

Différentes classes de matériaux et procédés

Cahier des techniques de l'ingénieur T 5 100 – Choix et usage des matériaux
Materials selection in mechanical design, M.F. ASHBY, Pergamon Press.

1. Les grandes classes de matériaux

La plupart des propriétés physiques des matériaux à l'état solide (mécaniques, électriques, magnétiques, optiques...) dépendent très fortement du type d'interaction entre atomes ou molécules qui assurent leur cohésion.

On a donc pour habitude de classer les matériaux en fonction de ces différents types de liaisons chimiques :

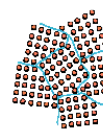
- des liaisons fortes, à caractère métallique, ionique ou covalent ; elles sont présentes à l'intérieur des édifices moléculaires, ainsi que dans les édifices cristallins ou quasi-cristallins et les solides amorphes ;
- des liaisons faibles, à caractère électrostatique hétéropolaire intrinsèque ou induit ; ce sont elles qui assurent fréquemment la cohésion intermoléculaire des solides constitués de la juxtaposition de plusieurs molécules.

1. Les grandes classes de matériaux

- **Métaux :**



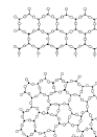
solides atomiques a liaison métallique
cristallins
denses, conducteurs, opaques, résistants, ductiles, ...



- **Céramiques :**



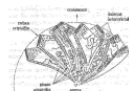
solides moléculaires a liaison covalente et/ou ionique
amorphes ou cristallins
plutôt légers, isolants, résistants, réfractaires, fragiles ...



- **Polymères :**



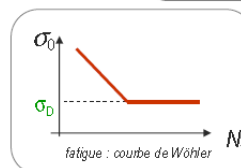
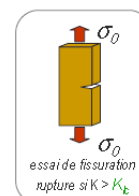
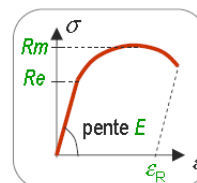
chaines d'atomes liées par des liaisons faibles
amorphes ou semi-cristallins
légers, isolants, peu résistants, faible Tf, ...



- **Composites :** association de matériaux

Propriétés mécaniques :

- Modules d'élasticité (Young E , Coulomb G , compression K) [GPa]
- Coefficient de Poisson $\nu = -\epsilon_t / \epsilon$ [sans dim.]
- Limite élastique R_e (traction/compression) [MPa]
- Résistance à la traction R_m [MPa]
- Dureté H [sans dim.]
- Déformation après rupture ϵ_R [sans dim.]
- Ténacité K_{Ic} [MPa m^{1/2}]
- Limite d'endurance σ_D [MPa]



Propriétés physiques :

- Propriétés thermiques :
 - conductivité thermique λ [W m⁻¹ K⁻¹]
 - capacité calorifique mass. (=chaleur spécifique) C_p [J K⁻¹ g⁻¹]
 - température de fusion T_f [K]
 - coefficient de dilatation thermique α [K⁻¹]
- Propriétés électriques :
 - conductivité électrique σ [Ω^{-1} m⁻¹]
 - permittivité diélectrique ϵ [F m⁻¹]
- Propriétés optiques :
 - réflectivité R / transmittivité T [sans dim.]
 - densité optique [sans dim.]
 - couleur ...
- Propriétés magnétiques :
 - perméabilité magnétique μ [H m⁻¹]

Propriétés chimiques = réactivité – corrosion :

- Oxydation : réaction avec l'oxygène de l'air, de l'eau
seul 2 métaux inoxydables : or et platine
céramiques et polymères peu oxydables
- Acides
- Bases
- Solvant : céramiques et métaux peu sensibles
peuvent faire gonfler ou attaquer les polymères

Autres propriétés intrinsèques :

- Masse volumique [kg m⁻³]

Propriétés extrinsèques :

- Prix
- Impact environnemental
- Disponibilité
- etc.

1. Métaux et alliages métalliques

Ils présentent des liaisons essentiellement métalliques, soit une liaison atomique à caractère collectif et faiblement dirigé, dû à la délocalisation des électrons de conduction (⇒ conducteurs de l'électricité et de la chaleur).

Ils se caractérisent par :

- des températures de fusion et de vaporisation en général élevées,
- des propriétés relativement isotropes et en général des propriétés élastiques élevées (E= 50 à 250 GPa),
- une bonne ductilité et une relativement bonne ténacité (atout majeur pour leur mise en forme).

D'un autre côté, les matériaux métalliques présentent :

- une forte plasticité,
- une tenue à la fatigue médiocre,
- une grande sensibilité à la corrosion,
- une densité et un poids important,

De plus, certains sont toxiques (Pb) et difficilement recyclables.

1. Métaux et alliages métalliques

Les métaux les plus utilisés dans des applications structurales sont les aciers, les alliages d'aluminium, les alliages de cuivre et les alliages de nickel.

- **Les aciers** se caractérisent par un fort module et une forte limite d'élasticité. Ils sont en général facilement formables et soudables et relativement bon marché
 ≠ Ils ont une densité relativement élevée, perdent souvent leurs propriétés de tenue mécanique au-dessus de 600°C, et sont particulièrement sensibles à la corrosion (sauf évidemment les aciers inoxydables)

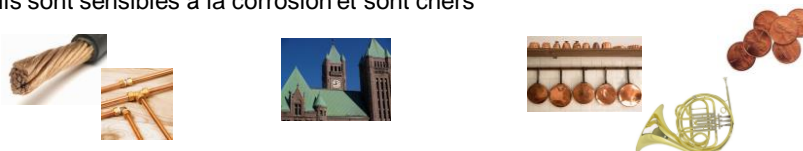


- **Les alliages d'aluminium** se caractérisent essentiellement par leur faible densité. Ils ont de bonnes propriétés mécaniques, sont généralement ductiles et formables, et résistent assez bien à la corrosion
 ≠ Ils perdent leur tenue mécanique pour la plupart au-dessus de 150°C, sont sensibles à la fatigue et à la corrosion sous contrainte. Ils sont difficiles à souder et relativement chers



1. Métaux et alliages métalliques

- **Les alliages de cuivre** sont de bons conducteurs électriques et thermiques. Ils ont une assez bonne tenue à l'usure et de bonnes propriétés de tenue à chaud
 ≠ ils sont sensibles à la corrosion et sont chers



- **Les alliages de nickel** ont de très bonnes propriétés mécaniques à haute température et une relativement bonne tenue en corrosion
 ≠ ils sont très chers et très lourds



2. Verres et céramiques

Ils présentent des liaisons fortes et directionnelles, qu'elles soient ioniques (attraction coulombienne d'ions de signes opposés) ou covalentes (mise en commun d'une paire d'électrons), mettant souvent en jeu des énergies considérables.

Ils se caractérisent par :

- une très bonne tenue en température,
- de hauts points de fusion,
- d'excellentes propriétés élastiques ($E = 400$ à 500 GPa, 1000 GPa pour le diamant),
- une bonne résistance à la corrosion et à l'usure,
- une faible propension à la plasticité

D'un autre côté, ceux sont des matériaux fragiles, peu tenaces, et peu ductiles, ce qui implique d'utiliser les règles de conception particulières aux matériaux fragiles pour l'emploi de ces matériaux.

De plus, les céramiques de qualité ont tendance à être chères.

2. Verres et céramiques

- **L'alumine** est un matériau courant qui a une bonne résistance à l'oxydation et une excellente tenue en température
- **Le carbure de silicium** est un excellent abrasif, très résistant aux chocs thermiques
- **Le nitrure de silicium** a une très bonne résistance en compression et une excellente tenue aux chocs thermiques
- **Les Sialons** sont facilement frittés et utilisés dans les outils de coupe
- **La zircone** est un éventuel matériau de remplacement des aciers dans les moteurs, sous réserve d'une ténacité améliorée
- **Les verres silico-sodiques**, utilisés pour leur transparence, peuvent être aussi des matériaux de structure après des traitements de surface spécifiques qui améliorent leurs propriétés mécaniques.



3. Polymères et élastomères

Il s'agit de macromolécules à squelette covalent, liées entre elles par des liaisons faibles (liaisons de Van der Waals ou liaison hydrogène). Leurs propriétés dépendent fortement du comportement de ces liaisons faibles et évoluent considérablement avec la température.

Ils se caractérisent par :

- un module élastique généralement faible ($E =$ qqes GPa, jusqu'à 0.1 MPa pour les élastomères et les polymères expansés),
- une limite d'élasticité d'autant plus faible qu'ils sont portés à haute température, et donc une grande facilité de mise en forme,
- souvent une bonne ténacité,
- une bonne déformabilité,
- une bonne résistance à l'usure,
- une bonne tenue à la corrosion,
- une bonne facilité à assembler.

Il s'agit en outre de matériaux légers qui peuvent être très bon marché.

3. Polymères et élastomères

Il existe une très grande variété de polymères que l'on peut grossièrement classer en trois catégories, en fonction de leur architecture moléculaire :

- **les thermoplastiques** : constitués de chaînes linéaires ou branchées selon le procédé de polymérisation. Ils sont ramollis par un préchauffage. Ils présentent une grande variété de propriétés en fonction de la nature et de la taille des molécules, ainsi que de leur degré de branchement.
- **les thermodurcissables** (résines) : formés par réaction chimique entre de grands monomères fonctionnels et de petites molécules de liaison, ce qui développe des liaisons transverses, formant un squelette qui donne à l'ensemble sa rigidité. Ils ne fondent pas, ne se ramollissent pas de façon réversible au chauffage : ils se décomposent. Ils résistent aux solvants mais, une fois polymérisés, ils ne peuvent pas être mis en forme aussi facilement que les thermoplastiques.
- **les élastomères** (caoutchoucs) : se placent entre les deux catégories précédentes. Ils sont moins rigides que les thermodurcissables grâce à un plus faible degré de polymérisation, et les liaisons transverses y sont moins nombreuses.

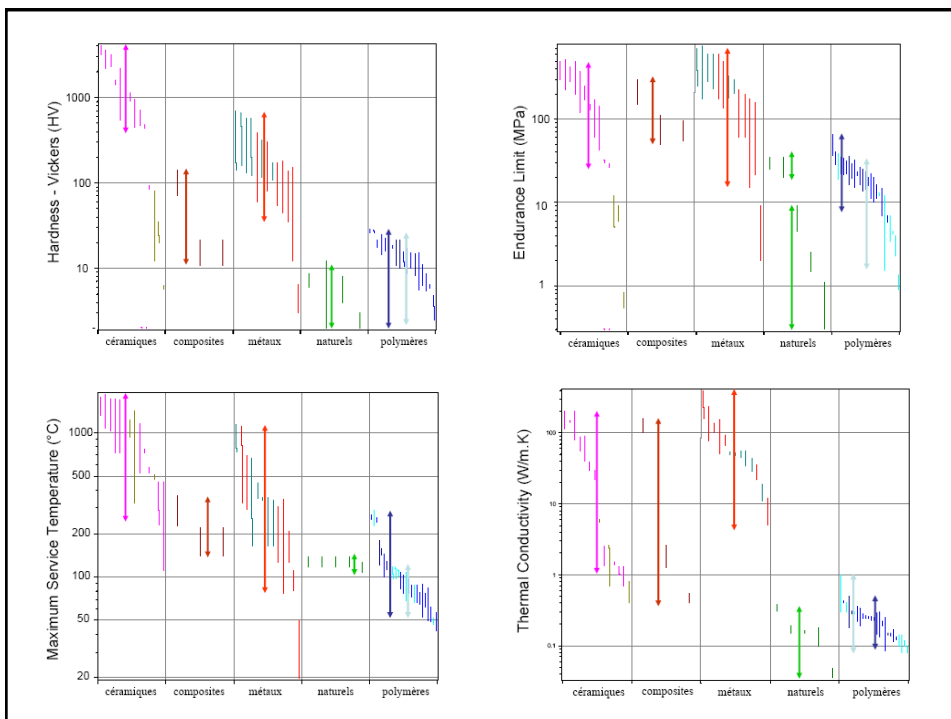
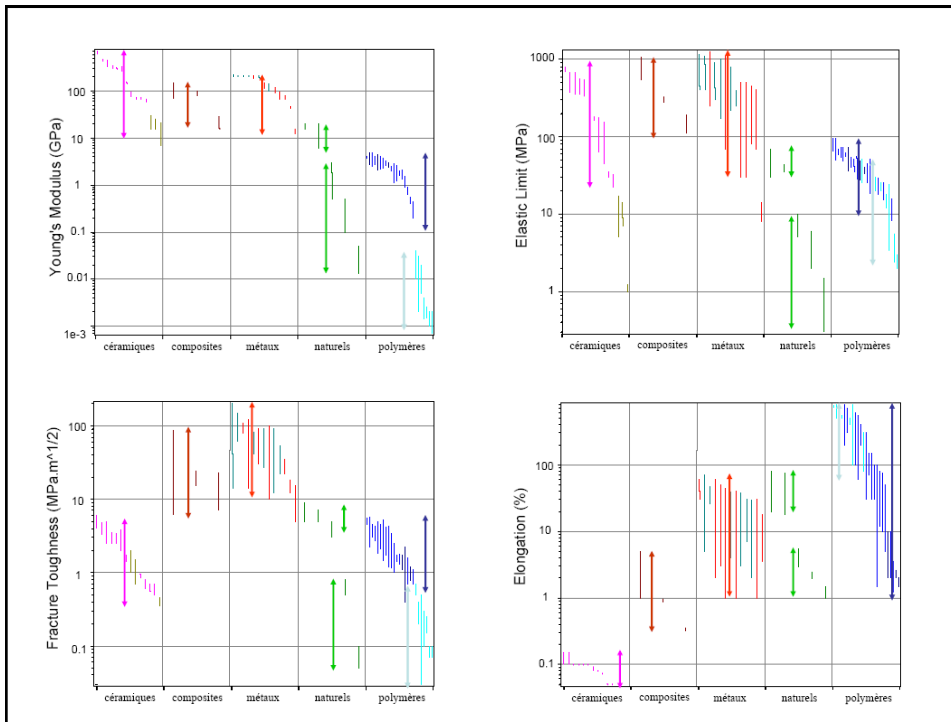
4. Matériaux composites

Il s'agit de matériaux associant des éléments de deux classes de matériaux pour obtenir une combinaison de propriétés qui tire avantage de chaque classe.

Les plus fréquemment utilisés sont les composites à matrice polymère et à renfort fibreux qui présentent des propriétés spécifiques exceptionnelles.

Les composites céramique/céramique, qui sont moins fragiles que les céramiques massives, sont très intéressants pour leur tenue en température. Les composites à matrice métallique à renfort céramique ont pour vocation de tirer parti à la fois de la ductilité des métaux et de la raideur du renfort céramique.

Enfin, il convient de citer pour mémoire les matériaux tels que le bois (matériau structural de toute première importance dans le bâtiment !), les ciments et les bétons, les mousses polymères, céramiques ou métalliques, qui sont tous en quelque sorte des matériaux composites.



	Métaux	Céramiques	Polymères	Composites
Densité	Moyenne Elevée	Moyenne	Faible Très faible	Moyenne Faible
Prix	Faible Elevé	Elevé (techniques) Faible(gde diffusion)	Faible Elevé	Elevé
Elasticité	Elevée	Très élevée	Moyenne Faible	Elevée
Résistance mécanique	Elevée	Très élevée (compression)	Moyenne Faible	Elevée
Tolérance aux défauts et aux chocs	Très tenace	Très fragile	Peu tenaces mais grande énergie absorbée	Très tenaces
Température d'utilisation	Moyennes Hautes	Hautes Très hautes	Moyennes Faibles	Moyennes
Tenue aux Agressions chimiques	Moyennes Mauvaise	Bonne Très bonne	Moyenne	Moyenne
Conduction de la chaleur	Bonne Très Bonne	Moyenne Faible	Faible Très faible	Faible
Conduction de l'électricité	Bonne Très bonne	Faible Très faible		
Facilité de mise en forme	Facile	Difficile (techniques) Facile (gde. diffusion)	Très facile	Moyenne dépendant de la forme
Facilité d'assemblage	Facile	Moyenne	Facile	Difficile



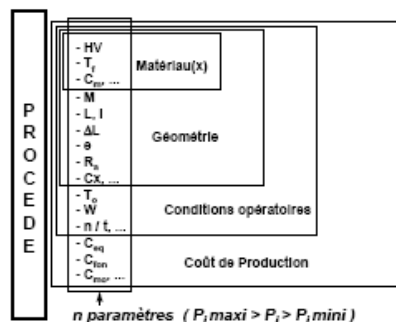
2. Les grandes familles de procédés

La décision du choix d'un matériau particulier en vue d'une utilisation donnée impose assez directement le recours à un nombre limité de procédés de mise en œuvre, adaptés à ce matériau.

Par ailleurs, tous les procédés de fabrication ne sont pas capables des mêmes performances en termes de forme à obtenir selon le matériau travaillé.

Un procédé **exploite** les propriétés d'usage du matériau travaillé, mais est lui-même susceptible de **modifier** ces propriétés, avant de les répercuter sur le produit fini.

L'obtention d'un produit fini se fait rarement à l'aide d'un seul procédé, mais plutôt en général à l'aide de toute une **gamme de procédés** successifs, dont chacun est nécessaire pour atteindre l'une des caractéristiques géométriques, fonctionnelles ou économiques du produit.



1. Paramètres liés au matériau mis en forme

Certaines propriétés des matériaux interagissent directement avec le procédé de mise en œuvre que l'on peut leur appliquer, tout en étant transmises au produit final en tant que propriété d'usage :

- la température de fusion du matériau, qui doit être comparée à la température maximale techniquement possible pour la mise en œuvre du procédé envisagé (évident pour tous les procédés de fonderie ou de moulage, mais également utile pour les procédés faisant appel à la déformation plastique ou à la diffusion atomique (traitements thermiques ou frittage)
- la dureté du matériau, qui a des conséquences sur les efforts à appliquer si l'on souhaite le déformer ou l'usiner, sur la taille et la puissance des machines, sur l'usure et la durée de vie des outillages utilisés.
- le coût-matière, le contenu en énergie, la recyclabilité

1. Paramètres liés au matériau mis en forme

Dans la pratique industrielle, le niveau de performances accessible sur divers matériaux avec un procédé qui leur est applicable est souvent mesuré par des indices d'aptitude spécifiques, déterminés expérimentalement grâce à des essais comparatifs standardisés : coulabilité, usinabilité, emboutissabilité, forgeabilité, soudabilité...

	acier	fonte	aluminium	plastique	verre	bois
FORGAGE						
Moulage	+	++	++	++	++	-
Ferpage	++	-	-	-	-	-
Cisfrage	+	-	+	++	-	-
Laminage - Treillage	++	-	+	-	-	-
Frittage - Agglomération	+	-	-	+	-	+
USINAGE						
Avec copeaux	++	++	++	++	-	+
Sans copeaux	+	-	+	-	-	+
ASSEMBLAGE						
Soudage - Brassage	++	+	+	++	-	-
Collage - Scellement	+	-	+	++	+	++
Cloilage - Rivetage	++	++	++	++	-	++
TRAITEMENTS THERMIQUES						
TRAITEMENTS DE SURFACE						
Transformations structurales	++	-	+	+	-	-
Traitements par diffusion	++	+	+	-	-	-
Traitements par oxydation	++	-	++	-	-	-
Rechromage	++	+	+	+	+	++

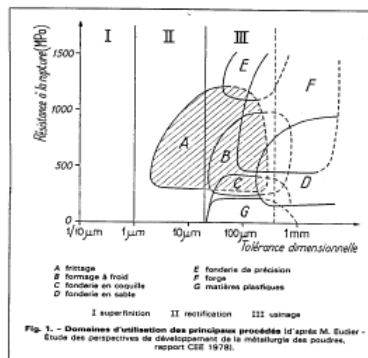
2. Paramètres imposés par la fonction de la pièce

Il s'agit en particulier de :

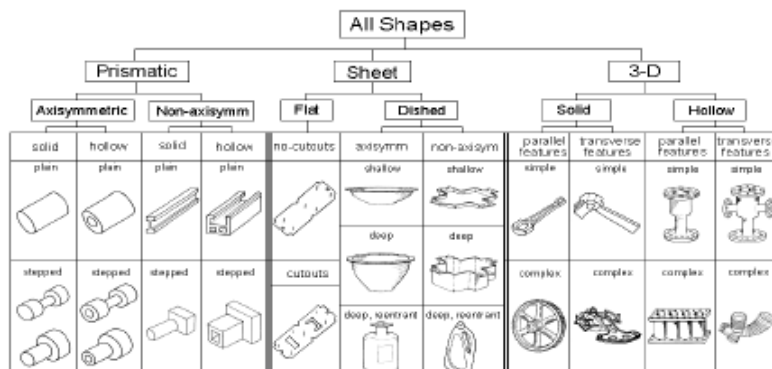
- la taille de la pièce (masse et volume), qui s'avère parfois incompatible avec la capacité des installations de production ;
- la forme générale de la pièce: les procédés permettant d'obtenir les pièces élancées (longues ou plates) ne sont pas les mêmes que ceux qui fournissent les pièces de forme plutôt isométrique ;
- la valeur de la plus petite dimension cotée c'est-à-dire la dimension du plus petit détail de la pièce, ou bien l'épaisseur minimale de matière d'une paroi, ou encore le plus petit rayon de courbure de congé ou d'arrondi ;
- l'effectif de la série de pièces identiques à produire : les procédés sont plus ou moins bien adaptés à des séries faibles ou importantes, essentiellement à travers le coût de fabrication qu'ils impliquent. De plus, du procédé choisi va dépendre la durée de fabrication ;

- la valeur absolue de la tolérance exigée sur la cote la plus précise de la pièce ;

PIECES MOULEES EN SABLE	Plus grande dimension de la pièce	NF A 22-411					
		Paliers de dimension en mm		Paliers de dimension en mm			
Tolérance pour pièces en fonte gris ou alu	jusqu'à 250	± 0,25	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,6	± 0,8
Tolérance pour pièces en fonte gris ou alu	de 250 à 630	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,6	± 0,8	± 1,0
Tolérance pour pièces en fonte gris ou alu	de 630 à 1 600	± 0,4	± 0,5	± 0,6	± 0,8	± 1,0	± 1,5
PROCEDES SPECIAUX		Tolérance en % pour dimension inférieure à 250 mm					
Précision au sable auto secour		± 0,5 % avec une tolérance minimale de ± 0,05 mm					
Précision Colson		± 0,5 % avec une tolérance minimale de ± 0,1 mm					
Précision à la cire perdue		± 0,2 % avec une tolérance minimale de ± 0,05 mm					
En coquille, par gravité		± 0,5 % avec une tolérance minimale de ± 0,2 mm					
En coquille, sous pression		± 0,3 % avec une tolérance minimale de ± 0,1 mm					
PIECES OBTENUES PAR DEFORMATION		Paliers de dimension en mm					
Forgeage	à froid	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,6	± 0,8	± 1,0
	à chaud	± 0,5	± 0,6	± 0,8	± 1,0	± 1,5	± 2,0
Mettage	à froid	± 0,5	± 0,6	± 0,8	± 1,0	± 1,5	± 2,0
	à chaud	± 0,7	± 0,8	± 1,0	± 1,5	± 2,0	± 3,0
PIECES OBTENUES A PARTIR DE TOILES		Acier		Alu		Cu	
Assemblage par soudage	à 2 millimètres par mètre	± 1 millimètre par mètre		± 1 millimètre par mètre		± 1 millimètre par mètre	
	avec une tolérance minimale de ± 1 mm	avec une tolérance minimale de ± 0,5 mm		avec une tolérance minimale de ± 0,5 mm		avec une tolérance minimale de ± 0,5 mm	
Découpage à la presse	à froid	± 0,2	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,6	± 0,8
	à chaud	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,6	± 0,8	± 1,0
PIECES OBTENUES PAR ENLEVEMENT DE MATIERE		Précision		Précision		Précision	
Alésage	à froid	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,12
	à chaud	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,12	± 0,15	± 0,20
Fraisage	à froid	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,12
	à chaud	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,12	± 0,15	± 0,20
Tournage	à froid	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,12
	à chaud	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,12	± 0,15	± 0,20



- le niveau de complexité de la pièce, qui témoigne de sa difficulté d'obtention, indépendamment des caractéristiques géométriques mentionnées précédemment. Il est estimé à partir d'une combinaison log des cotes indépendantes de la pièce et des précisions sur chacune d'elle ;



- l'état de surface, en particulier les valeurs de rugosité exigées sur certaines surfaces fonctionnelles ;

FINISSE	OBSERVATION	ILLUSTRATION	SURFACE BRÈVE	
			REPRÉSENTATION GRAPHIQUE À LA FONCTION DU	DES SURFACES RÉVÉLÉES (1) PAR ÉCLAIRAGE
1	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
2	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
3	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
4	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface

Finish, μm	Process	Typical Application
$R = 0.01$	Lapping	Mirrors
$R = 0.1$	Precision grind or lap	High-quality bearings
$R = 0.2 - 0.5$	Precision grinding	Cylinders, pistons, crms, bearings
$R = 0.5 - 2$	Precision machining	Gears, ordinary machine parts
$R = 2 - 10$	Machining	Light-loaded bearings,
		Non-critical components
$R = 3 - 50$	Unfinished castings	Non-bearing surfaces

FINISSE	OBSERVATION	ILLUSTRATION	SURFACE BRÈVE	
			REPRÉSENTATION GRAPHIQUE À LA FONCTION DU	DES SURFACES RÉVÉLÉES (1) PAR ÉCLAIRAGE
1	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
2	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
3	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
4	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface

- l'état de surface, en particulier les valeurs de rugosité exigées sur certaines surfaces fonctionnelles ;

FINISSE	OBSERVATION	ILLUSTRATION	SURFACE BRÈVE	
			REPRÉSENTATION GRAPHIQUE À LA FONCTION DU	DES SURFACES RÉVÉLÉES (1) PAR ÉCLAIRAGE
1	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
2	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
3	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
4	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface

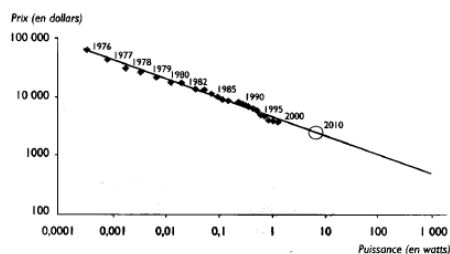
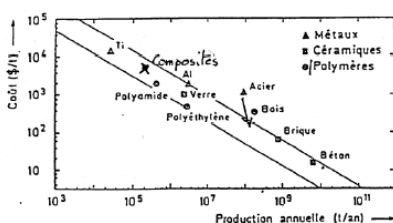
Finish, μm	Process	Typical Application
$R = 0.01$	Lapping	Mirrors
$R = 0.1$	Precision grind or lap	High-quality bearings
$R = 0.2 - 0.5$	Precision grinding	Cylinders, pistons, crms, bearings
$R = 0.5 - 2$	Precision machining	Gears, ordinary machine parts
$R = 2 - 10$	Machining	Light-loaded bearings,
		Non-critical components
$R = 3 - 50$	Unfinished castings	Non-bearing surfaces

FINISSE	OBSERVATION	ILLUSTRATION	SURFACE BRÈVE	
			REPRÉSENTATION GRAPHIQUE À LA FONCTION DU	DES SURFACES RÉVÉLÉES (1) PAR ÉCLAIRAGE
1	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
2	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
3	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface
4	État de surface obtenu par usinage, tournage, alésage, etc.		PRODUCTION (pour NF E 2017)	- Finesse de surface - Taux de défauts - Qualité de la surface
				- Rugosité - Qualité de la surface

3. Paramètres liés au contexte technico-économique

Ces paramètres sont conditionnés en particulier par :

- la disponibilité du matériel et du savoir-faire lié au procédé (nature des machines, installations, infrastructure, puissance nécessaire, température accessible, ...);
- la cadence de production, et ses conséquences sur les délais de fabrication, qui dépend elle-même de la capacité de production mise en jeu, et qui conditionne largement l'amortissement du matériel de production (frais fixes), et donc le coût final de production de la pièce.

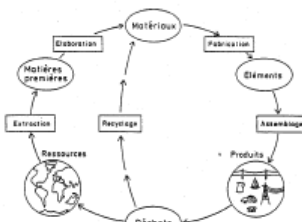


Evolution du prix du watt photovoltaïque

4. Prise en considération de l'impact sur l'environnement

Le contenu en énergie de la pièce finie dépend du matériau et du procédé choisi, du coût énergétique et du degré de perfectionnement du procédé, soit en particulier :

- du coût de fabrication en énergie ;
- des rejets de résidus, effluents, sous-produits qui peuvent s'avérer dangereux ;
- des déchets d'usinage, copeaux : ils sont, d'une part, la cause d'une perte de matériaux, mais, de plus, ils posent parfois des problèmes épineux car ils doivent parfois être recyclés séparément ;
- du recyclage du produit fini : collecte des matériaux à recycler, choix du mode d'assemblage (si mal choisi, peut rendre plus difficile le démontage et le recyclage du produit assemblé en fin de vie).



Cycle des matériaux (d'après: Moseley and Man's Needs, 1974)

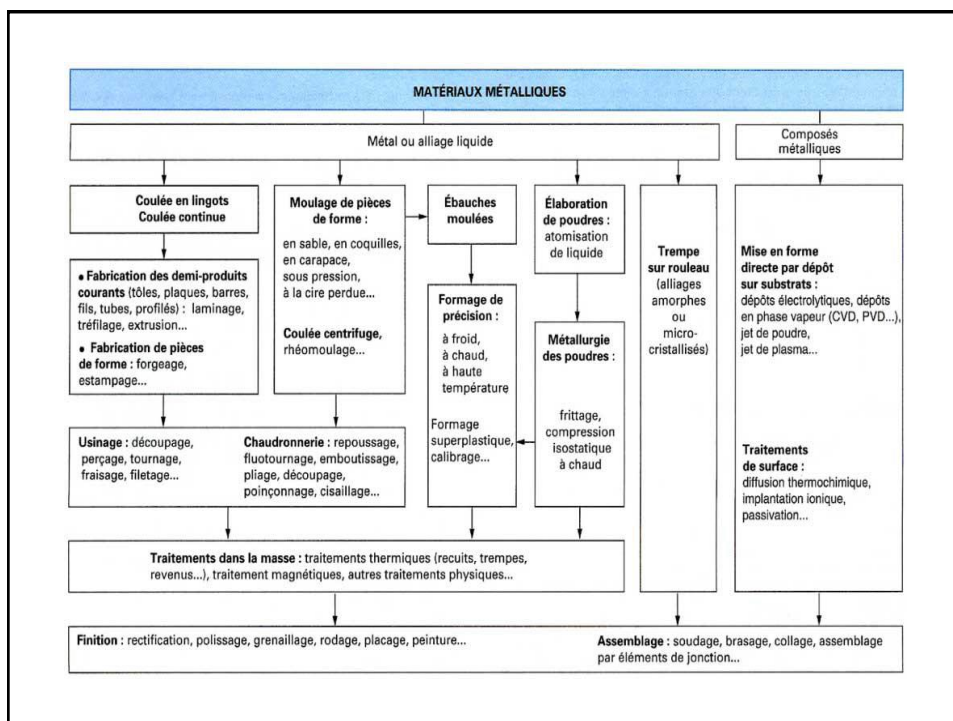
1. Métaux et alliages métalliques

Les différents procédés utilisés exploitent pour l'essentiel deux caractéristiques spécifiques des métaux et alliages :

- leur **température de fusion** relativement accessible aux technologies actuelles (pièces coulées, moulées, fabriquées par métallurgie des poudres,...)
- leur **ductilité intrinsèque**, éventuellement favorisée par l'élévation de température (estampage, laminage, emboutissage, tréfilage, extrusion, forgeage,...).

PROCESS CAPABILITIES FOR THE MAIN CASTING TECHNIQUES*

Process	Material	Normal technical weight limit (kg)	Thinnest section (mm)	Surface finish (μm) centre line average	Dimensional tolerance as a dimension of x mm
Sand moulding	Steel	0-1 - 200 000	6	8	0.025 x to 0.030 x
	Iron	0-01 - 50 000	3-5	8	
	Aluminium	0-03 - 100	3	4	
Shell moulding	Steel	0-03 - 120	3-5	6	0.010 x to 0.025 x
	Iron	0-03 - 50	3	6	
	Aluminium	0-03 - 15	1-3	2-5	
Plaster casting	Aluminium	0-1 - 50	1-3	1	0.005 x
	Steel	0-005 - 25	1	1	
Investment casting	Aluminium	0-002 - 10	0.8	1	0.003 x to 0.005 x
	Steel	0-1 - 10	5	2	
Permanent mould casting	Aluminium	0-1 - 20	3	2	0.010 x to 0.025 x
	Aluminium	0-015 - 25	0.8	1	
Die casting	Aluminium	0-05 - 50	0.8	1	0.0015 x
	Zinc				



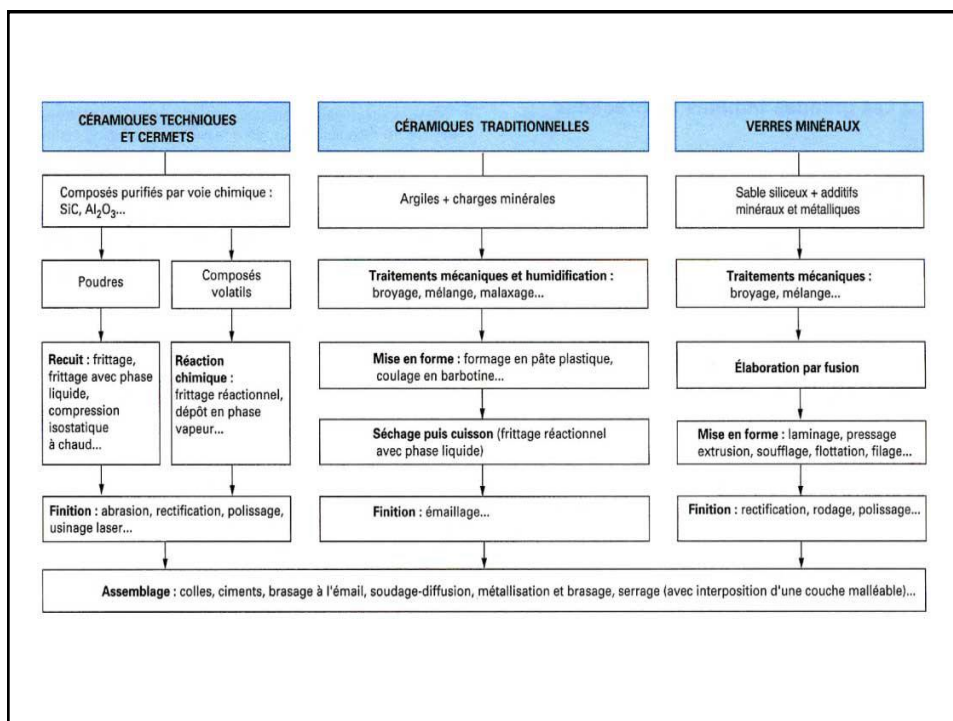
2. Verres et céramiques

La dureté et la fragilité de ces matériaux rendent très difficile leur usinage et pratiquement impossible leur mise en forme par plastification (à l'exception des verres minéraux).

La température de fusion des céramiques est généralement élevée : il est donc impossible d'utiliser les procédés de fonderie et de moulage pour obtenir une pièce de forme en céramique. On devra avoir recours aux **techniques de frittage**, à partir de la matière première sous forme pulvérulente que fournissent les procédés les plus courants d'élaboration des céramiques par voie chimique.

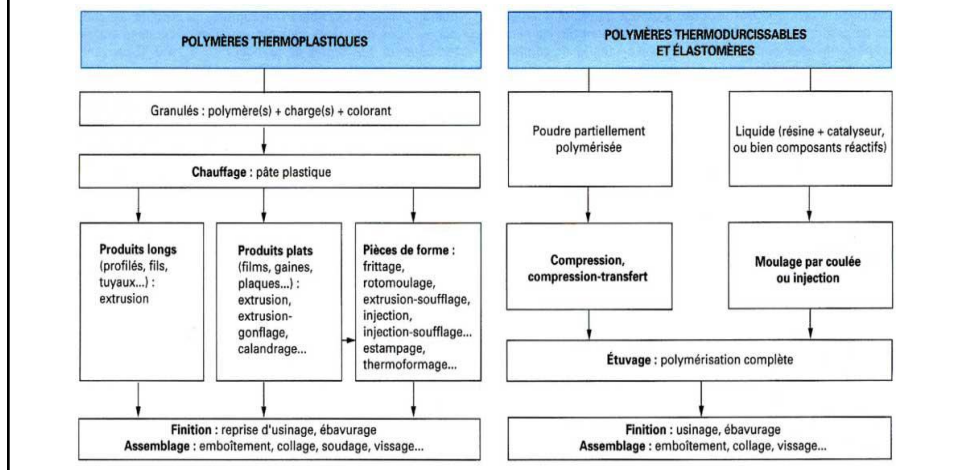
Idem pour les *cermets*, mélanges de céramiques et de métaux, élaborés par frittage de poudres de ces deux types de matériaux.

Dans le cas des ciments et des bétons, la *prise* qui permet de les faire passer de l'état visqueux à l'état solide est une réaction chimique d'hydratation de la chaux et de la silice qu'ils contiennent.



3. Polymères et élastomères

Ces procédés diffèrent dans leurs principes selon que le polymère travaillé est thermoplastique, donc malléable à chaud, ou thermodurcissable, donc polymérisant à chaud (les élastomères étant mis en forme par des procédés similaires à ceux des polymères thermodurcissables).



Process	Advantages	Limitations
Blow moulding	Low tool and die costs High production rates Low scrap rates	Restricted to hollow articles Essentially a two step process (follow tube necessary) Wall thickness difficult to control
Casting	Produces one-piece complex hollow shapes Large articles can be moulded Low mould costs	Labour cost high Restricted to simple shapes
Compression moulding	Low finishing costs Large component can be produced Little material waste	Tooling costs can be high Close tolerances difficult to achieve
Extrusion	Low setting costs High production rates	Close tolerances are difficult to achieve Parts must have uniform, even sections
Injection moulding	Variety of complex cross sections can be produced High production rates Parts have good surface finish	High tool and die costs Large production runs necessary for economy
Rotational moulding	Complex shapes can be produced Low tooling costs Large area parts can be produced No seams	Size of parts limited Slow production rates Cumbersome material loading and part removal
Vacuum forming of sheet materials	Low cost technique Thin cross section parts can be produced	Restricted to articles with low profile
Pressure forming of sheet materials	Used for deep drawn articles Can be used on sheet material too thick for vacuum forming. High production rates	Expensive process. Highly polished moulds required
Mechanical forming of sheet materials	High production rates	Restricted to simple shapes
Cold forming	High production rates Low tooling costs	Thin parts not economical
Transfer moulding	Rapid production rates Thin sections are possible Delicate inserts may be moulded in-situ	Moulds complex and expensive Component size limited
Slush moulding	Low mould costs Can produce fairly intricate articles with good finish	Slow production rates

Assembly methods	Adhesive bonding	Dielectric welding	Induction bonding	Mechanical fastening	Solvent welding	Spin welding	Staking	Thermal welding	Ultrasonic welding
Thermoplastics									
Acrylonitrile	X			X	X	X	X	X	X
Isobutene styrene	X			X	X	X	X	X	X
Acetal resins	X		X	X	X	X	X	X	X
Acrylic resins	X		X	X	X	X	X	X	X
Cellulose acetate	X		X	X	X	X	X	X	X
Cellulose acetate butyrate	X		X	X	X	X	X	X	X
Cellulose propionate	X		X	X	X	X	X	X	X
Chlorinated polyether	X		X	X	X	X	X	X	X
Ethylene copolymers	X	X		X	X	X	X	X	X
Fluoro plastics	X			X	X	X	X	X	X
Methyl methacrylate	X			X	X	X	X	X	X
Nylon	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyamide - imide	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyamide	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyarylether	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyarylsulphone	X		X	X	X	X	X	X	X
Polybutene	X		X	X	X	X	X	X	X
Polybutene - ABS	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyethylene	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyethylene oxide based materials	X	X		X	X	X	X	X	X
Polyethylene sulphide	X			X	X	X	X	X	X
Polyimide	X		X	X	X	X	X	X	X
Polypropylene	X		X	X	X	X	X	X	X
Propylene copolymers	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyurethanes	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyurethane	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyvinyl chloride	X		X	X	X	X	X	X	X
Polyvinyl chloride copolymers	X	X		X	X	X	X	X	X
PVC - acrylic compounds	X	X		X	X	X	X	X	X
PVC - ABS compounds	X	X		X	X	X	X	X	X
Styrene acrylic nitrile	X		X	X	X	X	X	X	X
Thermoplastic polyesters	X		X	X	X	X	X	X	X

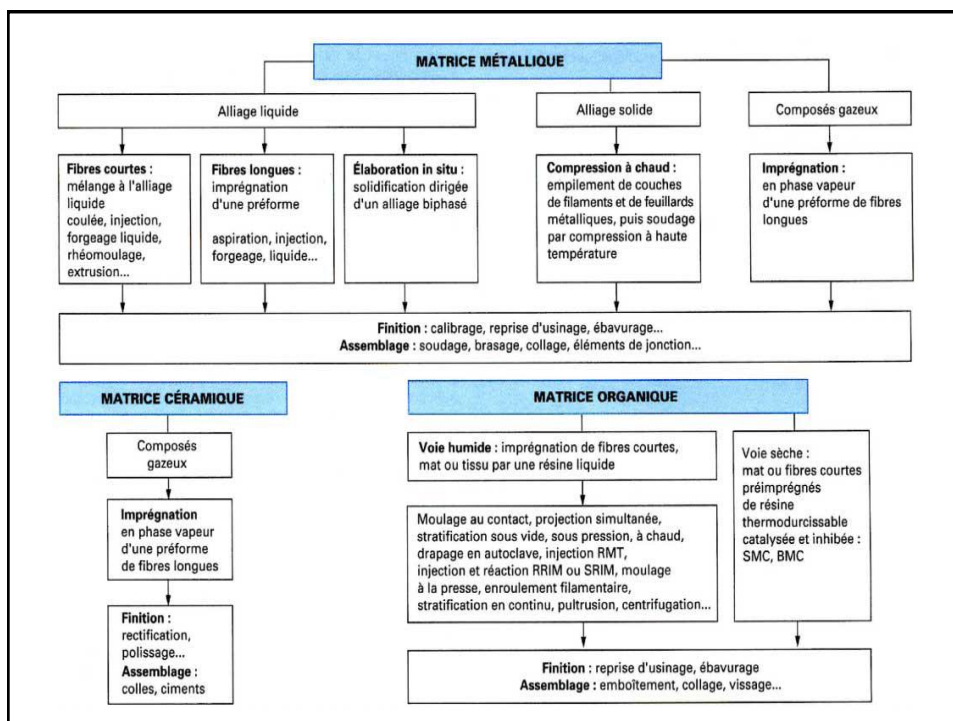
4. Matériaux composites

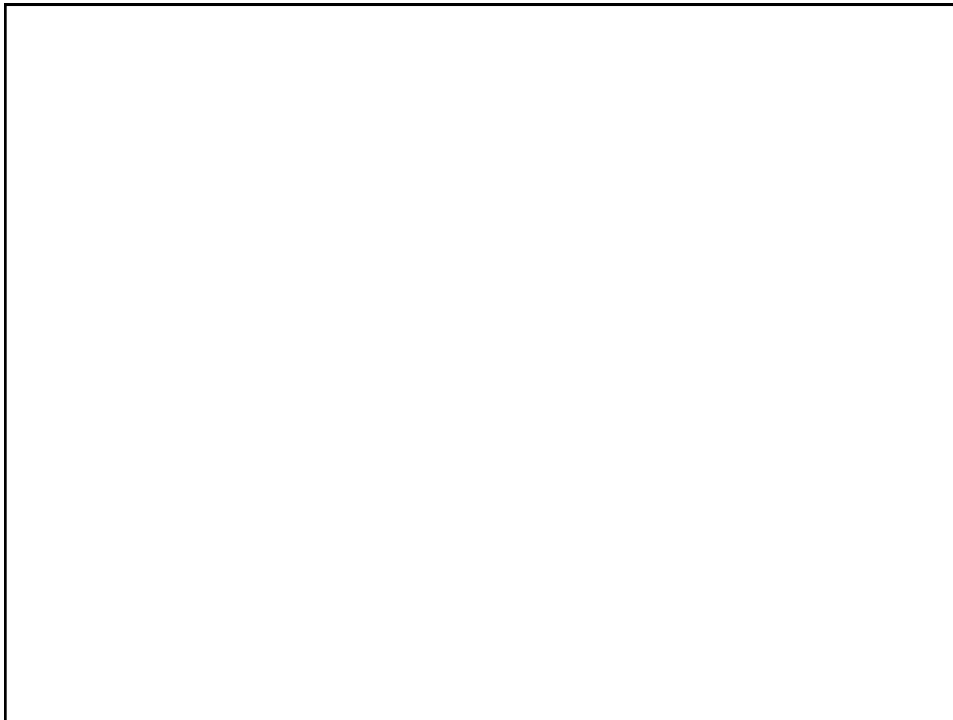
Les procédés employés diffèrent essentiellement en fonction de la nature de la matrice du composite (métallique, céramique ou polymère), qui impose le recours à des technologies de mise en forme compatibles avec la classe de matériau à laquelle elle appartient.

- Les **matériaux renforcés par des fibres ou des particules** peuvent être obtenus par une grande variété de techniques, les renforts étant ajoutés à la matrice avant la mise en forme.

- Les **mousses et les matériaux cellulaires** peuvent être fabriqués à partir de pratiquement tous les matériaux homogènes appartenant aux classes précédentes (y compris le verre ou l'aluminium) en utilisant un gaz comme agent d'expansion du matériau liquide ou visqueux.

- Les **multimatériaux et les matériaux à gradient de propriétés** sont élaborés par des techniques de dépôt, de traitement superficiel, de collage, de stratification ou d'assemblage proches de celles utilisées pour certains composites.

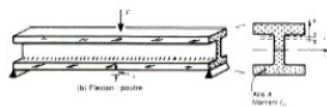




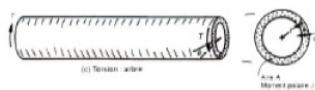
Nom donné à certains composants du fait de leur fonction
quelle que soit leur géométrie



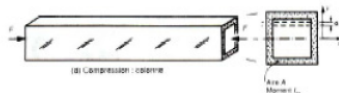
une **barre** supporte une charge en **traction**



une **poutre** supporte un moment de **flexion**



un **arbre** supporte un couple de **torsion**



une **colonne** supporte une charge en **compression**