sur les poulies, la courroie se déforme et provoque un glissement dit fonctionnel (différent du patinage). Ce glissement introduit une variation, et donc une imprécision, du rapport de transmission. Si on admet que la transmission s'effectue sans glissement et que la courroie est inextensible, alors on peut définir le rapport de transmission par :

$$r = \frac{\omega_{\text{récepteur}}}{\omega_{\text{moteur}}} = \frac{\omega_2/0}{\omega_1/0} = \frac{R_1}{R_2} \tag{1.6}$$

2.3. Transmission de puissance par chaîne et pignons

Seule l'architecture ressemble à celle de la transmission par poulies-courroie, car la transmission de puissance par pignons et chaîne s'effectue par obstacle (Fig. 5.8). L'arbre moteur et l'arbre récepteur sont aussi relativement éloignés. La première figure représente l'engrènement de la chaîne sur une roue dentée. La deuxième figure montre la constitution d'une chaîne à rouleaux qui sont les chaînes les plus couramment utilisées.

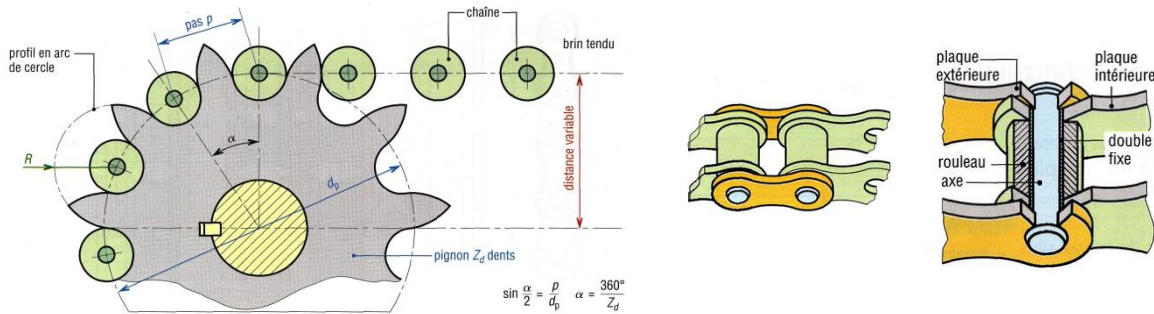


Fig. 5.8 Schéma descriptif d'un système chaîne-pignon

Les systèmes de chaîne-pignon sont utilisés en automobile pour la distribution, pour la transmission de puissance des cycles (vélo, moto), pour les systèmes de convoyage dans l'industrie. Il n'y a pas de glissement entre la chaîne et les roues dentées, ce qui garantit un rapport de transmission constant. Il s'exprime par :

$$r = \frac{\omega_{récepteur}}{\omega_{moteur}} = \frac{\omega_2/0}{\omega_1/0} = \frac{d_{p1}}{d_{p2}} = \frac{Z_1}{Z_2} \tag{1.7}$$

Les figures 5.9 et 5.10 représente les différentes chaînes et roues ou pignon.

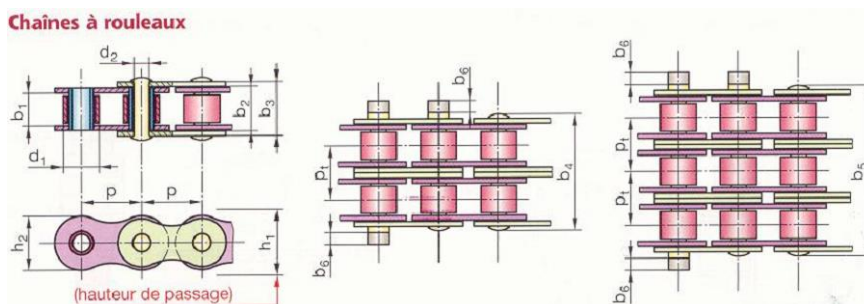


Fig. 5.9 Chaînes à rouleaux

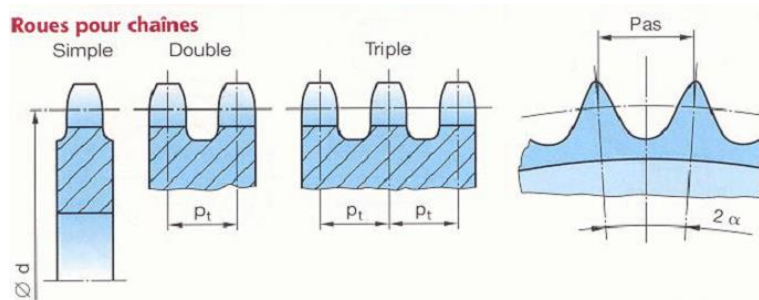


Fig. 5.10 Roue ou pignon

2.4. Transmission de puissance par engrenage

2.4.1. Principe

La transmission de puissance par engrenage véhicule l'énergie mécanique entre deux arbres sans éléments supplémentaires et par obstacles (contact direct). L'arbre moteur et l'arbre récepteur peuvent être parallèles, sécants ou orthogonaux. Ce mode de transmission de puissance est vieux de plus de 2000 ans, il était ainsi possible d'observer des roues possédant des dents faites de bâtons de bois en vue de transmettre un mouvement de rotation dans les puits à eau.

Un engrenage est la constitution d'un pignon et d'une roue dentée (le terme pignon est réservé pour la roue munie du plus petit nombre de dents).

On parle aussi de pignon arbré lorsque le pignon est directement usiné sur l'arbre et n'est pas rapporté. La figure (Fig. 5.11) représente le schéma cinématique d'une transmission par engrenage à contact extérieur. La figure (Fig. 5.11) représente l'engrènement entre le pignon 1 et la roue 2. On notera les caractéristiques suivantes (pour le pignon 1 par exemple) :

- Cercle primitif, cercle de centre O_1 et de rayon r_1 ;
- Rayon primitif $r_1 = [O_1I]$,
- Pas p_1 , distance entre deux profils consécutifs,
- Z_1 le nombre de dents.

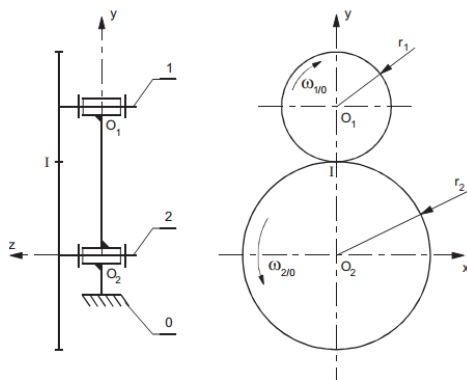


Fig. 5.11 Schéma cinématique

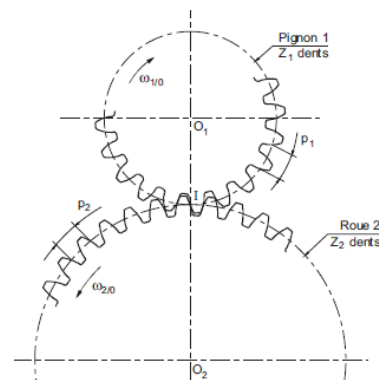


Fig. 5.12 Schéma de principe

Les dents sont taillées de telle sorte qu'il existe sur les roues dentées un diamètre fictif, appelé primitif, sur lequel les roues engrènent (presque) sans glisser (Fig. 5.12). On considère donc que les deux primitifs roulent sans glisser l'un sur l'autre.

2.4.2. Caractéristiques de la transmission

2.4.2.1. Rapport de transmission

La transmission par obstacle assure un roulement sans glissement au point I (Fig. 5.11) et (Fig. 5.12), ce qui donne un rapport de transmission constant défini par :

$$r = \frac{\omega_{\text{récepteur}}}{\omega_{\text{moteur}}} = \frac{\omega_2/0}{\omega_1/0} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad 1.8$$

Le signe moins indique un sens de rotation différent pour la roue et le pignon (significatif pour un engrenage à contact extérieur).

2.4.2.2. Puissance transmissible - Rendement

- La puissance transmissible peut être très élevée (plusieurs centaines de kW),
- Le rapport de transmission peut difficilement être inférieur à 1/8,
- Le rendement de la transmission est de l'ordre de 0,98.

2.4.2.3. Particularités de la transmission

Certainement la transmission la moins économique car elle nécessite un usinage soigné des roues et un entraxe précis des deux arbres. Elle nécessite une lubrification, ce qui permet notamment d'obtenir une durée de vie élevée. Les avantages majeurs de la transmission par engrenage par rapport aux deux précédentes sont :

- la possibilité de transmettre la puissance quelle que soit la position relative des deux arbres,
- La précision,
- Les couples et les puissances transmissibles sont élevés.

2.4.3. Conditions à respecter

2.4.3.1. Condition d'engrènement (ou condition géométrique)

Pour garantir l'engrènement, il faut que le pas du pignon (1) et celui de la roue (2) soient égaux : $p_1 = p_2$. C'est la condition géométrique, Les dents sont uniformément réparties sur la roue, on a donc :

$$\left. \begin{aligned} \Rightarrow p_1 &= \frac{2\pi \cdot r_1}{Z_1} = \frac{\pi \cdot d_1}{Z_1} \\ \Rightarrow p_2 &= \frac{2\pi \cdot r_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot d_2}{Z_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow p_1 = p_2 \Rightarrow \frac{d_1}{Z_1} = \frac{d_2}{Z_2} \quad 1.9$$

Ce rapport caractérise l'aptitude à l'engrènement des diverses roues entre-elles. Il est appelé module m . Pour une roue donnée :

$$m = \frac{d}{Z} = \frac{p}{\pi} \quad 1.10$$

Deux roues dentées qui n'ont pas le même module ne peuvent donc pas engrener. Le module est une caractéristique très importante dans la définition d'une roue dentée :

- Sa valeur est déterminée à partir d'une étude de résistance de matériaux, puis il est choisi dans une liste de valeurs normalisées,
- Il définit ensuite toutes les dimensions de la roue dentée (diamètre primitif, pas, hauteur de la dent, épaisseur de la dent, entraxe, etc...).

2.4.3.2. Condition de continuité

Pour assurer la continuité de la transmission, un couple de dents doit entrer en contact avant que le précédent ne perde le contact.

3. Transmission de puissance hydraulique

3.1. Introduction

Quand on veut réaliser un mouvement linéaire avec un actionneur électrique cela engendre généralement des coûts élevés et beaucoup d'entretiens. Si on cherche des actionneurs moins cher et simple à l'utilisation, les actionneurs pneumatiques ou hydrauliques offrent une solution! Ces actionneurs linéaires sont également appelés vérins pneumatiques ou hydrauliques.

3.2. Différents types de vérins

Il existe de très nombreux types de vérins. On les distingue par le fluide de travail (vérins hydrauliques, vérins pneumatiques), par leur action (simple action ou simple effet, double action ou double effet, rotatif), ou par d'autres caractéristiques (vérins à chambre ovale, vérins à double tige, vérins à câble, vérins télescopiques, etc.).

- Le vérin pneumatique
- **Le vérin hydraulique**
- Le vérin manuel vis-écrous
- Les vérins électriques

La figure 5.13 ci-dessous, montre un aperçu de la classification d'actionneurs.

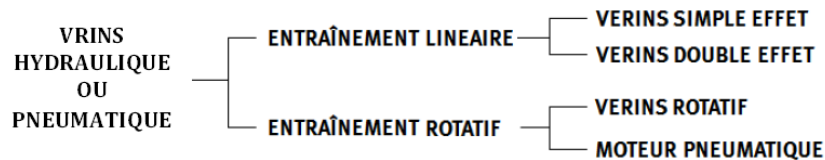


Fig. 5.13 Classification d'actionneurs.

3.3. Rôle des actionneurs hydrauliques

Les vérins transforment l'énergie hydraulique en énergie mécanique qui se traduit par le déplacement d'un piston entraînant une tige en un mouvement rectiligne (Fig. 5.14). Le principe de fonctionnement est le même pour les vérins pneumatiques ou hydrauliques. Seuls les joints, la nature des matériaux ou les épaisseurs différentes compte tenu des pressions utilisées. En outre, les vérins hydrauliques possèdent des purges d'air.

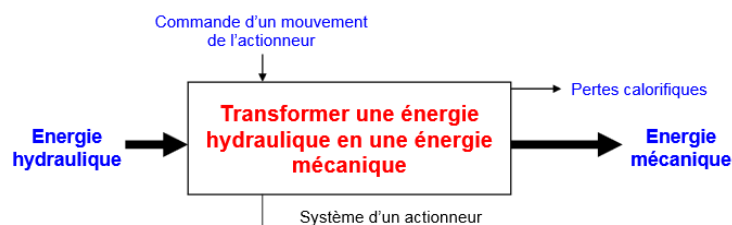


Fig. 5.14 Chaîne fonctionnelle de la transmission de puissance hydrauliques

3.4. Construction d'un vérin

Comme exemple (Fig. 5.15), vous trouverez ci-dessous la construction d'un vérin double effet standard. Le vérin se compose d'un tube, d'une culasse arrière et avant, d'un piston avec joints, d'une tige de vérin, d'un coussinet et d'un joint racleur. A cela s'ajoutent des éléments de liaison et des joints statiques.

Le corps du vérin (1) est généralement constitué d'un tube en acier étiré sans soudure. Pour augmenter la longévité du joint du piston, la surface intérieure du tube est minutieusement finie. Le corps de vérin peut également être fabriqué en aluminium, en laiton ou en acier avec des surfaces de glissement chromées.

Les culasses avant (3) et arrière (2) sont d'ordinaire en matériau de fonderie (alliages légers coulés par injection). Leur fixation sur le cylindre se fait au moyen de tirants, de filetages ou de brides. La tige de vérin (4) est pratiquement toujours en acier inoxydable.

Le coussinet (5), en bronze fritté ou en matériau synthétique, assure le guidage de la tige de vérin.

Devant le coussinet se trouve un joint racleur avec joint à lèvres intégré (6). Le joint racleur empêche la poussière et la saleté de s'infiltrer, le joint à lèvres assure l'étanchéité entre la tige

du piston et la culasse avant. Le piston (9) est également équipé d'un double joint à lèvres (7), qui assure l'étanchéité entre les deux chambres du vérin, et une bague de guidage (8).

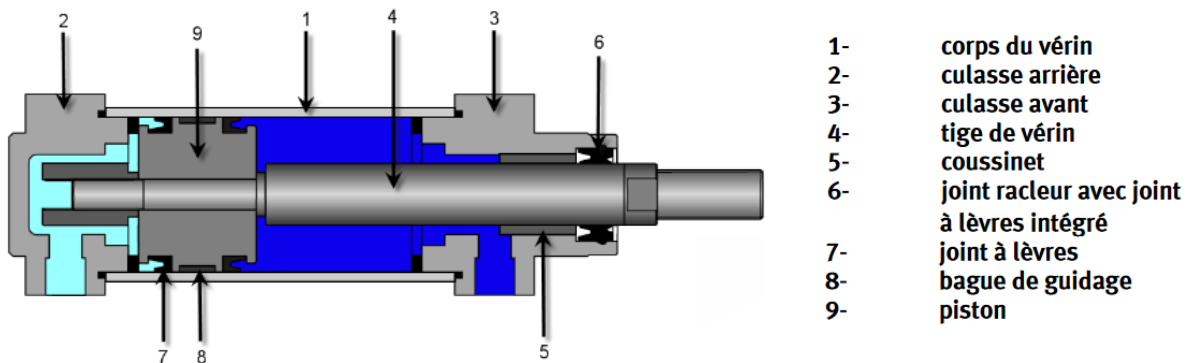


Fig. 5.15 Nomenclature des actionneurs hydrauliques

Les modèles des vérins varient selon les constructeurs. Cela signifie qu'il existe énormément de vérins différents. Cependant il existe également des vérins normalisés suivant la norme internationale ISO-VDMA. Ces normes définissent par exemple les cotes d'encombrements, le diamètre du vérin, tout comme le filetage sur la tige de vérin et le taraudage des raccords pneumatiques. Grâce à cela, les vérins normalisés des différents constructeurs sont interchangeables.

3.5. Vérin simple effet

Les vérins à simple effet (Fig. 5.16) sont appelés de cette façon, parce que l'air comprimé n'effectue une pression que sur un côté du piston, qui se met alors en mouvement grâce à la force exercée par la pression sur le piston.

Nous parlons d'un vérin à pousser (Fig. 5.17) quand le fluide occasionne la course sortante et d'un vérin à traction (Fig. 5.18) quand le fluide occasionne la course rentrante du vérin. Le piston retourne à sa position initiale au moyen d'un ressort interne ou d'une force externe. La course des vérins simple effet avec ressort de rappel incorporé est limitée par la longueur du ressort. C'est pourquoi la course maximale disponible pour des vérins simple effet est généralement de 50 mm.

Nous utilisons principalement les vérins simple effet pour clamer, éjecter et comprimer des pièces.



Fig. 5.16 Vérins simple effet

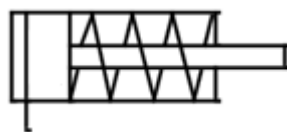


Fig. 5.17 Symbole du vérin à

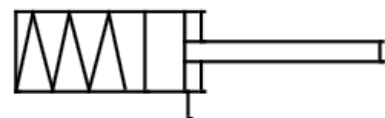


Fig. 5.18 Symbole du vérin à

pousser

traction.

3.5.1. Vérin simple effet à piston

A. Vérin à pousser

Le vérin à piston est l'exécution la plus courante des vérins à simple effet. La pression exerce une force sur le piston. Suite à cette force le piston fait sortir la tige du piston hors du vérin. Quand la pression chute le ressort incorporé du vérin fait retourner le vérin en position de repos (Fig. 5.19).

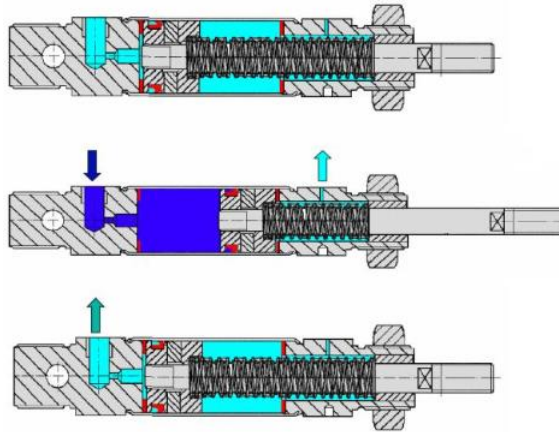


Fig. 5.19 Fonctionnement d'un vérin à pousser.

B. Vérin à traction

Ce type de vérin est principalement utilisé sur les systèmes de freinage pour les camions. Lors de la chute de pression, les vérins de freinage agissent sous la pression du ressort, ce qui augmente la sécurité ! Ci-dessous on peut voir la coupe d'un vérin à simple effet à traction (Fig. 5.20). Le fonctionnement est précisément à l'opposé de celui du vérin à pression à simple effet.

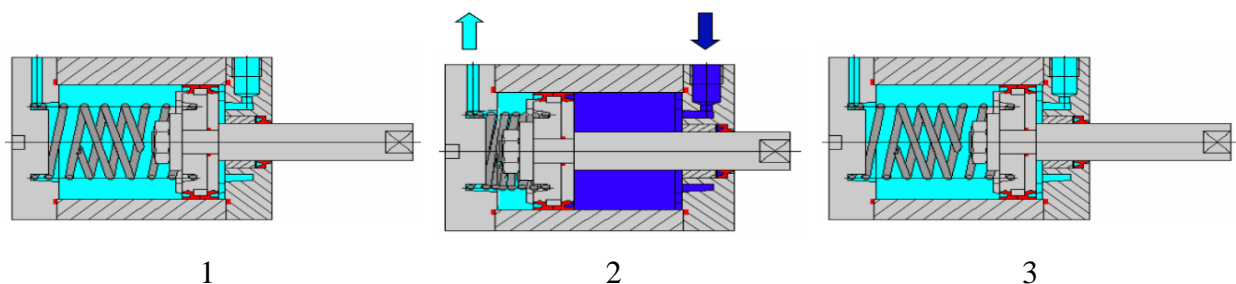


Fig. 5.20 Fonctionnement d'un vérin à traction.

3.6. Vérin double effet

Dans un vérin double effet (Fig. 5.21 et 5.22), le piston se déplace dans les deux sens grâce à la pression de fluide.



Fig. 5.21 Vérin double effet.

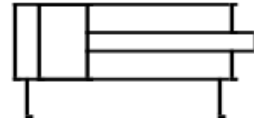


Fig. 5.22 Symbole du vérin double effet

Tant lors de la course sortante que rentrante, le vérin développe une force proportionnelle à la pression de l'air et à la surface de fonctionnement du piston. Les vérins à double effet sont utilisés là où une force est exercée dans les deux sens (figure 5.23). La pression appliquée à un orifice éloigne le piston de cet orifice à condition que l'autre orifice soit ouvert. La vitesse du piston est limitée car il risquerait d'emmagasiner trop d'énergie cinétique et de taper sur les fonds.

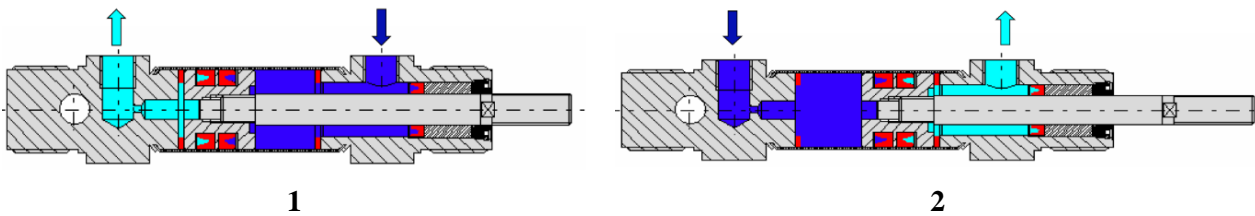


Fig. 5.23 Fonctionnement d'un vérin à double effet.

Partie 2
PROCEDES
D'ELABORATION DES
PIECES

6- PROCÉDÉS DE MISE EN FORME

1. INTRODUCTION

L'objectif premier de la mise en forme des métaux est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérance donnée. Les principaux procédés de mise en forme des métaux sont apparus progressivement, donnant naissance par la suite à diverses variantes, parfois très nombreuses. Les formes modernes des divers procédés sont apparues récemment pour assurer la production en grande série de pièces à faible coût. On note dans le tableau 6.1 quatre stades principaux d'émergence des divers procédés.

Procédés primitifs	Date d'émergence	Formes modernes
Forgeage libre du produit chaud	5000 avant J.-C.	Matriçage, estampage entre matrices sur pilon, presses mécaniques, hydrauliques Forge à froid des aciers Forge à tiède, Forgeage sans bavure
Fonderie	5000 avant J.-C.	Fonderie sous pression En moules perdus ou permanents Coulée centrifuge de tubes Coulée continue de brames, blooms, billettes
Formage des métaux en feuille par martelage, repoussage	5000 avant J.-C.	Opérations d'emboutissage Cisailage, Cintrage, Profilage Chaudronnerie et travail des tôles fortes Fluotournage, Repassage des produits tubulaires, Hydroformage
Étirage de fils	premiers siècles	Tréfilage multipasse Étirage de profilés
Usinage par burin, bédane, foret, lime, scie	premiers siècles	Coupe par tournage, fraisage, perçage, brochage, taraudage, sciage Usinages par abrasion : meulage, rectification, polissage, rodage, jet d'eau abrasif, ultra-sons
Gravure par eau forte	XV ^e siècle	Usinages physico-chimique : par électroérosion, faisceaux laser ou d'électrons, par jet d'eau, oxycoupage, chalumeau plasma, électrochimique, chimique
Laminage	XVI ^e siècle	Laminages sur train tandem, cage réversible, cage universelle, cage Sendzimir, l Laminoirs de tubes à pas pèlerin, Laminoirs Manesmann perceurs...
Filage à froid de Pb, métaux mous	XIX ^e siècle	Filage à chaud des alliages Al, Cu Filage à chaud (1200°C) au verre des aciers Extrusion (20 C) des aciers phosphatés savonnés

Tableau 6.1 Évolution et formes diverses des procédés de mise en forme des métaux et alliages métalliques.

On peut regrouper les procédés de mise en forme des pièces en trois grandes familles :

- Fabrication des pièces par déformation plastique,
- Fabrication des pièces à partir des métaux liquides,
- Fabrication des pièces à partir des métaux en poudre.

1.1 Fabrication des pièces par déformation plastique

Le principe de ce procédé est de déformer un matériau à l'aide d'un outillage spécifique. Cette déformation peut se réaliser à chaud ou à froid sur des matériaux plastique ou métallique. Les matériaux métalliques à mettre en forme peuvent se présenter sous la forme de tôle ou de lopin. Le principe du procédé est d'amener la déformation dans le domaine plastique à l'aide de matrice, de manière à donner à la matière la forme souhaitée. Le tableau 6.2 présente les différents procédés de déformation plastique.

Matière de base	Sollicitation	Procédé	Série	Exemples	
Solide	Pression directe	Forgeage	Pièces unitaires ou petites séries	Pièces de décoration, meubles...	
		Laminage		Rails de trains, poutrelles, tôles...	
		Estampage	Grandes séries	Vilebrequins, leviers, bielles...	
	Pression indirecte	Filage direct	Grandes séries	Visseries, douilles...	
		Filage inverse	Grandes séries	Boîtes de coca	
		Tréfilage	Grandes séries	Fils de bobines	
Feuille (Tôle)	Cisaillement	Cisailage		Tôlerie	
		Poinçonnage et découpage		Tôles perforée	
	Flexion	Pliage		Tôleries	
		Roulage et cintrage		Boîtes de tomates, virole...	
	Traction	Emboutissage	Grandes séries	Automobiles, électroménagers (casseroles)	
	Haute énergie	Formage par explosion	Pièces unitaires ou petites séries	Fond des grandes citernes	
		Formage par électrohydraulique			
		Formage par électromagnétique	Grandes séries		
	Poudre	Pression + haute température	Frittage	Grandes séries	Plaquettes de coupe en carbure, plaquettes de frein

Tableau 1.2 Procédés de déformation plastique.

1.1.1 Forgeage

Le forgeage consiste en déformer un lopin par des chocs successifs grâce à un marteau pilon. L'objectif de ce procédé n'est pas seulement de mettre en forme le matériau mais aussi de renforcer les caractéristiques mécaniques. Parmi les procédés de forge existants, on peut distinguer :

- Forge libre ;
- Forge par estampage (forgeage des métaux ferreux) ;
- Forge par matriçage (forgeage des métaux non ferreux).

1.1.1.1 Forge libre

Le forgeage permet d'élaborer des pièces brutes par déformation plastique du métal sous l'effet de choc ou de pression. Il est le plus souvent exécuté à chaud et conduit à l'obtention d'ébauche dont la forme est assez proche de la pièce finie. La matière d'œuvre est comprimée suivant une direction et se déplace librement suivant les deux autres. Le forgeage libre permet de réaliser toutes les formes possibles quel que soit le matériau de la pièce mais il est utilisé pour réaliser des pièces unitaires ou en petite série.



Fig. 6.1 Forgeage libre au marteau manuel.



Fig. 6.2 Forgeage libre au marteau-pilon.

Avantage:

- Pas d'outillage spécialisé selon la pièce à obtenir ;
- Les pièces forgées ont une résistance mécanique supérieure aux mêmes pièces usinées, du fait du fibrage de la pièce consécutif au forgeage.

Inconvénients :

- Nécessite beaucoup d'énergie (métal chauffé) ;
- La précision est médiocre.

1.1.1.2 Estampage et Matricage

Principe :

Un lopin de métal chauffé et calibré (avec des dimensions précises) se déforme pour remplir les deux demi-empreintes de deux matrices appliquées l'une contre l'autre sous l'action d'une forte pression ou d'une série de chocs. L'estampage et le matricage sont adaptés à une production en série.

Avantages :

- Les mêmes que pour le forgeage libre, avec plus de rapidité et une meilleure précision.

Inconvénients :

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Prix de revient élevé des matrices rapidement « usées ».

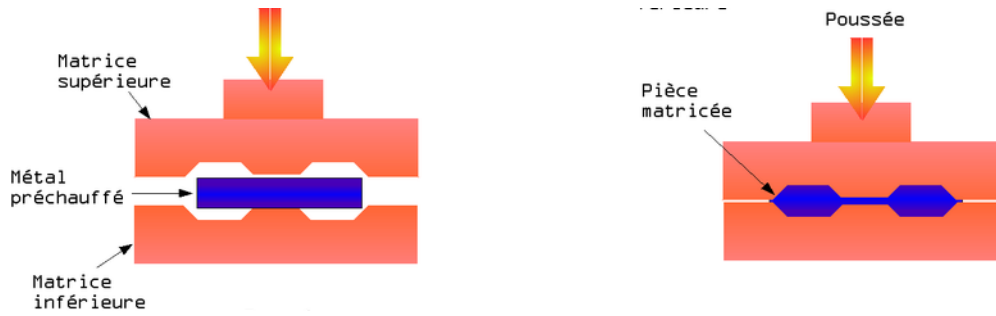


Fig. 6.3 Estompage ou matriçage.

1.1.2 Laminage

Le laminage est un procédé qui permet d'obtenir des feuilles ou des profilés de géométrie variée, mais de section pleine. En général, le laminage est réalisé à partir de lingots provenant des hauts fourneaux qui ont été préalablement chauffés (figure 6.4).

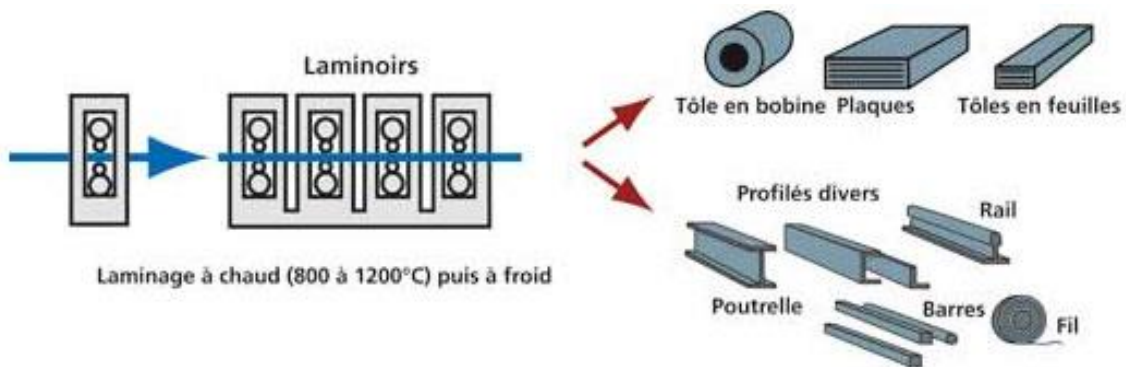


Fig. 6.4 Différentes produit de laminage.

Le produit passe entre deux cylindres tournant en sens inverse qui lui font subir une réduction d'épaisseur au profit de la longueur (figure 6.5). Par laminage, on obtient des produits en feuille (tôle) (figure 6.7) ou des profilés (rail, barre, poutrelles) (figure 6.6). La réduction d'épaisseur varie de 20 à 90 % suivant la température, le type de laminoirs et le nombre de passe. On distingue le laminage à chaud et le laminage à froid. Le laminage à froid est généralement utilisé pour obtenir des épaisseurs faibles et inférieures ou égales à 3mm.

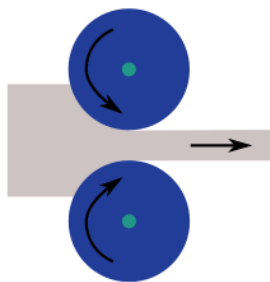


Fig. 6.5 Principe du laminage

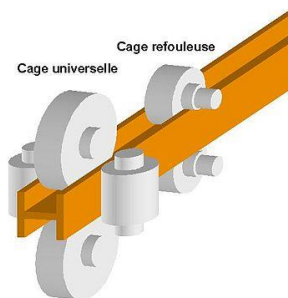


Fig. 6.6 Laminage des poutrelles



Fig. 6.7 Laminage des tôles

1.1.3 Filage

Le filage (appelée aussi l'extrusion) est un procédé au cours duquel on oblige la matière à passer dans un orifice de section déterminée (figure 6.8), cette orifice est appelée la filière (figure 6.9). Le métal est façonné sur toute sa longueur selon la forme de la filière (figure 6.10). Dans le cas du filage direct le métal s'écoule dans le sens de déplacement du poinçon. Lorsque le métal s'écoule autour ou le long du poinçon ou à l'intérieure, le filage est dit inverse dans ce cas le métal se déplace contre le sens du poinçon.

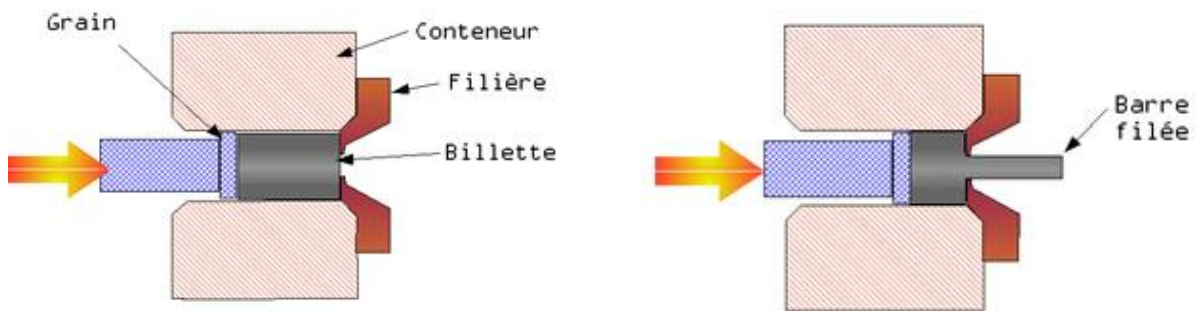


Fig. 6.8 Procédé de filage.

Avantages :

- Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;
- Bons états de surface ;
- Sections des profilés pouvant être creux et très complexes.

Inconvénients :

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Formes limitées à des « extrusions ».



Fig. 6.9 Les filière.

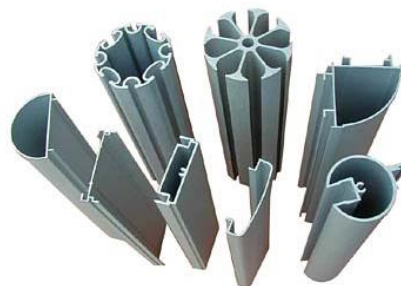


Fig. 6.10 Profils en aluminium extrudés.

1.1.4 Emboutissage

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique d'une surface de métal qu'on appelle flan, entraînée par un poinçon dans une matrice. Un serre-flan est utilisé évitant la formation des plis dus au déplacement radial de la tôle (figure 6.11).

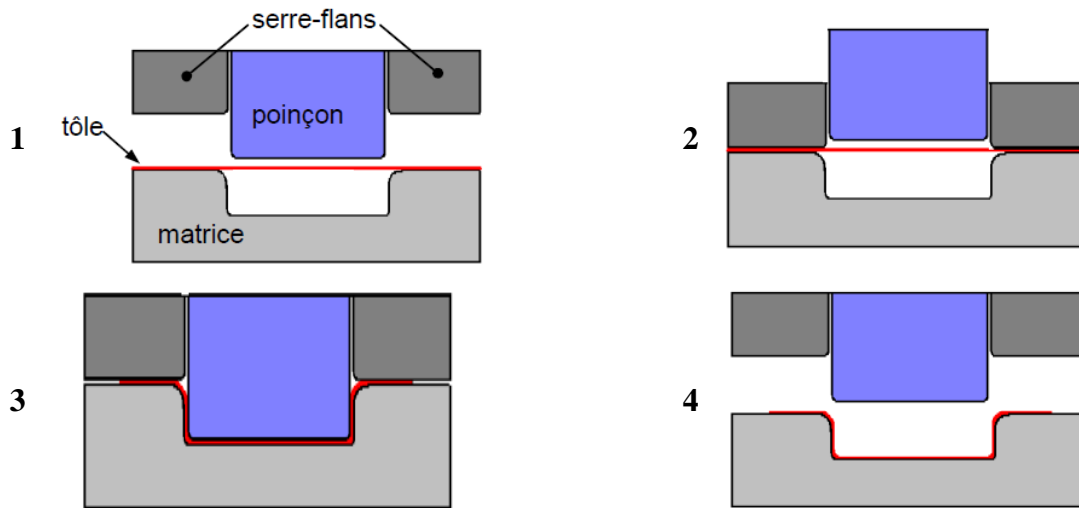


Fig. 6.11 Principe de l'emboutissage

L'outillage est spécifique à la forme de la pièce à obtenir, et le seuil de rentabilité exige donc une production en série (figure 6.12).



Fig. 6.12 Produit obtenu par l'emboutissage

1.1.5 Roulage et Cintrage

Un produit plat ou profilé est soumis à des flexions successives très rapprochées les unes des autres, il se produit une incurvation. Le roulage permet de réaliser des pièces de révolution à contour fermé (figure 6.13) alors que le cintrage convient plutôt au formage des pièces à contour ouvert et de section quelconque (opération effectuée avec une cintreuse) (figure 6.14).



Fig. 6.13 Roulage des tôles.

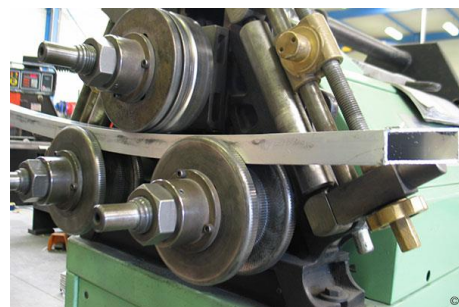


Fig. 6.14 Cintrage des tubes

1.1.6 Pliage

Le pliage est une déformation permanente effectuée à froid sur une tôle plane. La surface obtenue présente des plis rectilignes (figure 6.15). Sous l'action d'une force appliquée sur un flan reposant sur deux ou plusieurs appuis ou encastré à une extrémité, le produit fléchi (figure 6.16).

Avantages :

- Outillage simple : presses hydrauliques avec différents poinçons et matrices.

Inconvénients :

- Ressaut élastique résiduel difficile à prévoir ;
- Longueur de pliage limitée.

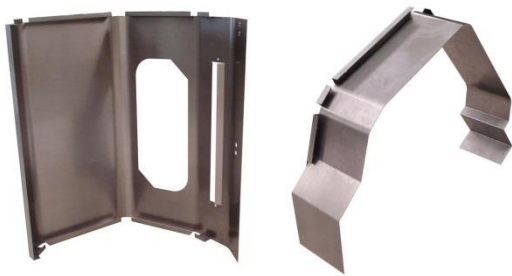


Fig. 6.15 Pliage des tôles.

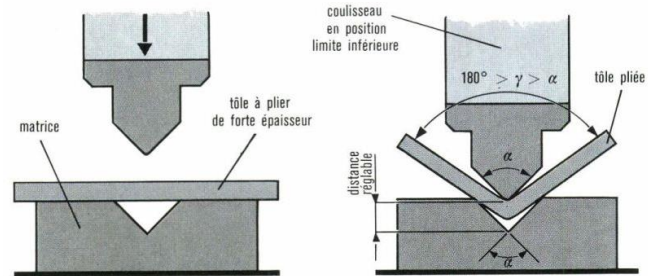


Fig. 6.16 Principe de Pliage

1.2 Fabrication des pièces à partir des métaux liquides (Moulage / Fonderie):

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes (figure 6.17). Le moulage proprement dit consiste à réaliser des pièces brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à obtenir), le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule.

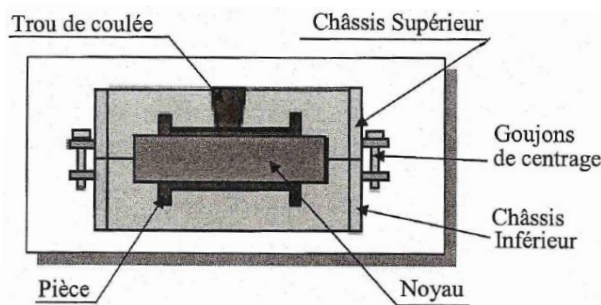


Fig. 6.17 Différentes partie et composants d'un moule.

C'est une technique est souvent utilisée car elle est non seulement économique mais elle permet d'avoir :

- Des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés) (figure 6.18).
- Des pièces est identique.
- Des pièces massives telles que bâtis, volants etc.



Fig. 6.18 Moulage des pièces complexes.

Inconvénients :

- Nécessite un outillage important et coûteux (surtout pour les moules métalliques) ;
- La pièce à obtenir doit posséder des épaisseurs approximativement constantes ou variant faiblement, ne pas posséder d'arêtes vives (congés et arrondis vivement conseillés), et avoir des surfaces de dépouilles ;
- L'état de surface (rugosité) obtenu est moyen ;
- La précision obtenue est moyenne (retraits de matière et déformation en refroidissant) ;
- Ces deux derniers inconvénients obligent souvent à ajouter des usinages au niveau des surfaces fonctionnelles de la pièce ;

Dans la spécialisation du moulage, on distingue pratiquement les moulages suivants :

A. Selon la nature des métaux et alliages

- Fonderie de fonte.
- Fonderie d'acier.
- Fonderie d'aluminium et ses alliages.
- Fonderie de cuivre, bronzes, laitons etc...

B. Selon l'utilisation

- Fonderie d'art.
- Fonderie d'ornement (bijoux).
- Fonderie de mécanique industrielle.

C. Selon le procédé de moulage

- Moulage en sable (manuel ou mécanique).
- Moulage en carapaces.

- Moulage à la cire perdue.
- Moulage en coquilles (moule permanent).

Dans ces procédés le moule peut-être permanent ou non permanent (destructible). Le moule non permanent est utilisé qu'une seule fois, pour extraire la pièce, il faut le détruire, l'empreinte est obtenue par moulage du matériau constitutif autour d'un modèle réalisé en bois ou en métal. Le moule permanent peut servir un grand nombre de fois, il est réalisé en plusieurs parties pour faciliter l'extraction de la pièce. Il est utilisé surtout lorsque la quantité de pièces à couler est importante. Le choix des procédés de moulage dépend du métal à couler. En général la température de fusion du métal coulé doit- être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule.

1.3 Fabrication des pièces à partir des métaux en poudre.

Le principe de ce procédé est de comprimée dans un moule (c'est la phase de compression), Une poudre ou un mélange (figure 6.19), généralement métallique puis chauffée dans un four à une température inférieure à la température de fusion (c'est la phase de frittage) (figure 6.20).



Fig. 6.19 Poudres métalliques.

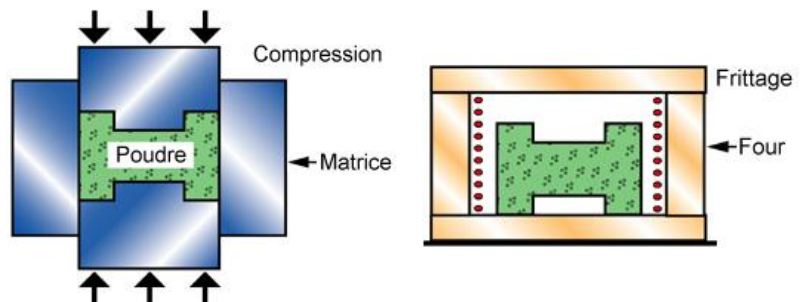


Fig. 6.20 Principe de Frittage

Sous l'effet de la chaleur et grâce au phénomène de diffusion, la poudre va s'agglomérer pour former une pièce (figure 6.21).



Fig. 6.21 Pièces fritté.

7- PROCÉDÉS D'USINAGE

1. Introduction

L'**usinage** est une famille de techniques de fabrication de pièces par enlèvement de la matière. Le principe de l'usinage est réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement de la matière à froid et sans déformation, de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues. La quantité de matière enlevée est dite copeaux et l'instrument avec lequel est enlevée la matière est appelé outil de coupe. L'opérateur utilise des machines dites machines-outils pour réaliser l'usinage d'une pièce.

2. Définition d'une machine-outil

Une machine-outil est un appareil destiné à faire fonctionner des outils mécaniquement, le mouvement étant. D'ailleurs transmis à la machine soit à la main, soit par l'intermédiaire d'un moteur. Les machines-outils employées pour le travail des métaux sont très diverses et très répandues, et de nos jours les exigences de la construction ont amené à produire des types d'une grandeur vraiment colossale. Les machines employées dans les ateliers de construction sont:

- Les tours établis avec des dispositions et des dimensions variables selon les formes et les dimensions des pièces qu'ils sont destinés à travailler.
- Les machines à percer employées pour le perçage et l'alésage des pièces les plus diverses.
- Les machines à fraiser employées très utilement pour le façonnage des pièces détachées.
- Les machines à aléser destinées à l'alésage des cylindres des machines à vapeur, des corps de pompes, etc.
- Les machines à raboter appliquées au dressage de pièces, telles que les bâtis de machines, plaques de fondation, etc. Les limeuses sont d'un emploi très répandu dans les ateliers d'ajustage, pour le rabotage des pièces détachées.

3. Coût

L'usinage a un coût : temps de travail, surépaisseur de matière à enlever, usure de la machine-outil, consommables (outil, lubrifiant, courant électrique), stockage. On ne pratique donc que les usinages nécessaires.

4. Coupe

Le principe de base de l'usinage est l'enlèvement de matière. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance) (figure 7.1).

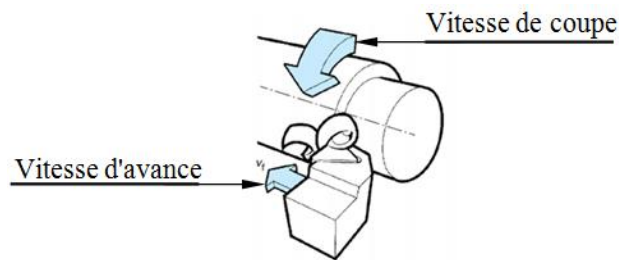


Fig. 7.1 Vitesse de coupe dans l'usinage du tour.

5. Génération des surfaces

Il existe deux manières de générer la surface recherchée : par travail de forme ou par travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme c'est la forme de l'arête tranchante de l'outil qui conditionne la surface obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la conjonction des mouvements de coupe et d'avance qui définit la surface finale. Il y'a quatre types de surface :

- Surfaces planes,
- Surfaces de révolution,
- Surfaces spéciales,
- Surfaces associées

6. Copeaux

Copeaux est la partie de matière qui se détache lors de la coupe dans un procédé d'usinage (figure 7.2). L'état de la surface usinée dépend des conditions de coupe.

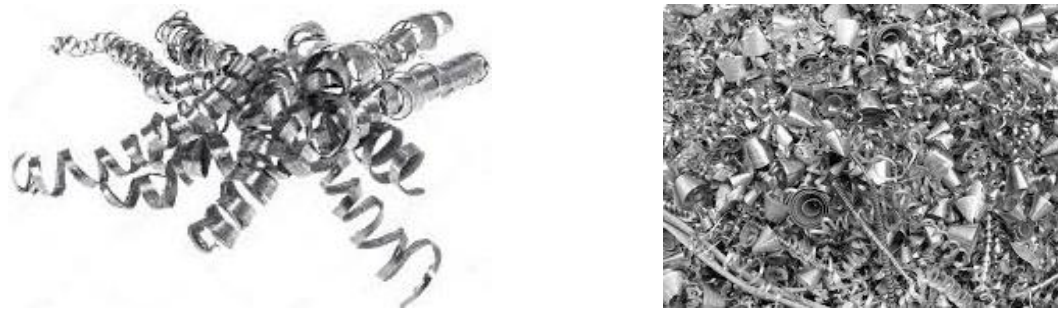


Fig. 7.2 Copeaux.

7. Procédés d'usinage

L'usinage peut être fait soit avec une machine traditionnelle soit avec une machine à commande numérique (CN). L'usinage peut être fait par plusieurs techniques dans le but d'améliorer la précision et le rendu de la pièce. Les différents procédés d'usinage sont (les symboles sont ceux de la norme NFE 05-019 de 1992) :

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| ▪ le brochage (br) ; | ▪ la rectification (re) ; |
| ▪ le fraisage (frr) ; | ▪ le tournage (to) ; |
| ▪ le mortaisage (mo) ; | ▪ le polissage (po) ; |

- le perçage (pc);
- le meulage (me) ;
- le rabotage (rb) ;
- le sciage, le cisailage ;

8. Outils de coupe

Certains outils sont en acier ; c'était le cas de premiers outils d'usinage, et ils sont de plus en plus remplacés par des céramiques de type carbures. Certains aciers à outils sont appelés aciers rapides (AR, ou HSS pour *high speed steel*). Ces outils doivent être régulièrement affûtés

Les outils de coupe modernes sont composés d'un support appelé porte-outil en acier et d'une partie amovible appelée plaquette de coupe en carbures (figure 7.3). La plaquette est fixée par une vis ou une bride sur son support. Cela permet d'adapter parfaitement son outil selon la matière que l'on souhaite usiner, de l'opération que l'on doit effectuer ou des contraintes particulières. Cette plaquette dispose de plusieurs arêtes de coupe qui permettent une réduction des coûts d'utilisation.

La plaquette est donc une pièce d'usure. Cette géométrie permet

- de ne pas avoir à changer l'outil complet ;
- de réduire le coût de l'outil, les carbures étant bien plus chers que l'acier ;
- d'avoir des propriétés mécaniques différentes : les carbures sont très durs ce qui permet un usinage à grande vitesse, mais sont fragiles.

Ce dispositif n'est pas possible pour des fraises de petit diamètre. On utilise donc des fraises en carbure monobloc, c'est-à-dire entièrement en carbure.



Fig. 7.3 Plaquettes en carbure.

9. Usinabilité

L'**usinabilité** désigne la possibilité d'usiner une matière. Cette notion s'applique à un **couple outil-matière** (COM). Elle intègre des notions de performance, en particulier la capacité à réaliser la forme définie en une durée raisonnable, mais aussi d'usure d'outil (et donc sa durée de vie), de consommation d'énergie, et globalement de coût de fabrication. L'usinabilité prend en compte les paramètres de :

- métallurgie : composition du matériau, microstructure ;
- mécanique : résistance à la rupture (dureté), allongement à la rupture, taux d'écroutissage ;

- tribologie : frottement entre l'outil et la matière, lubrification, usure ;
- thermique : dissipation de la chaleur.

10. Tournage

10.1. Définition

Le tournage mécanique est un procédé d'usinage par enlèvement de matière qui consiste en l'obtention de pièces de forme cylindrique ou/et conique à l'aide d'outils coupants sur des machines appelées tour (figure 7.4). Il est également possible de percer sur un tour, même si ce n'est pas sa fonction première.

En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, ou-bien montage entre pointes. Alors que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant. La combinaison de ces deux mouvements permet l'enlèvement de matière sous forme de copeaux.

Les tours à bois et les tours mécaniques conventionnels laissent aujourd'hui de plus en plus la place à des tours à commande numérique, entièrement automatisés.

10.2 Organes d'un tour parallèle (figure 7.4)

- Le bâti : Généralement en fonte. C'est l'ossature de la machine.
- Le banc : Il est droit car rectiligne d'une extrémité à l'autre.
- Glissières : Elles sont de profil prismatique et assurent un guidage précis du traînard et de la poupée mobile. Elles sont rigoureusement planes. Il ne faut rien déposer sur les glissières.
- Poupée fixe : Elle est fixée sur le banc de manière à ce que l'axe de la broche soit parallèle aux glissières. Elle tient les mécanismes de commande de la broche et des chariots (longitudinal et transversal).
- Poupée mobile : Ses fonctions sont les suivantes :
 1. Supporter la pièce à usiner,
 2. Support d'outils (forets,...).
- Le traînard : Il repose sur le banc par une portée prismatique de forme identique à celle du banc. Il se déplace sur le banc au moyen du système engrenage et crémaillère.
- Chariot transversal : Positionné perpendiculairement par rapport au traînard. Il supporte le petit chariot porte-outil.
- Chariot porte-outil : Il peut s'orienter sur 360°. Il sert au déplacement de l'outil pour de petites longueurs (90 mm).
- Tourelle : Elle s'orienter aussi sur 360°. Elle sert à maintenir le porte-outil ou directement l'outil lui-même.

- La boîte des avances et filetages : Située en-dessous de la poupée fixe. Elle commande par un mouvement d'engrenages, la vitesse de rotation de la vis mère et de la barre de chariotage.

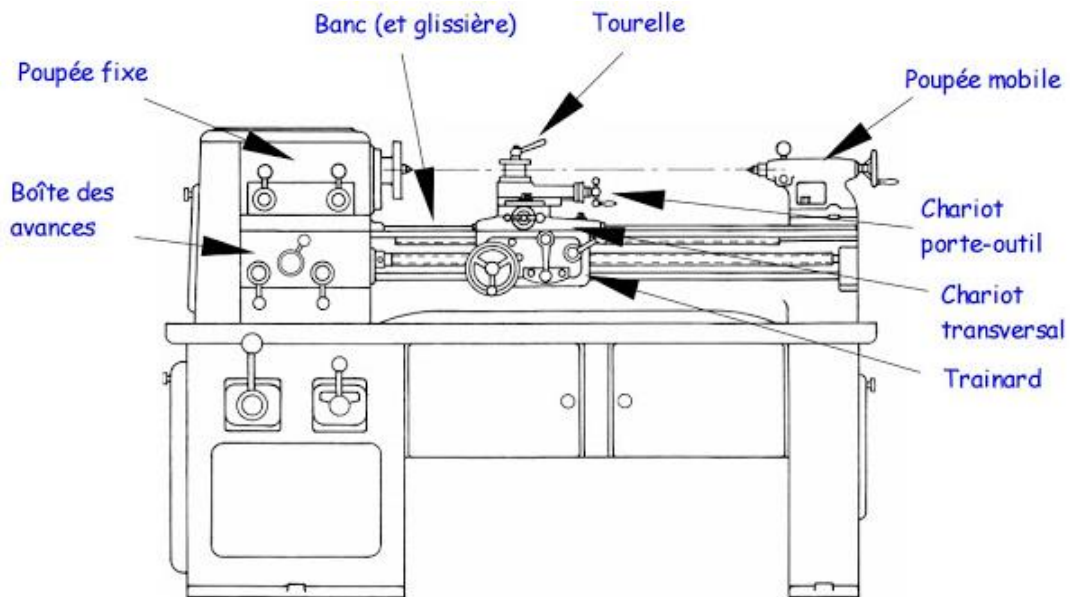


Fig. 7.4 Organe d'un tour parallèle.

10.3 Montages des pièces sur un tour

Il existe trois principaux montages de la pièce à usiner sur le tour :

10.3.1 Montage en l'air

C'est un montage sur mandrin effectué pour les pièces courtes ($L < 4D$). Une des extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre reste libre (figure 7.5).

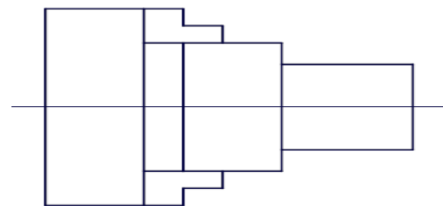
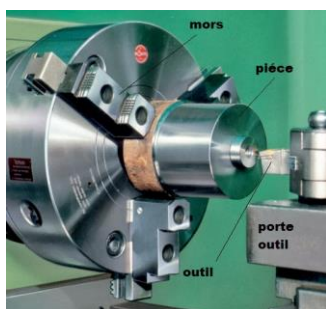


Fig. 7.5 Montage en l'air.

10.3.2 Montage mixte

Il est utilisé pour des pièces relativement longues ($4D < L < 8D$). Une des deux extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre extrémité est soutenue par de la poupée mobiles (figure 7.6).

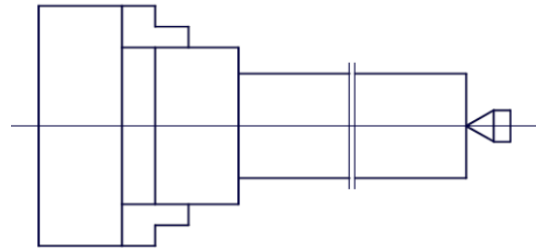
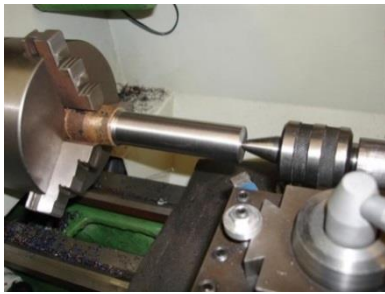


Fig. 7.6 Montage mixte

10.3.3 Montage entre-pointes

Pour l'usinage des pièces longues ($L > 8D$), on utilise le montage entre pointes. La pièce est soutenue par ses deux extrémités, par deux pointes plus lunette (figure 7.7).

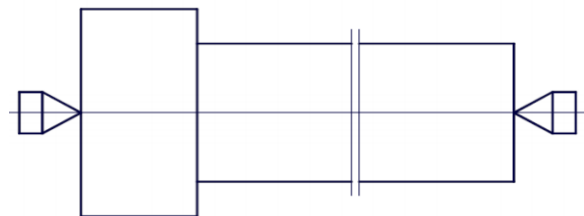
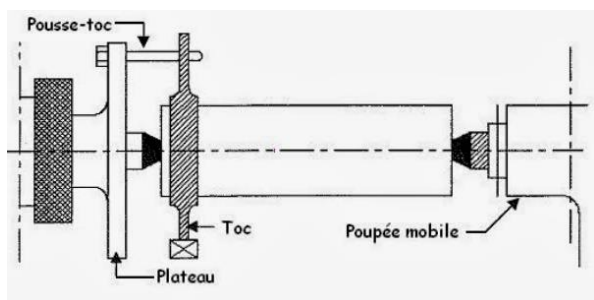


Fig. 7.7 Montage entre-pointes

10.3.4 Mandrin

Le porte pièce est utilisé pour les pièces de révolution et est fixé à la broche (partie en rotation). Un mandrin à mors concentriques (figure 7.8), les mors étant synchronisés pour serrer la pièce bien au centre. La forme d'un mors est représenté sur la figure 7.9. Cette forme permet de serrer une pièce par l'extérieur, mais aussi par l'intérieur (un cylindre par exemple).

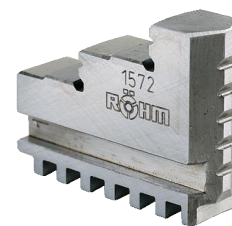
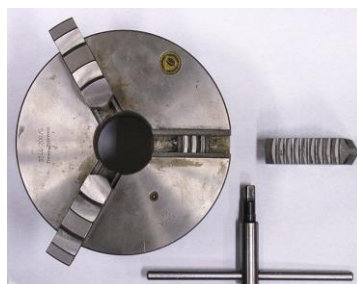


Fig. 7.8 Mandrin à mors concentriques

Fig. 7.9 Mors

10.3.5 Point

Dans un tours il y a deux points. La pointe fixe (poupée fixe) (figure 7.10) et la pointe mobile (poupée mobile) (figure 7.11). Pour ce faire, il faut, dans la pièce à usiner et sur chaque flanc, un trou de centre qui a un angle au sommet égal à celui de la pointe c'est-à-dire 60° . On utilisera pour forer ces trous une mèche à centrer.



Poupée fixe

Fig. 7.10 Poupée fixe (Pointe fixe)



Fig. 7.11 Poupée mobile (Pointe mobile)

10.3.6 Lunettes

Sachez qu'il existe des lunettes fixes et lunettes mobiles (figure 7.12). Seront utilisées lors des travaux de pièces longues et flexibles. Les lunettes fixes peuvent être utilisées aussi comme support à l'extrémité de la pièce.



Fig. 7.12 Lunettes.

10.4 Outils de coupe

L'outil de tour désigne un des nombreux outils utilisés, avec ou sans porte-outil (figure 7.13). Les outils de tournage mécanique existent dans une grande variété de formes en fonction des conditions particulières des opérations effectuées.



Fig. 7.13 Outils de coupe.

10.5 Les différents types d'opérations

En **tournage** les outils ne comportent qu'une seule arête tranchante dont l'engagement dans la matière provoque la coupe de celle-ci. Le déplacement de l'outil se fait en une ou deux directions principales de travail, selon l'angle de direction de l'arête de coupe. Si cet angle est droit, un seul déplacement sera possible, quand il a des valeurs inférieures à cette valeur

on peut l'utiliser pour travailler dans les deux sens, longitudinal et transversal, des déplacements permis sur la machine. Le mouvement de coupe M_c est réalisé par la pièce qui est serrée dans un porte-pièce appelé mandrin. Il est possible de réaliser des opérations de tournage extérieur et intérieur.

Sur la figure suivante (figure 7.14) sont reproduites les diverses opérations d'usinage pouvant être mises en place sur les machines outils de type tours.

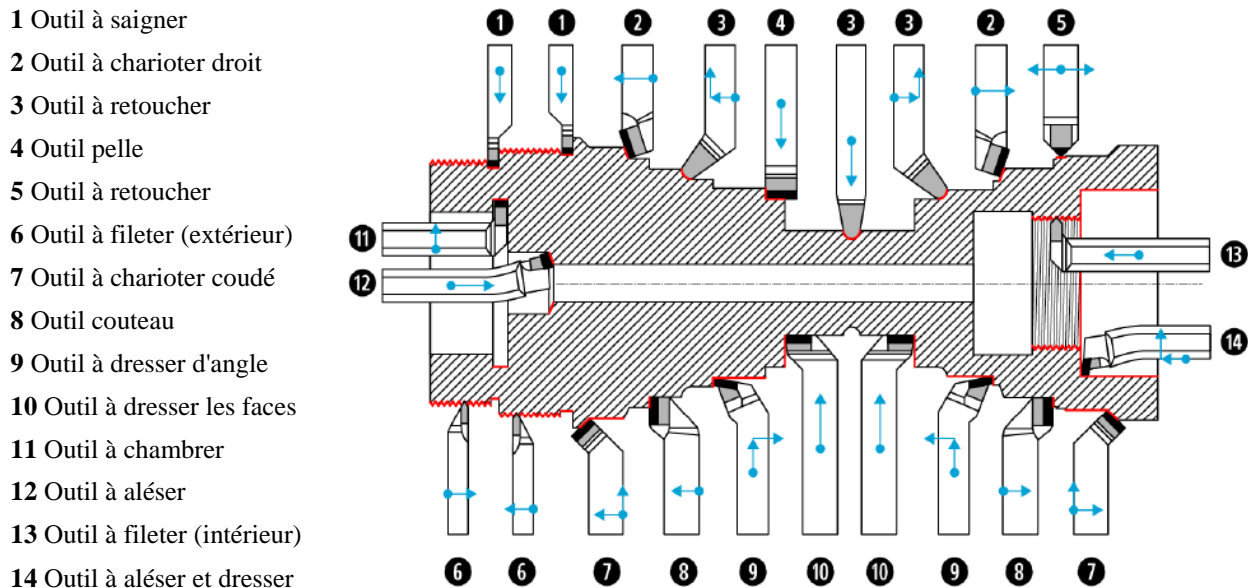


Fig. 7.14 Diverses opérations d'usinage en tournage.

11. Fraisage

11.1. Définition

Le fraisage est un procédé d'usinage dont le rôle primordial est l'obtention de surfaces planes de forme concave ou convexe. L'outil employé pour effectuer ce travail est la fraise. En tournant, la fraise enlève sur la pièce, des copeaux. L'enlèvement des copeaux s'effectue grâce à la combinaison du mouvement de rotation de la fraise et le mouvement d'avance de la pièce.

11.2 Classification des fraiseuses

Concernant les fraiseuses manuelles il existe trois types :

11.2.1 Fraiseuse universelle

La machine de base est une fraiseuse à axe horizontal dont la table est orientable (figure 7.15); les mouvements d'avance sont donnés à la table ; l'arbre porte-fraise est animé du mouvement de rotation uniquement. La machine est conçue de telle manière qu'elle peut recevoir une tête universelle et des équipements spéciaux tels que : appareils diviseurs, tables circulaires, appareil à mortaiser, etc. Elle permet en principe l'exécution de toutes les opérations

courantes : son universalité est due surtout à la possibilité de la convertir en fraiseuse horizontale ou verticale et de pouvoir assurer l'entraînement des appareils diviseurs.

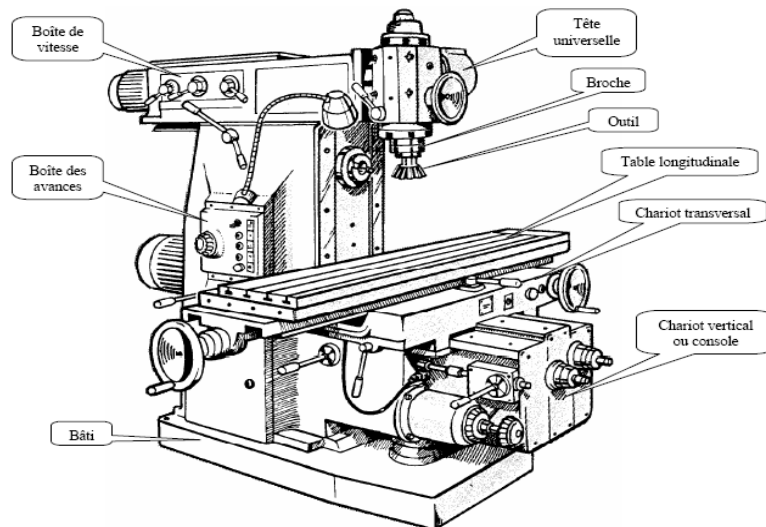


Fig. 7.15 Fraiseuse universelle.

11.2.2 Fraiseuse verticale

Ce qui différencie le plus cette dernière de la précédente, c'est que la tête verticale possède un déplacement axial de broche (figure 7.16) ; la table n'est pas orientable ; elle n'est pas conçue pour recevoir des organes de conversion; la tête ne peut être démontée mais elle est orientable dans un plan. Elle est surtout employée pour exécuter des surfacages, rainures et épaulements avec des capacités de coupe bien supérieures, comparé à une machine tête universelle.



Fig. 7.16 Fraiseuse verticale



Fig. 7.17 Fraiseuse horizontale

11.2.3 Fraiseuse horizontale

Trois mouvements d'avance de la table porte-pièce ; la table n'est pas orientable. La machine est rarement commercialisée sous cette forme. Les constructeurs prévoient dans la plupart des

cas la possibilité d'y adapter des accessoires - tête universelle - tête verticale. Elle est souvent cataloguée comme fraiseuse universelle (figure 7.17).

11.3 Procédés de fraisage

11.3.1 Fraisage en roulant :

L'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner (figure 7.18). La fraise coupe avec son diamètre. La charge de la machine en est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite.

Les à-coups provoqués par cette façon de faire donnent une surface ondulée et striée. Pour pallier ces défauts, on utilisera une fraise à denture hélicoïdale. L'amélioration enregistrée s'explique ainsi: la denture est chargée et déchargée progressivement.

11.3.2 Fraisage en bout

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner (figure 7.19). La fraise coupe avec son diamètre, mais aussi avec sa partie frontale.

Les copeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière. La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure

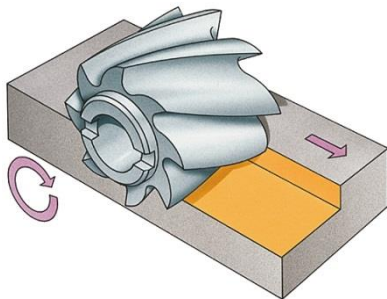


Fig. 7.18 Fraisage en roulant

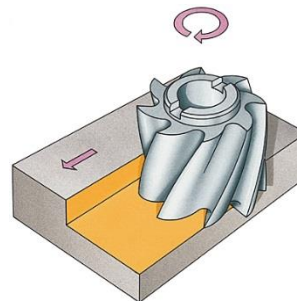


Fig. 7.19 Fraisage en bout

11.4 Mode de coupe

Il existe deux modes de coupe, selon le sens de rotation de la fraise et la direction du déplacement de la pièce à usiner.

11.4.1 Fraisage en avalant

Le sens de rotation de la fraise et celui du déplacement de la pièce à fraiser vont dans la même direction (figure 7.20 et 7.21). Les tranchants de la fraise attaquent le copeau au point d'épaisseur maximal. Cette façon de faire, en fraisage horizontal, plaque la pièce sur la table de la fraiseuse et donne des surfaces finies de bonne qualité. Ce principe nécessite l'utilisation

d'une machine robuste disposant d'une table équipée d'un système de translation avec rattrapage de jeu, ce qui est le cas sur les machines modernes.



Fig. 7.20 Fraisage en roulant en avalant

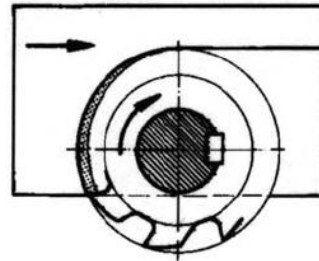


Fig. 7.21 Fraisage en bout en avalant

11.4.2 Fraisage en opposition

Le mouvement d'avance de la pièce à fraiser est opposé au sens de rotation de la fraise (figure 7.22 et 7.23). Cette dernière attaque le copeau au point d'épaisseur minimal. Dans ce cas, les dents glissent sur la surface usinée avant rotation de la fraise. Cette façon de faire provoque un grand frottement d'où une usure plus rapide des tranchants de la fraise. De plus, l'effort de coupe en fraisage horizontal tend à soulever la pièce à usiner.

Les copeaux peuvent également être entraînés par la fraise et se coincer entre la pièce et les arêtes de coupe, endommageant la pièce et la fraise.

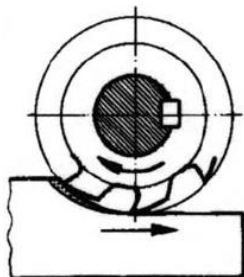


Fig. 7.22 Fraisage en roulant en opposition

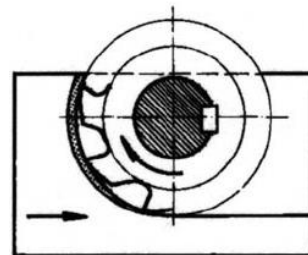


Fig. 7.23 Fraisage en bout en opposition

11.5 Operations de fraisage

En fraisage les outils comportent plusieurs arêtes tranchantes. Par rapport au tournage le déplacement selon les axes principales de la machine (trois directions de travail) n'est plus réalisé par l'outil mais par la pièce qui est fixée dans un porte-pièce appelé étau fraise (figure 7.24). Le mouvement de coupe M_c est réalisé par la outil.



Fig. 7.24 Etai.

Il existe différents types de fraise, pour pouvoir faire différentes opérations. Dans ces opérations nous pouvons retrouver :

11.5.1 Le surfacage

c'est le fait d'enlever une couche de matière sur une surface plane, pour atteindre un état de surface donnée (RA), ce faisant avec une fraise « à surfacer » (figure 7.25).

11.5.2 Le profilage

permet d'usiner avec le côté latéral de la fraise, changeant selon la forme de la fraise, ceci permet de créer différentes formes, comme des formes arrondies avec les fraises concave et convexe (figure 7.26)..

11.5.3 Le rainurage

sert à usiner 3 surfaces en même temps afin de créer des rainures, droites ou à formes, dans la matière, cette opération nécessite des fraises « à rainurer ». - L'épaulement quant à lui permet d'usiner 2 surfaces plates perpendiculaires (figure 7.27).

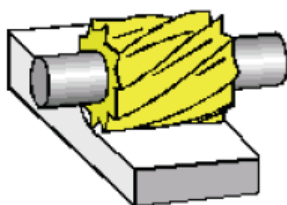


Fig. 7.25 Surfacage

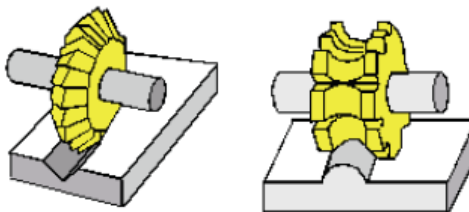


Fig. 7.26 Profilage

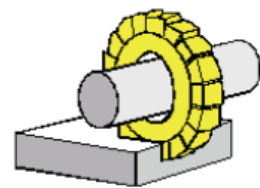


Fig. 7.27 rainurage

8- PROCÉDÉS DE SOUDAGE

1. Introduction

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place prépondérante dans la construction des bateaux, bâtiments, fusées, tuyaux, réservoirs. Car il permet d'adapter au mieux les formes de construction. La clé des problèmes qui se posent lors d'une opération de soudage relève du métier du soudeur ou du constructeur soudeur dont la démarche doit inclure, outre l'opération de soudage, les problèmes se posant en amont et en aval de celle-ci, à savoir :

- La conception des assemblages soudés : découpage de l'assemblage et disposition des joints.
- La préparation des pièces avant soudage : géométrie des bords, état des surfaces,
- La mesure de la qualité des soudures et de la tenue de l'assemblage en service.

Le soudage est un assemblage définitif exécuté sur des pièces métalliques qui s'impose pour diverses raisons : dimensionnelles (un pont), structurelles (un réservoir), constructives (une carrosserie), de poids (un panneau), économiques (un plancher) ou autres.

Le soudage est présent dans les différents secteurs industriels :

- Le transport terrestre (automobile, ferroviaire, machines agricoles et de construction),
- Les bâtiments et travaux publics (assemblage métallique),
- La construction navale (structures off-shore, navires, sous-marins),
- L'énergie (hydroélectricité, nucléaire, gaz et pétrole notamment, équipements électriques et électroniques),
- L'aéronautique.

2. Définition du soudage

Le **soudage** est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage (figure 8.1), de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler (continuité de la nature des matériaux assemblés : matériaux métalliques, matière plastique, etc.) soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Les soudures sont dites :

- La soudure **Autogène** (homogène): Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder

- La soudure **Hétérogène** : Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder.

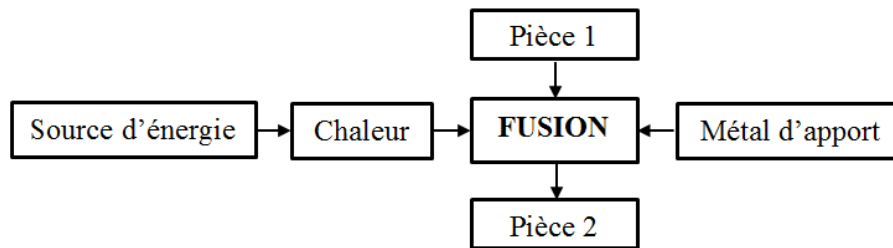


Fig. 8.1. Principe du soudage

Un procédé de soudage implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé de soudage comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné. Ainsi, après avoir identifié le bon procédé de soudage à utiliser, il reste plusieurs paramètres à déterminer tels que le choix du métal d'apport, l'intensité du courant ou de la tension

3. Soudabilité

On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé et pour une application donnée, lorsqu'il se prête moyennant les précautions à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments. De cette construction il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement.

On voit apparaître la notion fondamentale de « continuité de la nature des matériaux assemblés » et plus particulièrement de continuité métallique. Cette exigence implique la mise en jeu, entre les éléments à assembler, des forces de liaison inter-atomiques de type métallique (pour les métaux). L'intervention de ces dernières exige l'absence de tout corps étranger susceptible de constituer une barrière à leur action.

Ces considérations permettent déjà de noter que :

- L'identité chimique des métaux assemblés n'est pas fondamentalement nécessaire.
- Les techniques d'assemblage mécaniques (rivetage, boulonnage, agrafage, ou par adhésion « collage ») ne répondent pas à la définition de soudage.

4. Principales technologies de soudage

Pour obtenir un joint soudé dans les conditions idéales, il doit y avoir entre les pièces soudées une continuité parfaite des :

- Propriétés mécaniques,

- Métallurgiques,
- Physiques.

Pour unir deux surfaces de façon satisfaisante, celles-ci doivent être exemptes d'oxyde, de films organiques ou de gaz absorbés. (Par exemple l'oxydation de l'aluminium a un effet important sur le point de fusion, $T_{\text{fusion}} 2054^{\circ}\text{C}$ au lieu de $T_{\text{fusion}} 660^{\circ}\text{C}$).

L'exécution de la soudure nécessite quatre conditions :

- Disposer d'une source d'énergie pour unir les surfaces par pression ou par fusion.
- Le procédé doit pouvoir éliminer la contamination des deux surfaces à unir.
- Pendant l'opération de soudage, éviter la contamination atmosphérique ou ses effets.
- Avoir un contrôle métallurgique de la soudure.

Les procédés de soudage doivent être parfaitement adaptés aux conditions de service exigées d'où la nécessité de choisir judicieusement le procédé ainsi que les conditions dans lesquelles sera exécutée la soudure.

Pour obtenir la continuité atomique entre les deux parties à assembler et si les conditions nécessaires précédentes sont respectées, on peut envisager deux modes de soudage :

- Par pression en phase solide
- Par fusion en phase liquide

4.1. Soudage par pression

Le soudage par pression regroupe tous les procédés de soudages dans lesquels on obtient en général sans métal d'apport, par application d'une pression suffisante pour obtenir une déformation plastique des zones à souder, un chauffage localisé permet la liaison atomique de la zone de soudage. La liaison est obtenue par déformation à froid si le métal est suffisamment ductile, ou à chaud pour amollir le métal.

4.2. Soudage par fusion

Qui consiste à porter à fusion les bords des pièces à souder à l'aide d'une source d'énergie tels qu'arc électrique, flamme de gaz, réaction chimique, énergie de rayons laser, jet de plasma etc. Sous l'action de la chaleur les bords du métal sont fondus et établissent une liaison entre eux ou encore avec un métal d'apport, ainsi formant le bain de fusion, lequel après solidification constitue la soudure.

5. Les différentes sources d'énergies de soudage

Il existe plusieurs procédés de soudage caractérisés par le type de source d'énergie pour réchauffement et par l'état du métal à l'endroit du soudage (figure 8.2).

Selon le type de la source d'énergie on distingue :

- Énergie thermochimique.
- Énergie thermoélectrique.
- Énergie mécanique.
- Énergie de focalisée.

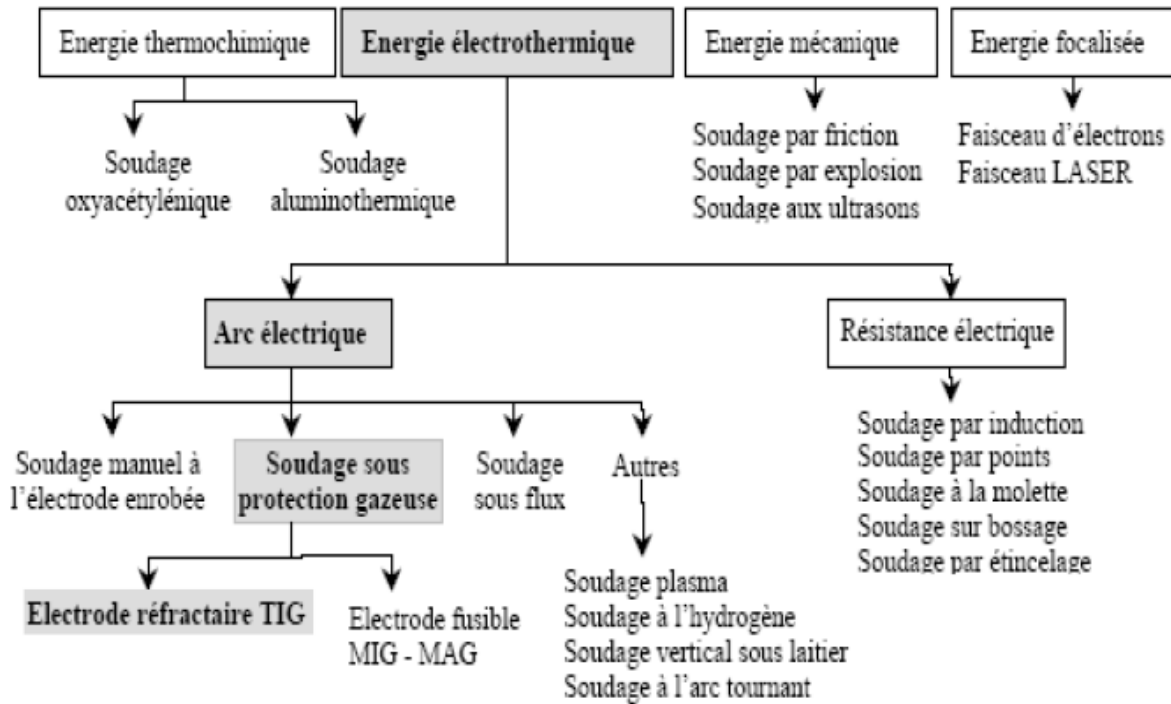


Fig. 8.2. Classification des procédés de soudage en fonction des sources d'énergie.

6. Principaux procédés de soudage

Les différents procédés de soudage se sont souvent différenciés par l'activation d'énergie, les modes d'action ou les moyens de protection contre l'atmosphère.

En réalité, les procédés de soudage peuvent également être classés soit par mode d'apport d'énergie nécessaire ou soit par mode de protection du métal chaud (tableau 8.1).

Activation	Activation complémentaire	Protection
Fusion	Sans	Impérative
	Compression	facultative
Chauffage	Compression	Eventuelle
Frottement	Compression	Non

Tableau 8.1. Classement des procédés de soudage.

6.1. Soudage au gaz (au chalumeau)

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur de soudure est produite par la combustion de gaz (figure 8.3). La composition oxygène-acétylène (oxyacétylénique) est

aujourd'hui presque exclusivement employée. L'emploi de flux décapants permet de combattre l'oxydation en cours de soudage.

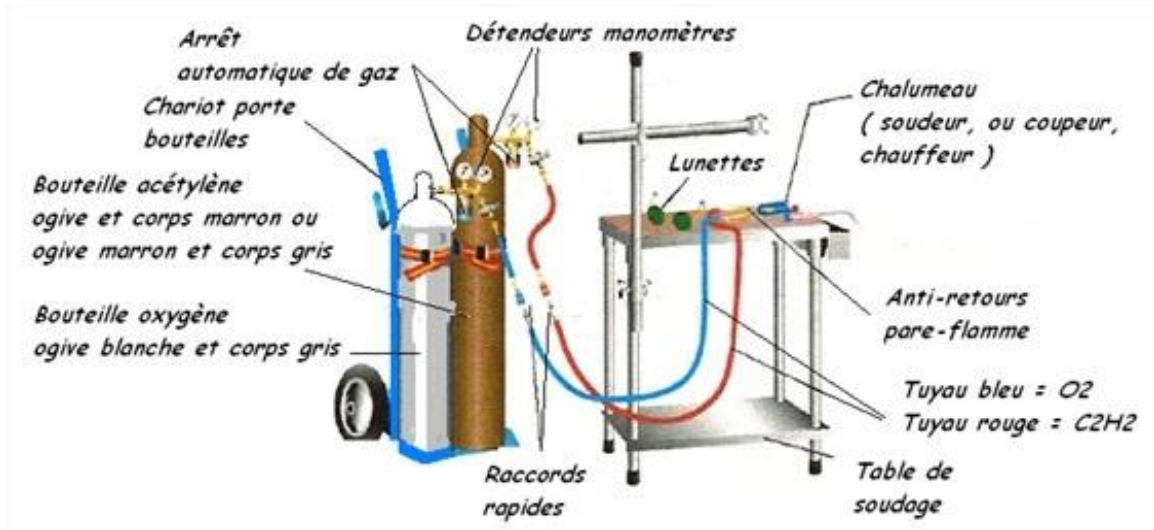


Fig. 8.3. Circuit de soudage au gaz

Ce procédé se subdivise comme suit :

- sans flamme auxiliaire.
- avec flamme auxiliaire réductrice.

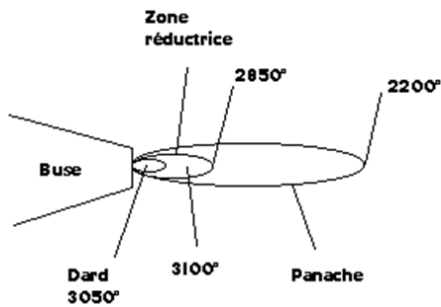


Fig. 8.4. La flamme



Fig. 8.5. Chalumeau.

On notera qu'une trop forte proportion d'oxygène entraîne une chaleur plus importante mais le risque d'oxydation augmente.

Son aspect économique et sa rapidité d'exécution font que ce procédé est beaucoup employé par les artisans.

6.2. Soudage à l'arc :

Le terme « soudage à l'arc » définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil-électrode). La chaleur de l'arc peut varier entre 3 500 et 5 550 °C. Le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion.

Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage (figure 8.6).

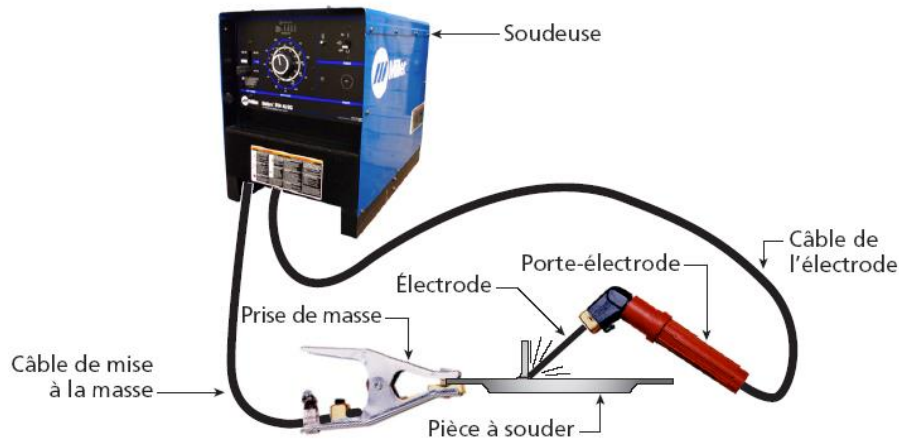


Fig. 8. 6. Circuit de soudage à l'arc

Un arc électrique est donc un gaz ionisé dans lequel circule un courant électrique ; l'arc se forme entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder, comme l'illustre la figure 8.7. Dans un procédé de soudage à l'arc, on utilise aussi souvent un flux solide ou en poudre ou un gaz, qui sert à protéger le bain de fusion de l'air ambiant.

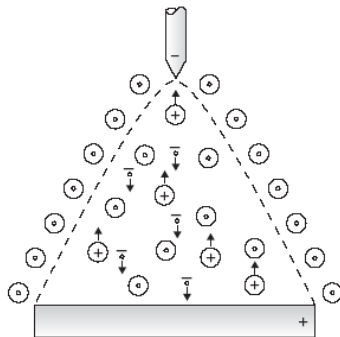


Fig. 8.7. Principe d'un arc électrique

6.2.1. Différents types de la soudure à l'arc électrique

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

6.2.1.1. Soudage SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

L'électrode, Le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée est relativement simple. Une soudeuse, généralement à courant constant, est connectée à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder (figure 8.8). Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique.

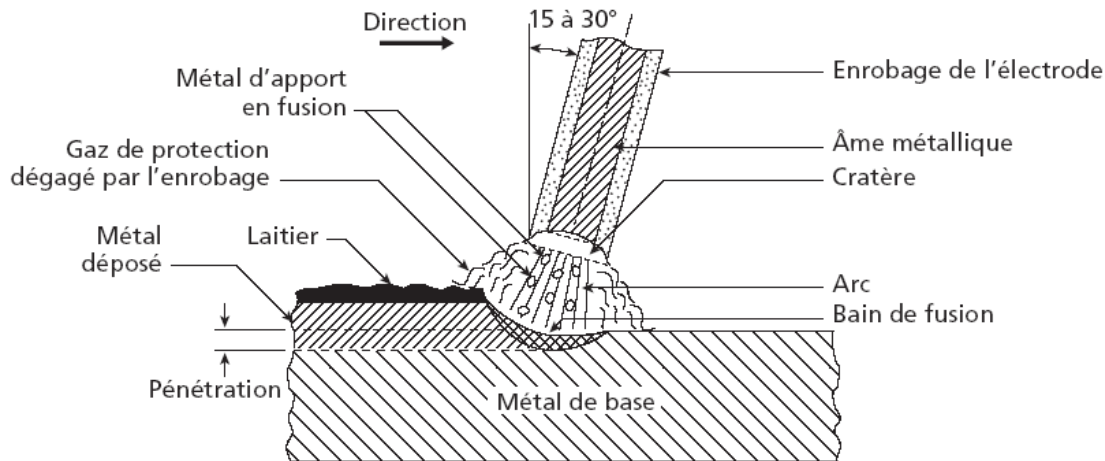


Fig. 8.8. Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

Ce type de soudage exige une vitesse et un angle de soudure constants, et la pointe de l'électrode doit demeurer à la même distance de la pièce. C'est la raison pour laquelle on rapproche le porte-électrode lorsque le métal fond.

❖ Avantages et inconvénients

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux. Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V.

❖ Applications

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple, des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons. Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier.

6.2.1.2. Soudage GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou TIG (Tungsten Inert Gas)

Le procédé de soudage sous protection de gaz inerte avec électrode réfractaire de tungstène s'effectue avec une torche. Celle-ci comprend l'électrode de tungstène, maintenue sur un

porte-électrode et placée à l'intérieur de la buse qui canalise le gaz de protection (figure 8.9). L'arc électrique se forme entre l'électrode de tungstène et le métal de base.

Le procédé GTAW peut se réaliser sans métal d'apport (ex. pour le soudage de plaques minces) ou en utilisant des baguettes de métal d'apport.

La torche permet de maintenir l'électrode en place, de canaliser le gaz de protection et d'assurer la continuité du courant pendant le soudage. Lorsqu'on travaille avec des courants élevés (150 A et plus), on utilise une torche refroidie par du liquide, et une torche refroidie au gaz pour des courants allant jusqu'à 150 A.

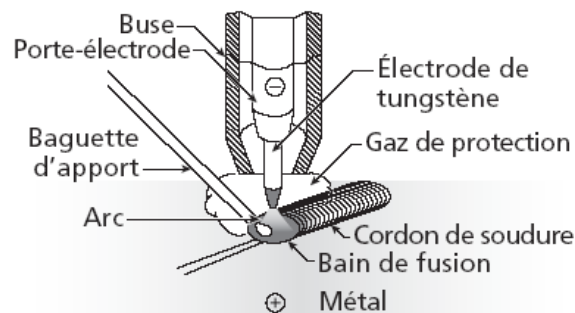


Fig. 8.9. Principe du procédé GTAW

La taille de la buse de la torche augmente en fonction de l'intensité du courant. Le GTAW pulsé implique que la soudeuse est munie d'un mode pulsé, ce qui permet au soudeur d'avoir un meilleur contrôle du bain de fusion. Cette propriété facilite le soudage en position ou le soudage de tôles très minces.

❖ Avantages et inconvénients

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).

Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.

La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.

On peut l'utiliser avec ou sans métal d'apport. Celui-ci, lorsque présent, prend la forme d'une baguette que l'on fait fondre au-dessus du bain de fusion.

Le procédé GTAW est rarement utilisé pour souder l'acier au carbone. Lorsqu'il l'est, il faut utiliser des baguettes d'apport contenant un désoxydant pour éviter les soufflures.

❖ **Applications**

On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteurs, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces.

Par ailleurs, le procédé GTAW pulsé (GTAW-P) est particulièrement utilisé en aéronautique, en électronique et en pétrochimie ou pour le soudage de tubes, notamment des tubes minces en position fixe.

Le procédé GTAW pulsé (GTAW-P) produit la même pénétration que le GTAW, tout en réduisant les risques de déformations et en facilitant le soudage en position.

6.2.1.3. GMAW (Gas Metal Arc Welding)

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (figure 8.10).

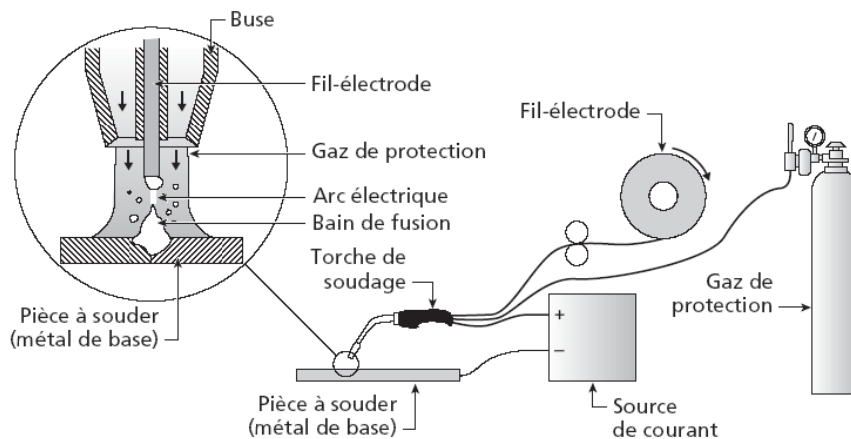


Fig. 8.10. Principe de fonctionnement du procédé GMAW

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Comme pour le GTAW, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection.

Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Il peut être poussé ou tiré. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable. On distingue deux catégories de GMAW, en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

- Le procédé **MIG** (Metal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium) ;
- Le procédé **MAG** (Metal Active Gas) qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif.

Soudage MIG (Metal Inert Gas)

Encore appelé semi-auto, il est très adapté à la petite industrie : facile d'emploi ; arc visible ; pas de laitier ; grande vitesse de soudage ; temps de formation réduit. Il utilise une électrode fusible (fil se déroulant automatiquement) travaillant en atmosphère inerte (gaz protecteur : argon, argon + hélium, etc.) afin de protéger le bain de fusion.

Soudage MAG (Metal Active Gas)

Variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO₂ et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone.

❖ **Avantages et inconvénients**

Le procédé de soudage GMAW soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium (où il tend à remplacer de plus en plus le GTAW) et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés.

Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier. La pénétration obtenue peut être profonde ; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible.

Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables.

Pour les métaux mous (ex. l'aluminium), il est préférable d'utiliser un dévidoir poussé-tiré.

❖ Applications

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé. Les applications spécifiques dépendent généralement du mode de transfert choisi.

6.2.1.4. FCAW (Flux Cored Arc Welding) et MCAW (Metal Cored Arc Welding)

Le soudage avec fil fourré utilise un fil-électrode fourré qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport, procurant un flux de protection supplémentaire (FCAW). Dans le cas du MCAW, c'est une poudre métallique qui remplit le fil-électrode. Le principe de base est le même que pour le GMAW, seul le fil-électrode diffère (figure 8.11).

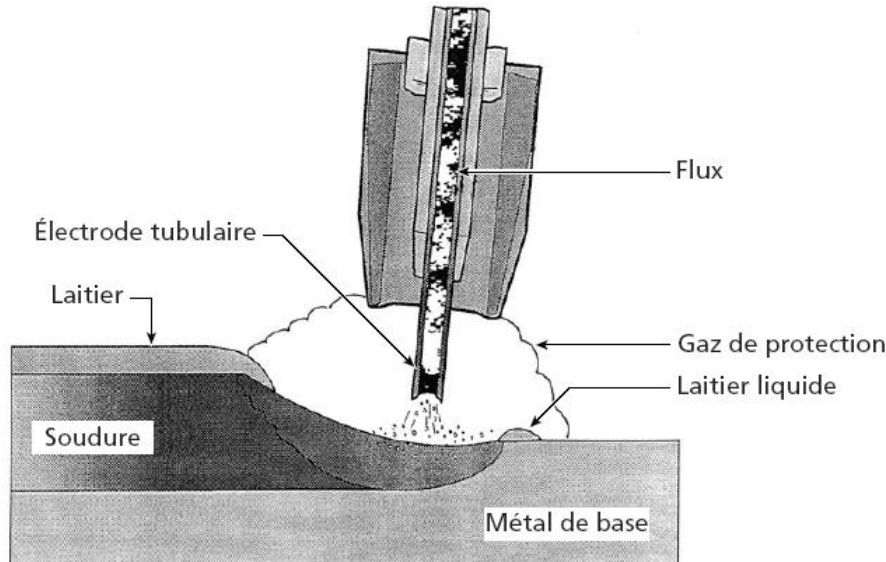


Fig. 8.11. Soudage avec fil fourré et gaz de protection

La plupart du temps, ces deux procédés utilisent un gaz de protection, à l'exception de certains cas, lors de l'utilisation du procédé FCAW avec fil autoprotégé (figure 8.12).

Il existe différents types de torches associées à ces procédés. On choisit généralement la torche en fonction de la soudeuse utilisée (par exemple, 300 A ou 450 A). Au-delà de 500 A, on doit utiliser une torche refroidie à l'air.

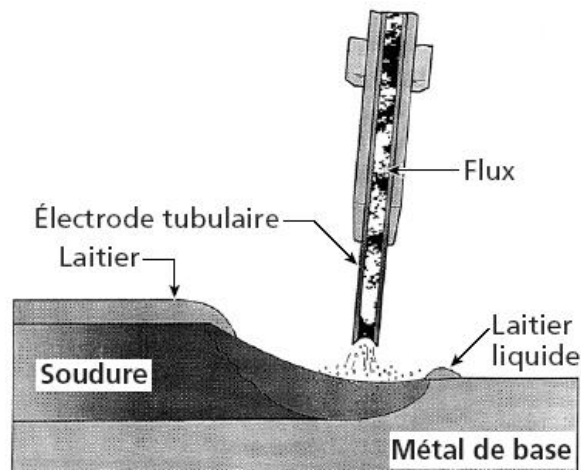


Fig. 8.12. Soudage avec fil fourré autoprotégé

On trouve aussi des torches pour le soudage avec fil autoprotégé et d'autres munies d'un dispositif d'aspiration des fumées. Les pièces de torche qui s'usent le plus rapidement sont le diffuseur de gaz, le tube contact et la buse (figure 8.13). Le procédé à fil autoprotégé n'utilise pas de gaz de protection ; donc, il ne requiert pas de buse.

Les dévidoirs à fil tiré, qui sont munis d'une bobine plus petite, ne conviennent pas au procédé FCAW, parce que le taux de production est trop élevé.



Fig. 8.13. Pièces de la torche de soudage à remplacer fréquemment

❖ Avantages et inconvénients

Ces procédés de soudage connaissent un essor certain, dû notamment à leur taux de dépôt supérieur aux autres procédés en fonction de l'intensité de courant utilisé.

On emploie les procédés FCAW et MCAW pour le soudage de l'acier doux ou faiblement allié ainsi que pour l'acier inoxydable. Ces procédés procurent une pénétration profonde et sont appropriés pour le soudage de fortes épaisseurs de métal (variant le plus souvent entre 5 et 50 mm). Ils sont idéals pour réaliser des soudures d'angle en position à plat et en T horizontal à grande vitesse, ainsi que pour le remplissage de chanfreins profonds.

Plus encore que le GMAW, ces procédés tolèrent une certaine quantité de saleté ou de rouille sur le métal. Le laitier obtenu avec le procédé FCAW se détache facilement et est inexistant avec le procédé MCAW. À l'exception de quelques îlots de silicate un peu plus nombreux, ce dernier est similaire au procédé GMAW. Attention ! Lors du refroidissement du cordon de soudure, les îlots de silicate peuvent éclater et causer des brûlures.

Par contre, l'équipement à utiliser est complexe et le soudage doit se faire à l'abri de l'air (Sauf si on utilise des fils autoprotégés). Le procédé FCAW avec fil autoprotégé présente des avantages particuliers par rapport au procédé sous protection gazeuse.

Lorsqu'on travaille avec des fils autoprotégés, il faut garder une longueur terminale supérieure à celle utilisée avec une protection gazeuse. Celle-ci assure un préchauffage du fil et aide à sa fusion ; il en résulte un taux de dépôt plus élevé. Il existe des tubes contacts, dont une partie de la paroi interne est isolée, qui permettent encore d'accroître la longueur terminale.

❖ Applications

Ces procédés sont particulièrement utilisés dans l'industrie de la fabrication de ponts, de réservoirs, de turbines, de matériel agricole et de châssis de camions, de même que dans la construction navale, la chaudronnerie-tuyauterie, les travaux d'entretien, le rechargement, etc. Le procédé avec fil autoprotégé peut notamment être utilisé dans des endroits plus aérés et convient particulièrement à la soudure de joints mal ajustés, en réduisant les risques d'effondrement.

6.3. Soudage par résistance

Le soudage par résistance est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique (500 à 150.000 A) et d'une pression ponctuelle (de moins d'un 30.000daN). Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur (sauf en Soudo-brasage). L'intensité électrique traverse la matière (durant 5ms à 3 secondes suivant les épaisseurs et nuances matières) et chauffe la matière jusqu'à sa fusion. La pression maintient le contact et donc les résistances entre l'électrode et l'assemblage (figure 8.14 et 8.15).

Cette technique est donc dépendante de la résistivité (résistance électrique) des matières, de l'épaisseur totale de l'assemblage et du diamètre des électrodes. Ce procédé est majoritairement utilisé dans l'assemblage de tôle d'acier de faible épaisseur (< 6mm). Cette technique bénéficie d'un savoir-faire très important et d'une productivité incomparable (dans le domaine d'application). Pour exemple, un châssis automobile est assemblé à plus de 80% par des points soudés.

De nombreux procédés de soudure par résistance existent, le plus important est le soudage par points. Très utilisé en grande et petite série, rapide, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder (figure 8.14). Le soudage par

molette qui est une variante du précédent, ici les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide (figure 8.15).

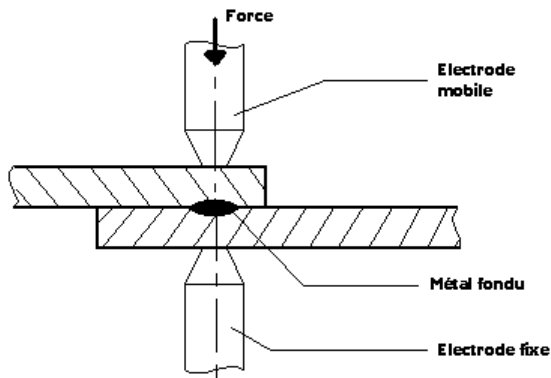


Fig. 8.14. Soudage par points.

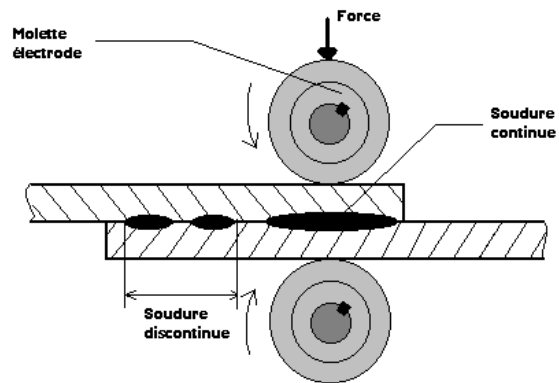


Fig. 8.15. Soudage par molette

Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, les mobiliers métalliques, les armatures en fils, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc...

❖ **Avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage :**

- Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité ...).
- Il répond à des sollicitations élevées
- Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatiques, ...)
- Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée (ex. : soudure continue de type molette).

❖ **Avantage du soudage par résistance, par rapport aux autres procédés**

- Limitation de la pollution, pas de modification structurale, sécurité d'exploitation, pas ou peu de préparation, pas de déformation, pas d'apport (métal ou atmosphère), esthétique du produit fini, prix de revient
- peu d'énergie
- vitesse d'exécution, amortissement important des machines, qualification élémentaire pour le personnel.

❖ **Les inconvénients du procédé de soudage**

- Assemblage par recouvrement uniquement
- Epaisseur soudée limitée à la puissance de la machine
- Difficulté de contrôle de la qualité des points soudés

6.4. Soudage par friction

Le soudage par friction est obtenu par l'échauffement de deux pièces pressées. Le mouvement relatif entraîne un échauffement de l'interface jusqu'à plastification locale du matériau, puis soudage par diffusion atomique. Un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique.

Le soudage par friction est classé avec les procédés de soudage à l'état solide, il a plusieurs avantages par rapport les autres procédés de soudage et il existe dans plusieurs domaines d'application (L'industrie pétrolière, automobiles, aéronautique et du spatial,...). En peut trouver de type de soudage par friction :

- Soudage par friction pour des pièces cylindriques
- Soudage par friction-malaxage (FSW)

6.4.1. Soudage par friction pour des pièces cylindriques

Une des deux pièces à assembler est entraînée en rotation. Les deux pièces sont mises en contact par un effort axial déterminé. Par frottement les pièces s'échauffent de part et d'autre du plan de joint ($V = 100 \text{ m/min}$). Un bourrelet commence à se former. Après un brusque arrêt de la pièce en rotation, l'effort axial est augmenté. C'est la phase de forgeage de la soudure qui se traduit par la formation d'un bourrelet très caractéristique. On élimine ensuite ce bourrelet par usinage.

On notera qu'il est préférable de souder deux pièces de même section. Ce procédé est utilisé dans les mécanismes nécessitant une grande résistance (arbres de boîtes de vitesses, leviers sur axes, goujons sur moyeu de poids lourds, rallonges de forêts, queues de soupapes...).

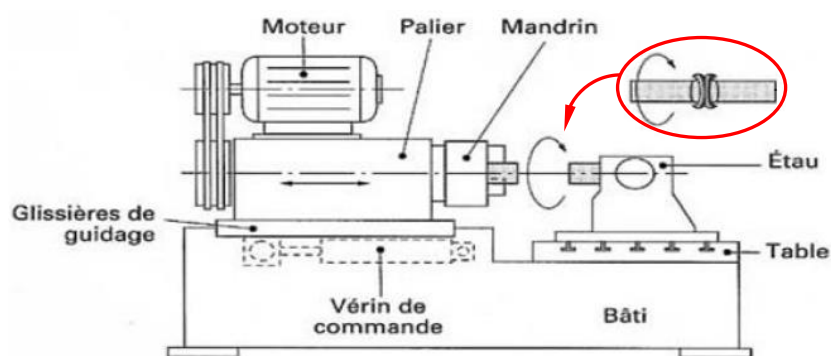


Fig. 8.16. Schéma d'une machine de soudage par friction



Fig. 8.17. Formation des bourrelets

6.4.2. Soudage par friction-malaxage (FSW)

Le soudage par friction malaxage, présenté sur la figure 18, un outil en rotation génère un flux de chaleur grâce à la friction de celui-ci avec les matériaux à assembler. L'outil est muni d'un

épaulement et d'un pion qui permet de malaxer et drainer les métaux. Une pression est exercée pour que la puissance totale mécanique soit suffisamment grande.

Cette puissance se transforme en chaleur et élève la température des matériaux, d'une part grâce à la friction et, d'autre part, grâce aux déformations plastiques subies par ceux-ci. L'outil est incliné d'un angle de 0.5 à 5 par rapport à la verticale.

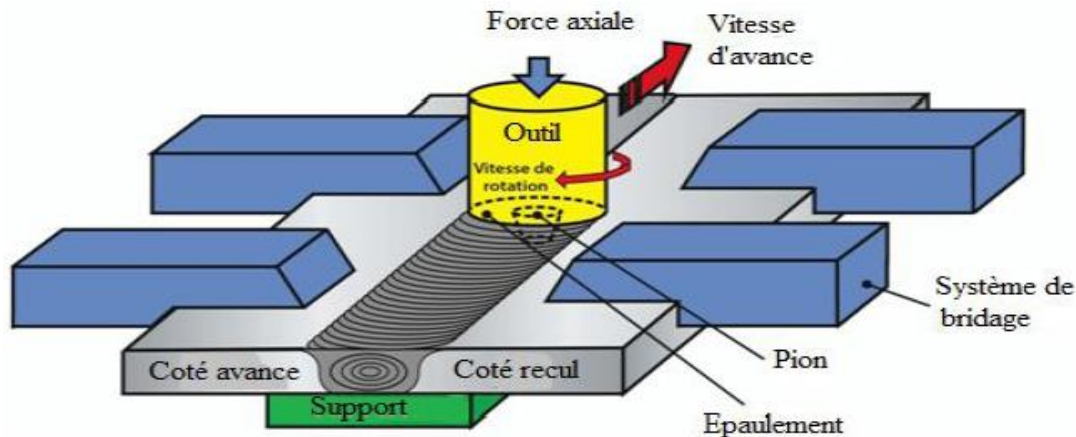


Fig. 8.18. Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW)

6.4.3. Les avantages et les limites

- ❖ Les avantages du soudage par friction sont:
 - Assemblages de haute qualité, avec une bonne structure métallurgique, car le matériau n'est pas porté à fusion.
 - Procédé de soudage 'one-shoot'.
 - Pas de préparation spéciale des pièces.
 - Procédé de soudage beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
 - Peu de déformations après soudage en raison du bref temps de soudage et de la faible température maximale.
 - Possibilité de souder des pièces de sections très différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.
 - Economique: le soudage par friction permet de réaliser des économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau et en salaire).
 - Les matériaux dissemblables ne pouvant être soudés avec d'autres procédés, peuvent être soudés avec le procédé par friction, comme l'aluminium ou le cuivre sur l'acier.
 - Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.
 - Pas de nécessité de métaux d'apport.
 - Ecologique: pas de gaz de protection, fumées ou rayonnements.
 - Pas de nécessité de soudeurs agréés.

❖ Les limites du soudage par friction sont:

- L'alignement des pièces à souder est critique pour la réalisation d'une friction et d'un chauffage uniformes.
- Les ébarbures doivent être éliminées mécaniquement.
- Coût d'investissement de l'appareillage.
- Les techniques de contrôle non destructif ne sont pas encore appliquées sur les soudures par friction. Le risque existe donc que ces techniques ne puissent pas détecter tous les défauts de soudage. La surveillance des paramètres du processus est probablement la meilleure méthode pour le contrôle de qualité.
- Le soudage par friction ne peut pas être appliqué sur des matériaux ayant un très faible coefficient de friction comme la fonte grise, le bronze et le laiton à forte teneur en plomb (les particules de graphite agissent comme des lubrifiants et contrecarrent l'échauffement).
- Lors du soudage de très grandes sections, la capacité de la machine peut constituer une limite.

6.4.4. Les caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques sont maintenues voire améliorées :

- **Résistance à l'extension** : La résistance à l'extension dans la zone d'assemblage est au moins égale à celle des matériaux soudés.
- **Résistance à la torsion** : La zone d'assemblage a les mêmes caractéristiques de résistance à la torsion que les pièces soudées.
- **Résistance à la flexion** : La résistance à la flexion est inférieure à celle des matériaux assemblés dans la zone de la soudure. Cette perte est de l'ordre de 15 %.
- **Dureté** : La dureté, dans la zone soudée, est supérieure à la dureté des matériaux assemblés. Le gain de dureté dépend du matériau, de son état métallurgique et du cycle de soudage.

6.5. Soudage au fer

Ce procédé de soudage est employé majoritairement dans l'industrie électronique pour les petites soudures (figure 19). Le fer à souder est essentiellement constitué d'une panne en métal, très conductrice de chaleur, qui est portée à haute température et que l'on utilise pour chauffer une pièce métallique afin d'y déposer de la soudure (figure 8.20). Le principe de la soudure est de chauffer les pièces métalliques à assembler jusqu'à la température de fusion du métal d'apport (que l'on appelle aussi la soudure). Le fer à souder fournit une température relativement faible (350 à 500 °C selon sa puissance) qui convient seulement à la soudure à l'étain.

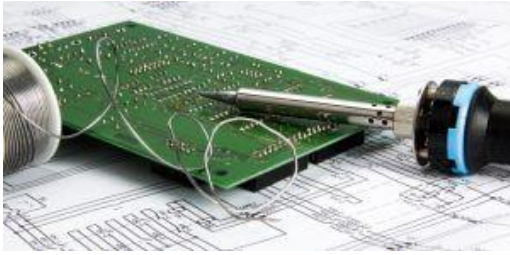


Fig. 8.19. Soudage au fer dans l'électronique



Fig. 8.20. Matériel utilisé dans le soudage au fer

6.5.1. La soudure à l'étain

Ce type de soudure est un assemblage de résistance moyenne, mais qui assure l'étanchéité du joint entre les pièces soudées. On l'utilise pour l'assemblage des canalisations d'alimentation d'eau en cuivre, avec la technique de soudure par capillarité, mais aussi pour l'assemblage du zinc, du cuivre, de l'étain, du laiton, ainsi que pour des jonctions en électricité et en électronique.

6.5.2. Les fers à souder

Il y'a trois types de fers à souder :

6.5.2.1. Fer à souder électrique lent

La panne en métal massif est chauffée par une résistance électrique. Selon la puissance de sa résistance (20 à 400 W), le fer a une capacité de chauffe plus ou moins importante (400 à 500 °C), et une panne plus ou moins grosse qui correspond à la surface à souder. Un petit fer de 20 W, à panne de 2 mm de diamètre, est destiné aux soudures de circuits imprimés avec du fil de soudure de 0,7 mm de diamètre. En revanche, un très gros fer à panne de 5,5 x 40 mm permet de souder des éléments de ferblanterie jusqu'à 2 mm d'épaisseur, avec du fil de soudure de 10 mm de diamètre.



Fig. 7.21. fer en forme de pistolet



Fig. 7.22. Fer en forme de crayon



6.5.2.2. Fer à souder électrique instantané ou rapide

La puissance de sa résistance porte sa panne à une température élevée (480 °C) en quelques dizaines de secondes. On utilise deux modèles : le petit fer de 30 W pour les soudures de précision avec du fil d'étain de 0,7 mm de diamètre, et le gros fer (en forme de pistolet)

(figure 8.20) de 100W pour des soudures plus importantes en électricité ou électronique, avec du fil d'étain jusqu'à 2 mm de diamètre.

Fer à souder à gaz

Monté sur un chalumeau à gaz ou sur une lampe à souder à la place du brûleur, sa panne en cuivre est chauffée par la flamme. Il est principalement destiné aux travaux de ferblanterie, de chaudronnerie, et aux soudures de gouttières en zinc. Plusieurs tailles de pannes sont utilisées pour des tôles de 5/10 à 20/10 mm.

9 - MATÉRIAUX

1. Introduction

Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée.

Les objets qui nous entourent, que nous manipulons quotidiennement, sont tous constitués d'une matière choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour conférer à l'objet la forme souhaitée. La notion de matériau est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour l'obtention d'un objet fini.

La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine de plusieurs révolutions dans l'histoire des technologies. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés: Age de la pierre, Age du bronze où celui du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante augmentation. En effet, la science des matériaux permet d'étudier les matériaux adaptés à chaque nouvelle application. Selon leurs utilisations, on pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

- **Les matériaux de structure** : qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.
- **Les matériaux fonctionnels** : qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que : conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques.

Certains matériaux se trouvent à la frontière entre les applications mécaniques et physiques, comme par exemple les matériaux piézo-électriques qui délivrent un effort lorsqu'on les soumet à une différence de potentiel électrique. Cependant, même en se restreignant aux matériaux de structure, le nombre de matériaux existant reste considérable. Dans ce cours, nous nous contentons de donner les éléments de compréhension permettant de trouver pour une application particulière la solution matériau la plus adaptée.

Une solution matériau pour une application comprend trois volets, le matériau constituant le composant, le procédé de mise en œuvre du composant, et la tenue en service de ce composant.

2. Science des matériaux

Les sollicitations auxquelles sont soumis les matériaux sont complexes et multiples. Leur comportement pour une utilisation déterminée est représenté par un ensemble de propriétés. On parle également du comportement des matériaux pendant leur fabrication ou leur mise en forme (par exemple, la coulabilité, la déformabilité...).

Le concept de la science des matériaux est né de la nécessité d'acquérir la maîtrise du comportement des matériaux par la connaissance des lois fondamentales qui déterminent leurs propriétés. La **science des matériaux** a pour objectif d'établir les relations existantes entre la composition et l'organisation atomique ou moléculaire, la microstructure et les propriétés macroscopiques des matériaux. Cette science est complétée par le **génie des matériaux** qui s'occupe des procédés de fabrication, de transformation et de mise en forme.

Une connaissance fondamentale des matériaux n'était pas nécessaire lorsque l'homme se contentait de l'argile, du bois et de la laine... pour satisfaire la plupart de ses besoins. L'approche empirique et l'expérience accumulée par les métallurgistes et les céramistes depuis des milliers d'années ne sont plus suffisantes pour satisfaire aux besoins contemporains et s'adapter aux exigences complexes de la technologie moderne. Une approche unifiée, quantitative et fondamentale de la description du comportement des matériaux de l'ingénieur est devenue indispensable.

La science des matériaux a un caractère général et une approche multidisciplinaire qui fait appel aux connaissances du chimiste et du physicien du côté des sciences de base, et à celles de l'ingénieur (mécanicien, électricien, du génie civil) du côté des applications et des procédés de fabrication.

La science des matériaux émerge comme un ensemble cohérent. Elle est couplée au génie des matériaux qui a pour objectif la réalisation de matériaux aux propriétés déterminées.

La science des matériaux traite l'ensemble des matériaux : métaux, céramiques, polymères et composites, de manière unifiée avec les mêmes concepts théoriques et les mêmes outils expérimentaux.

Comme le schématise la (Figure 9.1) la science et le génie des matériaux comportent quatre pôles principaux : synthèse, fabrication et transformation, composition et structure, propriétés et performances. Les différents comportements (à la fabrication comme à l'utilisation) ainsi que les facteurs économiques qui y sont associés caractérisent la performance d'un matériau.

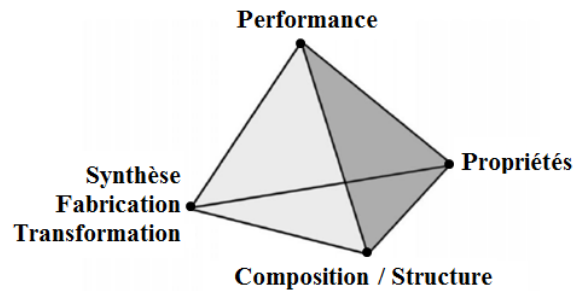


Fig. 9.1- Les quatre pôles de base de la science et du génie des matériaux.

Ces quatre pôles sont étroitement associés. Le matériau est élaboré au cours de sa synthèse (polymère) ou de sa fabrication (métaux, alliages, céramiques, etc.). La transformation a comme objectif de mettre en forme le matériau élaboré et de préparer un objet fini caractérisé par son comportement. La transformation se fait, en règle générale, en plusieurs étapes. Par exemple, la préparation d'une pièce de carrosserie fait intervenir successivement le laminage de la tôle à partir du lingot d'acier, l'emboutissage de la tôle pour former la pièce et une série d'opérations de finition (peinture, etc.). Pour atteindre des propriétés optimales, il est indispensable de maîtriser la structure et la composition du matériau et il faut par conséquent posséder une série de techniques d'analyse très sophistiquées.

Ce sont les contributions multiples de la science et du génie des matériaux qui ont complètement remodelé le monde qui nous entoure en libérant l'homme d'un grand nombre de contraintes liées à notre environnement. Notre mode de vie s'est radicalement transformé en quelques décennies et en majeure partie grâce à l'apport de la science et du génie des matériaux qui ont permis la création des outils de la vie moderne: voitures, avions, ponts, téléphériques, ordinateurs, équipements de télécommunications, satellites, substituts biomédicales...

3. Familles de matériaux

Les matériaux de structure peuvent être classés en quatre grandes familles, selon la nature des liaisons entre les atomes, dont on peut résumer les propriétés principales comme suit :

3.1. Les métaux

Ce sont les matériaux les plus employés pour les applications structurales (90% ferreux, les non-ferreux étant des alliages de Al, Cu, Ni et Ti). Ils sont capables de se déformer de manière permanente (ductiles) ce qui permet de réaliser des opérations de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, forge, estampage...) ou d'assemblage par déformation plastique (rivetage, ...). Par ailleurs les matériaux métalliques sont denses, et bons conducteurs thermiques et électriques.

3.2. Les céramiques

Ce sont les matériaux les plus anciens et les plus couramment utilisés en Génie Civil (pierre, brique, verre...). On peut (ex : béton) souvent les mettre en œuvre à l'état pâteux. Ils ne deviennent fragiles qu'après la prise de forme et le frittage. Ces matériaux sont résistants à l'abrasion, mais pas aux chocs, moins denses que les métaux, isolants thermique et électrique, généralement poreux et fragiles.

3.3. Les polymères

Ces matériaux sont récents. Ce sont de larges macromolécules organiques, comme par exemple le polyéthylène $-(C_2H_4)_n-$ dont le nombre de monomères n varie entre 100 et 1000 et la masse molaire de $M=1$ à 1000 kg/mol. Les matières plastiques ont l'avantage de pouvoir être mises en forme par déformation plastique ou injection à l'état liquide. Elles peuvent être thermoplastiques (recyclables et ductiles, comme les métaux) ou thermodurcissables. Elles sont en général mauvais conducteurs thermique et électrique et très peu denses.

3.4. Les composites et matériaux structuraux

Ce sont des combinaisons hétérogènes de matériaux issus de ces trois familles, mais dont la structure est définie en fonction de l'application (béton armé, composite carbone – époxy etc...) ou bien se développe naturellement sous l'effet des sollicitations mécaniques ou thermique (ex. bois : fibres de lignine dans une matrice de cellulose, ou métaux texturés par déformation plastique intense). La figure 9.2 présente la distribution du module de Young pour les différentes classes des matériaux.

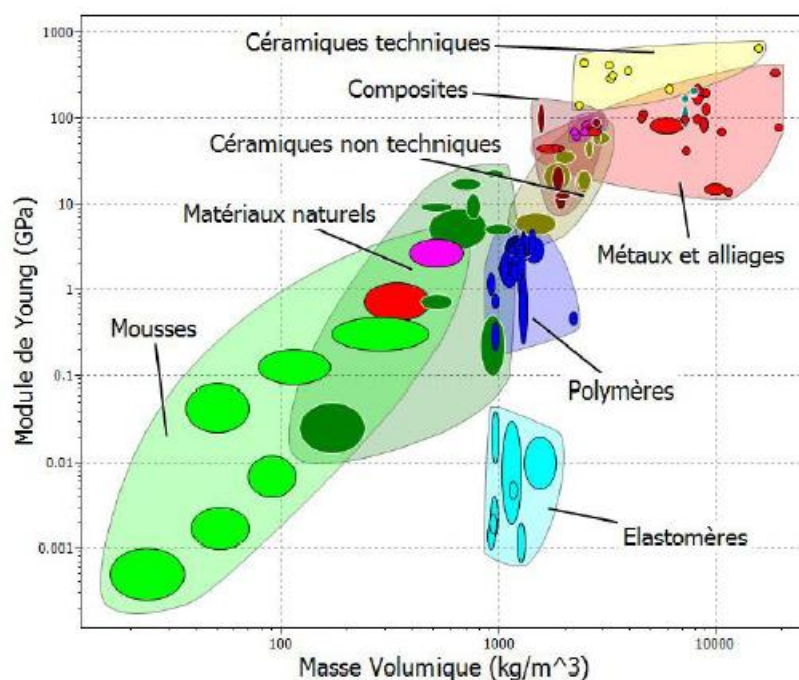


Fig. 9.2- Distribution du module de Young pour les différentes classes des matériaux.

4. Utilisation des matériaux

Il est primordial de choisir les matériaux les mieux adaptés aux applications envisagées. Les critères de choix doivent prendre en compte les facteurs suivants :

- Les fonctions principales des objets et des structures dont la réalisation est envisagée ; il est par exemple nécessaire de déterminer les modes de mise en charge, les températures ainsi que les conditions générales d'utilisation ;
- Le comportement intrinsèque des matériaux : résistance à la rupture, à l'usure, à la corrosion, conductibilité, etc. ;
- Le comportement des matériaux durant leur fabrication et leur transformation ;
- Le comportement des matériaux vis-à-vis de l'environnement ;
- Le prix de revient des diverses solutions envisageables ;
- Les possibilités de recyclage ou d'élimination par incinération avec récupération d'énergie.

Dans le développement d'une technologie, il est fréquent de remplacer un matériau à un autre, soit pour des raisons de performance, soit pour des motifs économiques ou écologiques. Prenons l'exemple des carrosseries de voiture. Initialement, ces carrosseries étaient construites en bois. Progressivement, le bois a été remplacé par le métal, ce dernier étant à son tour partiellement supplanté par des polymères organiques.

Si le métal a été substitué au bois, c'est avant tout parce qu'il se prête mieux au formage et qu'il possède des propriétés contrôlables et moins sensibles à l'humidité ce qui facilite la fabrication d'objets en grande série et qui augmente la fiabilité.

On tend également à alléger les structures et les objets en mouvement pour réaliser des économies énergétiques. C'est pour ce motif que l'on a introduit dans la construction automobile des matériaux polymères qui ont une masse volumique ρ voisine de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ alors que celle de la tôle d'acier, constituant actuellement la majeure partie des carrosseries, est voisine de 8 g.cm^{-3} . On allège également les carrosseries en utilisant des tôles d'acier plus minces à haute résistance produites par une meilleure connaissance des mécanismes de durcissement (aciers à grains fins) ou par l'emploi de tôle d'aluminium à laminage répétitif. Cependant, les matériaux plus légers ont des propriétés mécaniques moins élevées que celles des matériaux traditionnels comme les aciers. Pour des applications qui font intervenir des contraintes mécaniques en traction, il faut prendre en considération le rapport E/ρ pour choisir le type de matériaux à utiliser. La valeur de ce rapport est pratiquement équivalente pour les aciers et pour l'aluminium. Par contre, pour les polymères thermoplastiques ce rapport E/ρ est environ 10 fois plus petit. Ce simple calcul nous montre que, malgré leur

faible densité, l'emploi des polymères ne peut être utilisé lorsque les contraintes mécaniques sont importantes.

L'utilisation des matériaux fait intervenir d'autres critères de choix (résistance à la corrosion, apparence...) que celui de la résistance mécanique. Dès lors, les matériaux polymères organiques se développent à un rythme accéléré d'autant plus que grâce à l'introduction de fibres à haut module (carbone, verre, etc.) on obtient des propriétés mécaniques supérieures à celles des matériaux ferreux tout en gardant une masse spécifique inférieure à 2 g.cm^{-3} . Ces matériaux appelés matériaux composites s'introduisent progressivement dans divers marchés porteurs (aviation, construction automobile, articles de sport). Le développement des composites restes freinés par leur coût de production et de fabrication plus élevé que celui des matériaux classiques. Il pose également de sérieux problèmes de recyclage.

La fabrication des verres de montre a subi elle aussi, au fil des ans, une évolution considérable. On a d'abord remplacé le verre minéral fragile par un verre organique (polymère) résistant à l'impact mais rayable. Actuellement, on utilise également comme verre de montre une plaquette de monocristal de saphir synthétique qui est un matériau céramique qui associe transparence, résistance au choc et résistance au rayage.

Ces exemples montrent que les matériaux sont en développement constant. Un matériau mis au point pour une application spécifique a souvent des retombées dans d'autres domaines de la technologie. Ce développement croissant des matériaux et qui est associé à une meilleure interprétation théorique de leur comportement a abouti, dans les années 50, à la naissance de la science des matériaux. Celle-ci est étroitement associée à la notion de microstructure.



Fig. 9.3- Turbine à gaz



Fig. 9.4- Aube d'une turbine a gaz



5. L'importance de la microstructure

Actuellement, les aubes des turbines à gaz (figure 9.4) conservent des propriétés mécaniques élevées et résistent à l'oxydation jusqu'à une température légèrement supérieure à 1000 °C . Celles-ci sont fabriquées en alliages métalliques à base de nickel contenant une dizaine d'éléments dont l'aluminium, le titane et le chrome. La résistance de ces alliages aux sollicitations mécaniques à température élevée résulte essentiellement de leur microstructure.

Cette dernière décrit l'ensemble des grains ou des particules de taille microscopique, qui caractérise la structure d'un grand nombre de matériaux. La microstructure d'un matériau est donc formée par l'ensemble des grains, des particules ou des défauts observables par microscopie (optique et électronique).

Pour comprendre le comportement des matériaux, il faut établir la liaison entre des phénomènes qui se déroulent à l'échelle microscopique et submicroscopique et les propriétés du matériau. Cette liaison met en relation des phénomènes qui se déroulent à des échelles faisant intervenir neuf ordres de grandeur du nanomètre (10^9 m) au mètre (Figure 9.5). Plusieurs étapes de grossissement sont donc nécessaires, pour passer de l'échelle de l'aube d'une turbine à gaz à l'observation de la microstructure et à la détermination de l'arrangement des atomes. Ces analyses mettent successivement en jeu le microscope optique (observation du mm au μm), le microscope électronique (observation de $100 \mu\text{m}$ au nm) et la diffraction des rayons X pour l'analyse de l'arrangement à l'échelle atomique (observation à l'échelle du nm). Les éléments de la microstructure d'un matériau sont en général définis par plusieurs paramètres :

- Composition ;
- Arrangement atomique ;
- Quantité relative ;
- Morphologie ;
- Taille.

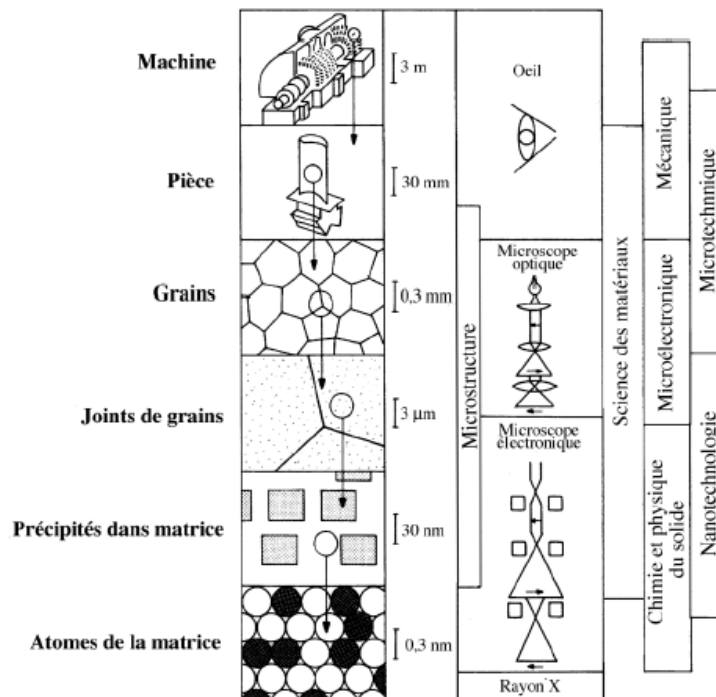


Fig. 9.5- Rapport de grandeur entre les structures et les microstructures en relation avec quelques grands domaines de la science et de la technologie.

La microstructure détermine les propriétés d'un très grand nombre de matériaux. C'est grâce à la modification contrôlée de la microstructure lors de la fabrication ou de la transformation que l'ingénieur en matériaux obtient une large gamme de propriétés. Une variation de la microstructure au cours du temps lors de l'utilisation du matériau entraîne une modification importante de ses propriétés (phénomène de vieillissement). Pour obtenir des matériaux fiables, il est indispensable de maîtriser les phénomènes de vieillissement qui sont le résultat de modifications physiques ou de réactions chimiques.

6. Principales propriétés des matériaux

On distingue plusieurs types de propriétés des matériaux selon leurs utilisations. Par exemple, dans le cas du développement des ordinateurs, ce sont essentiellement les propriétés physiques qui sont en cause. Par contre, dans le cas du développement des moteurs d'avions, ce sont les propriétés mécaniques et chimiques qui sont déterminantes. Les principales propriétés des matériaux se regroupent donc en :

6.1. Propriétés mécaniques

- Modules d'élasticité,
- Limite d'élasticité, écrouissage, ductilité.
- Viscosité, vitesse de fluage, amortissement
- Charge à la rupture, résistance à la fatigue, à l'usure, ...

6.2. Propriétés physiques

- Conductibilité électrique, aimantation,
- Conductibilité thermique, chaleur spécifique,
- Température et chaleur latente de transformation,
- Energie de surface, de liaison,
- Transparence.

6.3. Propriétés chimiques

- Résistance à la corrosion,
- Résistance à l'oxydation,
- stabilité chimique...

En général, le choix d'un matériau pour une application donnée est la conséquence de propriétés adaptées dans un ou plusieurs des domaines indiqués (par exemple l'aluminium est parfois utilisé dans les culasses automobiles malgré sa faible température de fusion (Figure 8.6), en raison de son faible poids et de sa bonne conductibilité thermique). Il est aussi orienté

par d'autres considérations, ce sont les performances du matériau, au rang desquelles vont se classer des éléments technologiques et économiques, en même temps que des caractéristiques moins facilement mesurables comme l'aspect : Disponibilité, reproductibilité, fiabilité, usinabilité, aptitude à la mise en forme, soudabilité, Absence de nocivité, possibilité de recyclage, coût.



Fig. 9.6- Culasse automobile

7. Connaissance et utilisation des matériaux

La bonne connaissance des matériaux et leur bonne utilisation font intervenir trois domaines d'activité.

7.1. Le développement du matériau lui-même

Là se jouent l'évolution du matériau, la découverte de nouvelles microstructures, qui concourent à l'amélioration des performances intrinsèques.

7.2. La caractérisation des propriétés d'emploi

Ce point a pour but d'apporter une meilleure connaissance d'un matériau existant, (mécanismes physiques qui provoquent ou accompagnent la déformation, effets mécaniques macroscopiques), donc de réduire les incertitudes et d'augmenter la fiabilité des modèles utilisés.

7.3. Le travail sur les modèles numériques

Permet d'améliorer la représentation des pièces, structures ou domaines calculés (par amélioration des algorithmes, qui autorisent le traitement de modèles numériques plus importants, par exemple 3D au lieu de 2D).

8. Sélection de matériaux

L'ingénieur a peut-être plus de 50 000 matériaux à sa disposition. Lorsqu'il conçoit une structure ou une application, comment s'y prend-il pour choisir dans ce vaste menu le matériau le plus adapté à son objectif ? Les erreurs peuvent engendrer des désastres. Pendant la deuxième Guerre Mondiale, un type de **Cargo** (Navire spécialement aménagé pour le transport des marchandises) à coque soudée connut de lourdes pertes (Figure 9.7 et 9.8), non

dues aux attaques ennemies mais au fait que ces bâtiments se cassaient en deux en mer. La ténacité de l'acier, et en particulier de ses soudures, était trop faible.

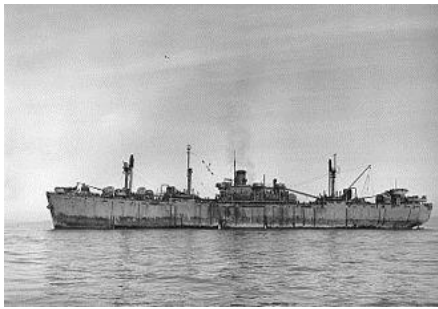


Fig. 9.7- Cargo à coque soudée, Le Liberty ship SS Carlos Carrillo, bataille de l'Atlantique (1939-1945)



Fig. 9.8- Cargo à coque soudée, Liberty ship SS John W. Brown toujours à flot à Baltimore

Ces propriétés mécaniques fondamentales des matériaux sont répertoriées dans le tableau 9.1 avec les autres classes de propriétés que l'ingénieur doit prendre en compte lors du choix des matériaux. Plusieurs de ces classes ne vous sont pas familières.

Propriétés économiques et environnementales	<ul style="list-style-type: none"> • Coût et disponibilité • Recyclabilité • Durabilité
Propriétés physiques Générales	<ul style="list-style-type: none"> • Masse volumique
Propriétés mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> • Module d'élasticité • Limite d'élasticité, résistance à la traction • Dureté • Ténacité • Résistance à la fatigue et au fluage • Pouvoir amortissant
Propriétés thermiques	<ul style="list-style-type: none"> • Conductivité thermique • Capacité calorifique spécifique • Coefficient de dilatation thermique
Propriétés électriques et magnétiques	<ul style="list-style-type: none"> • Résistivité • Constante diélectrique • Perméabilité magnétique
Interaction avec l'environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Oxydation • Corrosion • Usure
Aptitude à la mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de mise en forme • Assemblage • Finition
Propriétés esthétiques	<ul style="list-style-type: none"> • Couleur • Texture • Toucher

Tableau 9.1 Les classes de propriétés des matériaux.

À l'occasion de ce cours, nous rencontrerons aussi un certain nombre de classes de matériaux (tableau 9.2 et figure 9.9) que nous utiliserons. Les composants industriels sont plus fréquemment réalisés avec des métaux et alliages, qu'avec toute autre classe de matériaux. Mais, de plus en plus, les polymères remplacent les métaux, car ils présentent des combinaisons de propriétés très attrayantes pour le concepteur.

Métaux et alliages	<ul style="list-style-type: none"> • Fer et aciers • Aluminium et alliages • Cuivre et alliages • Nickel et alliages • Titane et alliages
Polymères	<ul style="list-style-type: none"> • Polyéthylène (PE) • Polyméthacrylate de méthyle (PMMA, Perspex) • Nylon ou Polyamide (PA) • Polystyrène (PS) • Polyuréthane (PU) • Polychlorure de vinyle (PVC) • Polyéthylène Téréphtalate (PET) • Polyétheréther Cétone (PEEK) • Epoxydes (EP) • Elastomères, dont le caoutchouc naturel (CN)
Verres et céramiques*	<ul style="list-style-type: none"> • Alumine (Al₂O₃, émeri, saphir) • Magnésie (MgO) • Verres de silice (SiO₂) et silicates • Carbure de silicium (SiC) • Nitrure de silicium (Si₃N₄) • Ciment et béton
Composites	<ul style="list-style-type: none"> • Polymères renforcés par fibre de verre (PRFV) • Polymères renforcés par fibre de carbone (PRFC) • Polymères chargés • Cermets **
Matériaux naturels	<ul style="list-style-type: none"> • Bois • Cuir • Coton/laine/soie • Os • Roche/craie • Silex/sable/agrégats

Tableau 9.2 Les différentes classes de matériaux.

Vous avez sans doute appris par les journaux que les céramiques actuellement en développement à travers le monde sont des matériaux émergents qui pourraient permettre de concevoir des moteurs plus performants, des couteaux plus coupants, des roulements avec des frottements plus faibles. Les ingénieurs peuvent combiner ces différents matériaux pour les meilleures de leurs propriétés, en réalisant des composites (les plus communs étant les polymères renforcés à fibres de verre) qui offrent un ensemble de propriétés particulièrement

attrayant. Néanmoins, nous ne devons pas bien sûr oublier les matériaux naturels, comme le bois ou le cuir, qui présentent certaines propriétés que même les matériaux les plus innovants d'aujourd'hui ont du mal à surpasser.

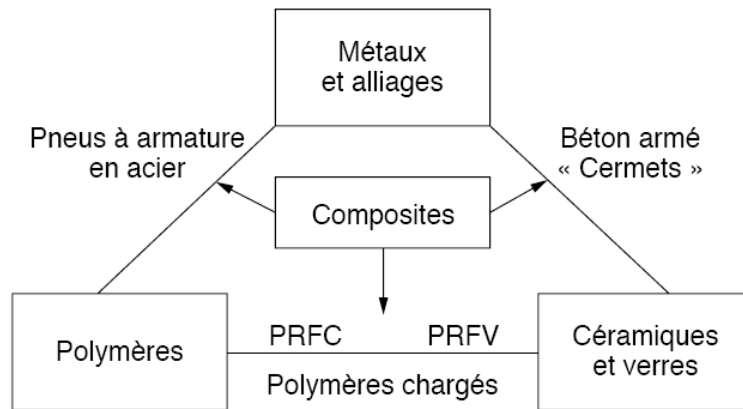


Fig. 9.9- Les classes de matériaux utilisées par l'ingénieur

* Les céramiques sont des composés minéraux non métalliques et cristallins. Les verres sont des solides non cristallins (ou amorphes). La plupart des verres ne sont pas métalliques, mais on dispose à l'heure actuelle d'une gamme de verres métalliques aux propriétés intéressantes.

** Les cermets (CERAmique et METal) sont des composites : grains de céramique dans une matrice de métal.

9. Exemples de sélection de matériaux

9.1. Tournevis

Tous les tournevis (Figure 9.10) ont une tige et une lame réalisées en métal : en acier à haute teneur en carbone. On emploie l'acier pour son module d'élasticité élevé. Ce module est caractéristique de la résistance du matériau à la déformation élastique, ici le fléchissement. Si la lame était faite d'un polymère comme le polyéthylène, elle se tordrait beaucoup trop. Cette propriété (le module élasticité) est un des critères de choix du matériau pour cette application ; mais ce n'est pas la seule. La lame doit avoir une limite d'élasticité élevée, sinon elle subit une flexion plastique irréversible lorsqu'on visse trop fort (cela peut se produire avec un mauvais tournevis). Par ailleurs, elle doit avoir une dureté élevée, sinon elle serait entaillée par le matériau constituant la tête des vis, et donc endommagée.

En outre, le matériau constitutif de la tige et de la lame doit résister non seulement à la torsion et à la flexion, mais aussi à la fissuration. Par exemple, le verre a un module, une limite d'élasticité et une dureté élevés, mais il ne convient visiblement pas à cet usage en raison de sa fragilité. Plus précisément, sa ténacité est faible. Celle de l'acier est élevée, ce qui signifie qu'il cède, ou fléchit, avant de casser.



Fig. 9.10- Exemples de tournevis avec tige en acier et manche en polymères (Elsevier).

Le manche d'un tournevis est fait en polymère ou en plastique, par exemple en polyméthacrylate de méthyle, aussi appelé PMMA, plexiglas ou perspex. Le manche a une section beaucoup plus importante que la tige, donc il subit moins de torsion qu'elle et son module peut être moindre. On n'arriverait pas à fabriquer un manche correct en caoutchouc (un polymère lui aussi), parce que son module est beaucoup trop faible, mais un revêtement en caoutchouc pourrait se révéler utile car son coefficient de frottement est élevé, assurant une bonne prise en main. Les manches d'outil de fabrication traditionnelle étaient en bois, un composite naturel et de loin le plus utilisé en ingénierie si on se réfère au tonnage annuel consommé.

Le bois a été supplanté par le PMMA parce que ce dernier est mou à haute température et qu'on peut donc le mouler rapidement et facilement à ses dimensions finales. Son aptitude à la mise en forme est un atout pour cet emploi. Le choix est aussi lié à des critères esthétiques : il a une bonne apparence et un toucher ou une texture agréable. De plus, sa densité est faible, ce qui évite de le concevoir plus lourd sans raison. Enfin, le PMMA est bon marché, et les coûts de fabrication du tournevis sont raisonnables.

9.2. Turboréacteur

Notre deuxième exemple (Figure 9.11) nous emmène de la technologie grand public aux matériaux de pointe utilisés dans les turboréacteurs qui propulsent les avions long-courriers. L'aube-fan comprime l'air vers le réacteur et procure en même temps une poussée aérodynamique autour du carter du réacteur. Dans ce dernier, les aubes de compression continuent à comprimer l'air, qui est ensuite mélangé au combustible et brûlé dans la chambre de combustion. Les aubes de turbine sont entraînées par la détente des gaz brûlés et transmettent à l'hélice et au compresseur l'énergie nécessaire à leur rotation. Enfin les gaz sortent à l'arrière du réacteur et contribuent à la poussée.

Les aubes-fan sont en métal, un alliage de titane. Ce dernier a un module, une limite d'élasticité et une ténacité convenables. Mais le métal doit aussi bien tenir en fatigue (occasionnée par les variations rapides de charge) et résister à l'usure superficielle (due à tout

ce qui la frappe à grande vitesse, des gouttelettes de brouillard aux oiseaux) et à la corrosion (importante pour des décollages en milieu marin à cause de l'eau salée qui pénètre dans le réacteur). Enfin le critère de densité a une importance très grande pour des raisons évidentes : plus le réacteur est lourd, moindre est la charge utile de l'avion. Dans le but de gagner encore en masse, on a songé à des aubes-fan en composite polymère renforcé par fibres de carbone (PRFC), dont la densité est inférieure de moitié à celle du titane. Mais le PRFC n'est pas assez résistant aux chocs dans cet emploi : des essais d'impact d'oiseaux ont conduit à l'éclatement de tels aubages.

Passons aux aubes de turbine (ce sont les parties les plus chaudes du moteur) : les exigences sur la tenue du matériau sont encore plus nombreuses. Pour des raisons de rendement, le combustible doit brûler à une température aussi élevée que possible. Le métal des aubes mobiles du premier étage de la turbine (aubes « HP 1 ») atteint de nos jours des températures de 1000 °C en service, ce qui exige une bonne résistance au fluage et à l'oxydation. Les superalliages à base de nickel, de composition et de microstructure complexes, satisfont à ces conditions particulièrement sévères et représentent un sommet de la technologie des matériaux de pointe.



Fig. 9.11- Coupe d'un moteur à réaction typique (Rolls-Royce plc.).

9.3. Bougies

Un autre exemple est intéressant pour nous montrer des exigences assez différentes : les bougies d'un moteur à explosion (Figure 9.12). Les électrodes doivent résister à la fatigue thermique (occasionnée par les fluctuations rapides de température), à l'usure (due à l'érosion par les étincelles), à l'oxydation et à la corrosion des gaz brûlants en haut du cylindre, qui contiennent de dangereux composés soufrés. On utilise pour ces électrodes des alliages de tungstène, car ils possèdent toutes ces propriétés.

L'isolant autour de l'électrode centrale est un exemple intéressant de matériau non métallique (dans notre cas une céramique : l'alumine). On l'utilise à cause de ses propriétés d'isolant

électrique et également de bonne résistance à la fatigue thermique, à la corrosion et à l'oxydation.



Fig. 9.12- Bougie de moteur à explosion à essence avec des électrodes de tungstène et un corps en céramique (Elsevier).

9.4. Voilier de plaisance

L'utilisation de matériaux non métalliques s'est beaucoup répandue dans les produits à destination du grand public. Notre exemple suivant : un voilier de plaisance (figure 9.13), montre à quel point les polymères et les composites de synthèse ont remplacé les matériaux traditionnels qu'étaient l'acier, le bois et le coton. La coque d'un bateau de plaisance est en polymère renforcé par fibres de verre ou PRFV, facile à fabriquer par seul moulage, d'aspect agréable, et insensible à la rouille ou à l'appétit de mollusques appelés tarets, à la différence de l'acier et du bois. Le mât est en alliage d'aluminium, beaucoup plus léger que le bois à charge donnée ; celui d'un voilier de compétition est même désormais en PRFC. Les voiles, auparavant en coton, fibre naturelle, sont composées d'un des polymères suivants : nylon, Térylène, Kevlar. Pour le gréement courant, les polymères ont aussi remplacé les cordages de coton. Enfin des polymères comme le PVC sont fréquemment employés dans des objets comme les bouées pare-battage, les flotteurs et les taux de protection.



Fig. 9.9- Un bateau de plaisance avec une coque en composite (PRFV), une mâture en alliage d'aluminium et la voilure en fibres polymères synthétiques (crédit : Catalina Yachts, Inc.).

Deux matériaux composites créés par l'homme ont été cités parmi les objets que nous venons de considérer : les polymères renforcés par fibre de verre (PRFV), ainsi que les polymères renforcés par fibre de carbone (PRFC), beaucoup plus chers. Le champ des composites est vaste et continu à s'étendre (Figure 8.9) : dans la prochaine décennie, les composites concurrenceront de plus en plus l'acier et l'aluminium dans nombre d'usages traditionnels de ces métaux. Jusqu'à présent, nous avons introduit avec suffisamment de détail les propriétés physiques et mécaniques des matériaux de structure, mais il nous reste à examiner deux facteurs la plupart du temps prépondérants : ceux du prix et de la disponibilité des matériaux.

Le tableau 8.3 analyse sommairement leurs prix, donnés en euros. Les matériaux de construction courants, le bois, le béton et l'acier pour le bâtiment, coûtent entre 150 et 400 € (200 à 500 \$) la tonne¹. Il existe beaucoup de matériaux qui ont les propriétés exigées d'un matériau de construction, mais dont le coût exclut leur utilisation dans ce domaine.

Matériaux de construction courants	Bois, béton, acier pour le bâtiment	150 à 400 €
Petite et moyenne construction mécanique	Métaux, alliages & polymères pour l'aéronautique, l'automobile, le génie électrique, etc.	400 à 23 000 €
Verres et céramiques*	Alliages pour aubes de turbine, composites de pointe (PRFC, PRFB), etc.	23 000 à 77 000 €
Composites	Paliers en saphir, contacts en argent, microcircuits en or, diamant industriel pour outils de coupe et de polissage	77 000 à 4,6 M€

Tableau 9.3 Prix à la tonne.

La valeur ajoutée aux travaux de petite et moyenne construction mécanique est plus importante ; cela signifie que les contraintes économiques sur le choix des matériaux sont moins sévères : le travail, la production ou la fabrication représentent une part bien plus importante du coût final de la structure. Les aciers inoxydables, la plupart des alliages d'aluminium et certains polymères coûtent de 400 à 23 000 € (500 à 30 000 \$) la tonne. C'est dans ce secteur du marché que la compétition entre les matériaux est la plus intense, et que résident les plus belles possibilités de conception créative. Les polymères et composites y rivalisent directement avec les métaux, et les céramiques nouvelles (carbure et nitrure de silicium) peuvent se concurrencer les uns et les autres dans certains emplois.

Ensuite viennent les matériaux destinés aux applications de pointe ou aux usages spéciaux, comme les superalliages à base de nickel (pour aubes de turbine), le tungstène (pour les électrodes de bougies), et des matériaux composites spéciaux comme les PRFC. Leur prix varie de 23 000 à 77 000 € (30 000 à 100 000 \$) la tonne. C'est le domaine des matériaux

avancés et de leurs technologies, objet de recherches actives, dans lequel des percées majeures se produisent sans cesse. Là aussi, la concurrence des matériaux nouveaux est vive.

Enfin il reste ce qu'on appelle les métaux rares et les pierres précieuses, fort utilisés en ingénierie : l'or pour les circuits intégrés, le platine pour les catalyseurs, le saphir pour les paliers, le diamant pour les outils de coupe. Leur prix va de 77 000 à plus de 4,6 millions d'euros (100 000 à plus de 60 millions de \$) la tonne.