

Matériaux

Un matériau est la [matière](#), substance, qui constitue un [objet](#), une pièce, un corps [solide](#) (non [fluide](#)).

Cette leçon présente les matériaux utilisés pour fabriquer les objets courants et techniques selon une classification. Pour chaque catégorie de matériaux on y indique les avantages, inconvénients, emplois (applications), sources et procédés d'élaboration

Sommaire

| | |
|---|----|
| 1. Matériaux simples..... | 1 |
| 1.1. Céramiques..... | 1 |
| 1.2. Métaux..... | 2 |
| 1.3. Matériaux organiques..... | 4 |
| 2. Matériaux hybrides..... | 6 |
| 2.1. Mousses..... | 6 |
| 2.2. Composites..... | 7 |
| 3. Caractéristiques des matériaux..... | 8 |
| 3.1. Propriétés physiques macroscopiques..... | 8 |
| 3.2. Propriétés techniques, économiques et écologiques..... | 9 |
| 3.3. Propriétés microscopiques..... | 9 |
| 4. Références..... | 9 |
| 5. Annexe..... | 10 |
| 5.1. caractéristiques de matériaux industriels usuels..... | 10 |
| 5.2. composition en éléments chimiques..... | 11 |

On peut distinguer les matériaux *simples* et matériaux *hybrides* (ou *composés*).

1. Matériaux simples

Ce sont des matériaux qui sont [constitués d'une seule substance](#) ; ils sont à première vue homogènes ([ont des caractéristiques constantes dans l'espace](#)).

On y distingue les matériaux *minéraux* (*céramiques et métaux*) produits à partir d'extraits du sol de la terre et les matériaux *organiques* (*naturels ou plastiques*) issus des tissus qui compose les êtres vivants.

1.1. Céramiques

Ce sont des matériaux à liaisons ioniques ou covalentes. Ils ont donc une cohésion [forte](#) mais le caractère directionnelles des liaisons les rend [fragiles](#) ou peu plastiques (déformables) à température ambiante.

1.1.1 Céramiques traditionnelles

La [pierre](#) est employée depuis le paléolithique pour l'outillage et depuis l'antiquité pour la construction de bâtiment et ouvrages. Disponible partout sous différentes nuances (calcaire, marbre, granit, grès, ardoise) ce matériau, ne nécessitant pas d'autre énergie que sa taille et son transport, est résistant et durable.

La terre ou [argile](#), très largement disponible, crue ou cuite à haute température (pour améliorer ses performances) permet de faire des [porcelaines](#) (au [kaolin](#)), [briques](#) modulaires pour la construction de bâtiments (dès le début de l'antiquité, notamment à Babylone, et jusqu'à aujourd'hui).

Le [plâtre](#) est produit de la calcination de gypse minéral ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) à environ 180°C ce qui permet d'enlever des molécules d'eau et de donner de l'anhydrite qui, lorsqu'on la mélange avec de l'eau se réhydrate et se fige en un solide blanc et dur qu'on utilise pour faire des moules et des pièces coulées, des revêtements muraux ignifugés ([résistant au feu](#)), des décors ainsi que des bandages orthopédiques.

Le [ciment](#) est obtenu par calcination d'un mélange de craie ou de pierre à chaux avec de l'argile, suivie d'un broyage en poudre très fine. Mélangé à l'eau, il s'hydrate et se fige en un solide dur et gris. Il sert de matrice au [béton](#) (un composite).

Le [diamant](#), pierre précieuse, le plus dur et le plus cher des matériaux, est utilisé – outre la bijouterie – pour les outils de coupe d'abrasion, revêtement anti-usure, techniques laser et micro-ondes.



base de la pyramide de Khéops en calcaire



bas-relief de Babylone en brique

1.1.2 Verres



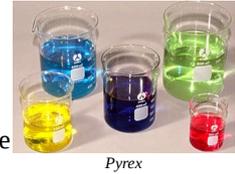
verre sodocalcique

Les verres, principalement constitués de silice (SiO_2) comme le quartz des grains de sable, sont d'un grand emploi pour leur propriétés de transparence et de stabilité chimique.

Le [verre sodocalcique](#) communément appelé verre [blanc](#) est utilisé pour les vitres, les bouteilles et les ampoules électriques ; bon marché et consommé en très grande quantités, c'est le plus commun des verres. Son nom suggère sa composition : 13-17% de NaO ([la soude](#)), 5-10% CaO ([chaux](#)) et 70-75% SiO_2 ([silice](#)). Il a une basse température de fusion, est facilement soufflé et moulé ; il est optiquement clair à moins qu'il ne soit impur, comme c'est le cas des verres verts ou bruns qui filtrent la lumière.

Le **verre de silice**, de grande transparence, est pratiquement du SiO_2 pur. Il a un point de fusion exceptionnellement élevé et il est difficile à travailler, mais, plus que tout autre verre, il résiste à la température et aux chocs thermiques. Il est utilisé pour les ampoules électriques de haute puissance.

Le **verre de borosilicate** (Pyrex) est utilisé pour des plats de cuisson et l'équipement de laboratoire de chimie. C'est du verre sodocalcique où la chaux a été remplacée par du borax (B_2O_3), ce qui confère un point de fusion et une résistance au choc thermique plus élevés mais rend sa mise en forme plus difficile ; il a un coefficient d'expansion plus bas.



Pyrex



ampoule de lampe halogène en verre de silice

1.1.3 Céramiques techniques

Développées récemment à partir de techniques coûteuses, les céramiques techniques ont des performances de dureté et résistance à l'abrasion qui leur permet une large application dans les procédés industriels.



bougie en alumine

L'**alumine** (Al_2O_3) bon marché, facile à mettre en œuvre (notamment par oxydation contrôlée de l'aluminium) très largement utilisé dans l'industrie. Le plus souvent fabriquée en pressant ou en frittant des poudres, l'alumine, qui est blanche lorsqu'elle est pure, présente de nombreux avantages : isolant électrique, haute résistance mécanique, bonne résistance à l'abrasion et tenue en température jusqu'à 1650°C , excellente stabilité chimique et conductivité thermique modérée. Cependant l'alumine a une résistance limitée au chocs thermiques et mécaniques. Elle sert à réaliser des bougies d'allumage, isolateurs électriques, cadrans de montre et des vitres résistantes.

Le **carbure de silicium** (SiC), fabriqué en faisant fondre du sable et du coke à 2200°C . Il est très dur et maintient sa résistance à haute température; il a une bonne résistance au choc thermique, d'excellentes résistance à l'abrasion et stabilité chimique mais il est fragile comme toutes les céramiques. Application : outils de coupe, abrasif des « papiers de verre » de haute qualité



outil de coupe en carbure

Le **carbone** (C).

Il est disponible sous forme de charbon (tourbe, lignite, houille dont on tire le coke pour réduire pour réduire le minerai de fer) peut se présenter sous la forme de **graphite** qui a de nombreuses applications : mine de crayon, pièces de frottement (balais de moteurs), joints d'étanchéité, lubrifiants, absorbant ou réducteur chimique, notamment en sidérurgie (coke des hauts-fourneaux), électro-chimie, modérateur dans des réacteurs nucléaires, bombe de désactivation des réseaux électriques.

Il peut être produit par sous forme de **fibres de carbone** (à partir d'un polymère acrylique oxydé puis carbonisé) ayant une faible densité (1,7 à 1,9), une résistance élevée à la traction-compression, une bonne flexibilité, faible résistivités électrique et thermique tenue en température et son inertie chimique (sauf à l'oxydation). Faible résistance à l'abrasion et aux chocs, peu recyclables.

Application : aérospatial, équipement sportifs.

Des **nanotubes** de carbone, observés dès 1952 et synthétisés en 1993, montrent au stade de recherches de très grandes résistances, rigidité, conductivités thermique et électriques et une faible densité.

Les nitrures dont le nitrure de bore BN ont de grandes duretés et résistance à l'abrasion utiles pour l'usinage et le traitement des métaux.

1.2. Métaux

Leur cohésion est due à la liaison métallique : elle est forte et non directionnelle (isotrope) ce qui confère aux métaux une bonne ductilité (déformabilité plastique). Cette liaison réfléchissant la lumière, ces matériaux sont opaques et brillants. Leur structure est cristalline.

1.2.1 Alliages ferreux

Les alliages de fer sont les plus utilisés des métaux, à la base de toutes les grandes constructions métalliques.

Les **fontes**, directement issues de la réduction du minerai de fer par la coke dans un haut fourneau, sont les moins coûteux de tous les métaux, très utilisé depuis la révolution industrielle. Elles contiennent pour la plupart de 3 à 4 % de carbone et de 1 à 3 % de silicium. Le carbone rend le fer très fluide lorsqu'il est fondu, lui permettant d'être coulé dans des formes compliquées pour réaliser des bâtis et carters de machines et ayant un bon amortissement. Plus fragile que l'acier mais bon conducteur thermique, elle servent à réaliser des ustensiles de cuisine.

Les **aciers** contiennent du fer et du carbone à une teneur inférieure à 1,7 %. Obtenus pas décarburation (par oxydation) des fontes ou recyclage des ferrailles. Leurs propriétés et usages dépendent de leur teneur en carbone :

Les **acier à basse teneur en carbone** servent à réaliser chemins de fer, plates-formes pétrolières, coques de bateaux (tankers, paquebots etc) et charpente de bâtiments car il sont à la fois solide, robuste, relativement mous donc facilement mis en forme et d'usage le plus général car bon marché.



roulement en acier dur (100 Cr6)



tour Eiffel en fer puddlé (fonte décarburrée), première de plus de 300 m (pendant 41 ans)

Les **aciers à hautes teneurs en carbone** (0,5-1,7%) durcissent lorsqu'ils sont trempés dans l'eau ou l'huile froide. Ils sont utilisés comme outils de coupe, cisailles, câbles et toute une multitude d'autres applications.

Les **aciers alliés** utilisent les effets d'un métal d'addition pour améliorer certaines de leur performance. Par exemple, l'**acier inoxydable** ((en) : [stainless](#) : « sans tache »), grâce au chrome et au nickel entre autres éléments qu'il contient, résiste à la corrosion dans les environnements les plus courants et reste ductile aux températures les plus basses.



Autocuiseur en acier inoxydable

1.2.2 Alliages de cuivre ou cuivreux

Le **cuivre** et ses alliages (appelés **bronzes** - désignait à l'âge du bronze 3000 – 1000 avant JC un alliage de [cuivre et d'étain](#), aujourd'hui à l'aluminium, au phosphore dont le **laiton** alliage de [cuivre et de zinc](#)) est utilisé pour sa haute ductilité (martelé en chaudronnerie) sa basse température de fusion (moulage de sculpture, cloches), sa bonne [conductivité thermique](#) (en cuisine et échanges thermiques) et [électrique](#) (câblages, électronique), sa durabilité par résistance à la corrosion (plomberie, pompes, toiture, construction navale et monnaie). N'existant plus à l'état pur, les 38 ans de réserves mondiales en font une ressource stratégique au prix élevé.

1.2.3 Alliages d'aluminium

L'élément **Aluminium** est le troisième élément le plus abondant dans la croûte terrestre (8 % de la masse) après l'oxygène et le silicium mais son principal minéral est la bauxite qu'il faut dissoudre avec de la soude puis chauffer pour extraire l'alumine électrolyser pour obtenir l'aluminium ; ce procédé de production coûteux n'a vraiment commencé que vers 1940 ; ces alliages restent encore deux fois **plus** cher que l'acier et constituent *les seconds métaux* après ce dernier et le plus importants des alliages légers ([de faible densité](#)).



Avion de ligne A380 au fuselage en aluminium

Il est facilement ductile, bon conducteur électrique et thermique avec un coefficient d'expansion faible, peu résistant à l'abrasion. En poudre il peut exploser du fait de sa réactivité. En masse, une pellicule d'oxyde se forme à sa surface le protégeant de la corrosion par l'eau et les acides mais pas par les substances fortement alcalines. Les alliages d'aluminium peuvent durcir (se rigidifier) dans le temps grâce à des traitements thermiques qui augmentent sa résistance mécanique donnant à ces alliages un rapport résistance/poids très élevé. Le silicium rend l'alliage plus fluide de telle sorte qu'il améliore sa moulabilité.

Applications typiques : films, feuilles, filaments, conducteurs électriques, carters, contenants alimentaires (ustensiles mais sa toxicité interroge, canettes), menuiserie, moteur thermiques, transport aérospatiales, aéronautique, marin et terrestre.

1.2.4 Autres alliages métalliques

L'**étain** (Sn) anciennement utilisé comme récipient, a servi (invention de 1810 par Nicolas Apert) à recouvrir l'acier (alors dit étamé, ce qui protège le fer métallique qu'il contient de [la corrosion](#)) pour réaliser des boîtes de conserve en « fer blanc » qui ont révolutionné le stockage et la conservation des aliments et liquides.

Le plomb (Pb), très malléable car à bas point de fusion, a été découvert par les romains en Grande Bretagne qui l'utilisèrent pour des tuyaux, citernes et toitures – cette dernière utilisation (comme joint de soudure) continue encore à notre époque. Responsable de la maladie du Saturnisme, il fait l'objet de diagnostics obligatoires dans le logement.

Le nickel (Ni), lorsqu'il est allié à l'acier stabilise la structure cubique face centrée qui donne sa ductilité et sa résistance à la corrosion à [l'acier inoxydable](#), et résiste aux hautes températures pour construire en "super alliages" des réacteurs d'avions.

Le **Zinc** (Zn) qui résiste à l'exposition aux acides, aux bases, recouvre encore parfois, en feuille, les comptoirs de bars. Ayant un point de fusion bas, ce métal et ses alliages sont faciles à mouler et leur fluidité leur donne une place dominante dans l'injection sous pression. Il est bon marché.

Le **tungstène** (W) est remarquable pour son très haut point de fusion de 3410°C lorsqu'il est à l'état pur. Ayant une excellente résistance au fluage (écoulement lent) jusqu'à 1400°C, sa mise en œuvre est résolue en utilisant des méthodes applicables aux poudres. Il atteint dans les [ampoules de lampes](#) (à incandescence et halogène) 2200°C mais avec une durée de vie courte. Utilisé pour la réalisation d'outils de grande dureté

Le **titane** (Ti) est le septième élément le plus abondant dans la croûte terrestre, 3ème des alliages légers, mais coûteux (plus de dix fois le prix de l'aluminium) car ses oxydes à l'état naturel nécessitent des procédés coûteux. Malgré cela, l'utilisation du titane est en croissance car il est très résistant pour une densité **faible**, a un point de fusion élevé (1660°C) et peut donc être utilisé jusqu'à 500°C ; il résiste à la corrosion car protégé par une fine pellicule d'oxyde qui se forme à sa surface, est bio-compatible. Il a des conductivités thermiques et électriques particulièrement basses, est faiblement soumis au magnétisme et a des coefficients d'expansion faibles. Applications : aérospatial, notamment pièces de moteurs à réaction et de structure, militaire (coque de sous-marins), tubes de forage, pétrolier, centrales nucléaires et thermiques, prothèses, ressort de voitures de tourisme allégées.



Moteur Vulcain 2 de la fusée Ariane intégrant du titane

Le **magnésium** (Mg) est un alliage souvent associé à l'aluminium qui est léger (densité 1,7 à 1,9), très utilisé dans la construction aérospatiale et les transports mais peut s'enflammer s'il est finement divisé dans l'air ou l'eau

(propriété utilisée la soudure de rails ou comme allume-feu de randonnée).

Les métaux rares sont

soit utilisés pour la monnaie et les bijoux (argent, or)

soit les béryllium (Be), cobalt (Co), niobium (Nb), platinoïdes (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt), terres rares (Sc, Y, Lu et les quinze lanthanides), tantale (Ta), gallium (Ga) semi-conducteur, aux propriétés particulières très utiles et avancées et sont donc des ressources stratégiques critiques.

L'indium (In) est un métal pauvre de de récente utilisation massive, notamment dans les écrans plats LCD et les panneaux photovoltaïques, dont le prix a décuplé en quelques années, qui est en pénurie.

Métalloïdes (entre métaux et non-métaux) : antimoine (Sb) ressource très rare, ayant divers usages industriels et pharmaceutique, très toxique ; germanium (Ge) métalloïde semi-conducteur

1.3. Matériaux organiques

1.3.1 Matériaux organiques naturels

Historiquement les premiers utilisés car nécessitant des opérations d'extraction et de traitement d'un degré technique basique :

Le **cuir** est une étoffe naturelle produite en tannant la peau des animaux ; de haute résistance en traction, il est exceptionnellement robuste et résilient, tout en étant flexible. Le cuir sert encore largement à l'habillement (ceintures, chaussures, vestes, sacs), et l'ameublement ; il servait à réaliser des courroies de transmission, des bandes de freins et joints d'étanchéité.



chaussure en cuir

L'os, dur et solide, facile à modeler, a servi très tôt à des petits outils (aiguilles, hameçons) ; l'ivoire, plus cher, est encore illégalement prélevé sur les défenses d'éléphants et autres animaux souvent menacés d'extinction.

Les fibres textiles végétales (coton, lin, chanvre, sisal, viscose, modal, jute, coco, jonc de mer) et animales (laine, soie, fourrure, poils) ont des usages variés, souvent très anciens et qui durent encore.

Le **bois**, composé de cellulose et lignine des troncs et branches d'arbres a été utilisé pour réaliser une multitude d'objets depuis les temps les plus anciens (sculpture, mobilier, construction d'outils, véhicules, ponts, bâtiments, mécanismes) ; il est resté le principal matériau d'ingénierie jusqu'à la fin du 17^{ème} siècle mais on continue à l'utiliser massivement particulièrement dans la construction, la menuiserie, l'ameublement, les papier et cartons.

Parmi les bois remarquables :

Le **chêne** est disponible en grands volumes, solide, durable ; très utilisé en construction (charpente) ; le hêtre chimiquement neutre est utilisé dans l'alimentaire et les jeux pour enfants. Les conifères (pin, sapin, douglas) à la croissance plus rapide et fournissant des produits bien rectilignes font aussi l'objet d'usages courants en construction.

Le **bambou** se présente sous la forme de tube creux, exceptionnellement résistant et léger, croissant si vite qu'il peut être récolté après un an. Il est utilisé pour le bâtiment et les échafaudages, pour les toits et les planchers, pour les tuyaux, seaux, cannes, paniers, cannes à pêche, volets pour des fenêtres, nattes, flèches et mobilier.



charpente traditionnelle en chêne



échafaudage en bambou

1.3.2 Matériaux organiques de synthèse – plastiques

Suite à la raréfaction de certains organiques naturels, des matériaux de synthèse ont été élaborés à partir d'autres sources : par exemple en remplacement de l'ivoire : galalithe à partir du lait de vache pour les boutons et le celluloïd à partir du bois pour les boules de billard puis utilisé pour les balles de ping-pong.

Les plastiques sont principalement des sous-produits du **pétrole**, dont la distillation puis le cracking produisent l'éthylène (gaz $\text{CH}_2=\text{CH}_2$) qui est ensuite polymérisé (transformé en de longues chaînes moléculaires – les polymères $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ etc.) sous hautes pressions et température en présence de peroxyde.

Les matériaux organiques sont constitués de polymères dont la liaison covalente assure la cohésion et qui sont liées entre elles par des liaisons de Van der Waals de moindre faible intensité ce qui explique leur grande plasticité. On leur additionne des adjuvants pour améliorer leurs propriétés (optiques, mécaniques, électriques, etc.).

1.3.2.1. Polymères thermoplastiques

Leurs liaisons intermoléculaires s'affaiblissent lorsque la température augmente (ce qui facilite leur mise en forme par moulage, injection et leur production en très grandes séries). Cependant ils ne résistent qu'à de basses températures car les liaisons intramoléculaires (covalentes) ne doivent pas être perturbées sous peine de dégradation du matériau.

Le terme polyester est dérivé de la combinaison de 'polymérisation' et 'estérification'. Les polyesters saturés sont des thermoplastiques (ce qui n'est pas le cas sinon). Ils ont de bonnes propriétés mécaniques à des températures aussi élevées que 175°C. On y compte notamment le PET.



Le **Polyéthylène téréphtalate** (PET ou PETE) est clair comme du cristal, imperméable à l'eau et au CO₂, mais pas complètement à l'oxygène. Il est robuste, résistant, facile à mettre en forme, assembler et à stériliser. Applications : connecteurs électriques, bouteilles soufflées, films (d'emballage, audio, photographiques, video), transparents pour dessin, petite voile de navigation, cartes de crédit. Il est recyclable en fin de première vie (comme fibres d'ameublement ou de rembourrage)



Le **polyéthylène** (PE), la plus simple des molécules, la première des polymères thermoplastiques, est chimiquement inerte et extrêmement résistant (eaux douce et salée, aliments, la plupart des solutions aqueuses). Bon marché et particulièrement facile à mouler et à mettre en œuvre, il accepte une grande gamme de coloris, peut être transparent, translucide ou opaque. De toucher un peu cireux, il peut être texturé mais difficilement mis en peinture. Composition : (-CH₂-CH₂-)_n. Disponible en nuances à basse densité (PEBD - LDPE) ou haute densité (PEHD - HDPE). Application : articles ménagers, sacs, récipients ou accessoires alimentaires (Tupperware, planches de découpe). Sous forme réticulée (PER) : adduction domestique d'eau.



Boîtes Tupperware en PE



Le **Chlorure de polyvinyle** (PVC) ou vinyle est un des polymères les **moins** chers, les plus polyvalents et **largement** utilisés. Dans sa forme pure (tpPVC) il est rigide et peu résistant aux chocs, de prix bas donc utilisé hors conditions extrêmes (tuyaux, raccords, profilés, panneaux, emballages, menuiserie, disques vinyles, poupées). Additionné de plastifiants le ePVC flexible a des propriétés semblables au cuir ou au caoutchouc, sert d'isolant de fils électriques, film, fibres pour tissus, simili-cuir, petites embarcations, tuyau d'arrosage, revêtement de sol, tubulures médicales.



tuyaux de PVC



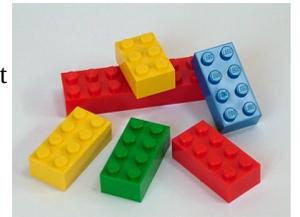
Le **polypropylène** (PP) est, comme le PE, produit en très grandes et croissantes quantités ; la longueur de sa molécule et ses branchements latéraux peuvent être ajustés par une catalyse intelligente, donnant un contrôle précis de sa résistance à l'impact et des propriétés qui influencent son aptitude à être moulé ou étiré. Dans sa forme pure, le PP est inflammable et se dégrade à la lumière solaire, ce qui peut être corrigé par ignifugeants et des stabilisants. Composition : (CH₂-CH(CH₃))_n. Il est recyclable. Applications typiques : cordages non vitaux, pièces techniques, conduites et filtres à air, plages arrières d'automobile, mobilier de jardin, tambour de machines à laver, boîtier de batterie, tuyaux et raccords, isolant de câbles, bouilloires, sous-vêtements thermiques.



Le **polystyrène** (PS) est un polymère optiquement clair, bon marché, et facilement moulable. Sa plus grande application est en mousse d'emballage, mais aussi jouets, gobelets et couverts jetables, appareils électroménagers, boîtiers d'appareils électroniques.



L'**ABS** (Acrylonitrile-butadiène-styrène) est solide, résilient et facile à mouler. Il est normalement opaque, cependant certains grades peuvent en fait être transparents ; on peut lui donner des couleurs vives. De faible coût. Il est recyclable. Composition : (CH₂-CH-C₆H₄)_n. Applications : casques, pièces de carrosserie et habitacle de véhicules, tuyauterie, boîtier d'appareils, coques de valise, plateaux pour le transport des marchandises, coques de bateau.



briques Lego en ABS

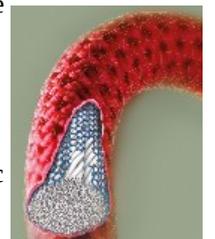
Le **Polyméthacrylate de méthyle** (PMMA ou acrylique) est transparent. C'est le thermoplastique qui ressemble le plus au verre en transparence et en vieillissement climatique. Applications : vitrage de cockpits et fenêtres d'avions, lentilles, signaux, emballages, récipients, instruments de dessin, protections des feux arrières d'automobiles, panneaux publicitaires, produits dissipant l'électricité statique, disques compacts.



optique de phare en PMMA

Le **Polycarbonate** (PC) : le cycle benzénique et le groupe carbonate -OCOO- se combinent dans le PC pur pour lui donner ses caractéristiques optiques uniques de **transparence optique**, de bonne résistance à l'impact et de rigidité même à températures relativement élevées. Il est recyclable (cat. 7). Applications : disques compacts (cd), casques de sécurité, boucliers et lunettes de sécurité, lentilles, vitres pare-balles, boîtiers d'instruments, luminaires, articles médicaux (stérilisables).

Le **nylon ou polyamide** (PA) peut être étiré sous forme de fibres aussi fines que la soie et a été très largement utilisé pour s'y substituer (bas nylons). Robuste et peu adhérent. Application : fibre dominante de l'habillement, cordages, pièce frottante moulées, boîtiers robustes, poignées.



corde à âme en nylon

En réponse aux enjeux de réduire les émissions de gaz à effet de serre en production et d'accroître le caractère biodégradable en fin de vie ont été élaborés des bio- plus précisément, **agro-plastiques** :

L'acétate de cellulose (rayonne, soie artificielle, viscose) ancien dérivé du bois ou du coton produit par réaction avec de l'acide acétique, a remplacé la nitrocellulose (celluloïd) inflammable des bobines de film pour le cinéma, est utilisé dans les lunettes, était utilisé dans les briques de Lego avant d'être remplacé par l'ABS. Ne produit aucun résidu nocif pour l'environnement.

L'**acide polylactique** (PLA) pour la fabrication de petites pièces, d'emballage, de sutures résorbables ou la féculé de patate permettant de réaliser des sacs plastiques.

1.3.2.2. Polymères thermodurcissables

Produit par polymérisation irréversible par réticulation (formation d'un réseau de polymère) d'une « résine » qui réagit sous l'action de la chaleur en présence de réactifs (catalyseur et accélérateur). Le produit fini solide, généralement rigide, est infusible, non recyclable.

La **bakélite**, de la catégorie des **phénoliques**, commercialisée en 1909, a déclenché une révolution dans la conception de produits. C'était pour l'époque un matériau rigide, assez résistant, facile à mouler ; ce qui permettait de produire massivement et à bon marché des objets auparavant fabriqués manuellement en bois, métaux. Maintenant, bien que de moindre part de marché, les phénoliques ont encore une valeur irremplaçable : rigides, chimiquement stables, ils ont de bonnes propriétés électriques, résistent au feu, sont facile à mouler et restent bon marché.

Les **polyesters** sont thermodurcissables si ils sont insaturés. La plupart sont utilisés dans des composites avec des fibres de verre ayant un faible coût et étant modérément rigides et résistants : pièces coulées, mobiliers, boules de bowling, bateaux, cabines de camions, luminaires.

Les **époxy**s ont d'excellentes propriétés mécaniques, électriques et adhésives, une bonne résistance à la chaleur et aux attaques chimiques. Ils ont un coût plus élevé et sont utilisés comme adhésifs (colle Araldite, assemblage à haute résistance de matériaux dissemblables), recouvrements de surface (encapsulation de bobines électriques et de composants électroniques).

1.3.2.3. Élastomères

Polymères très élastiques : à grande déformation avant rupture car constitués de longues chaînes moléculaires repliées au repos.

Le **caoutchouc naturel** (latex) était déjà connu des indigènes au Pérou il y a plusieurs siècles. Il constitue maintenant un des principaux produits d'exportation de la Malaisie. Le Latex, la sève de l'arbre-caoutchouc, est réticulée (vulcanisée) en la chauffant avec du soufre; le degré de réticulation détermine ses propriétés. C'est l'élastomère le plus largement utilisés de tous – plus de 50 % de tout les élastomères qui sont produits.

Les **caoutchoucs synthétiques** sont des produits synthétiques dont les propriétés ressemblent à celles du caoutchouc naturel : ils ont une bonne résistance à l'abrasion, à la déchirure et à la flexion, avec une perméabilité exceptionnellement basse aux gaz et une résistance jusqu'à 150°C. Ils sont électriquement très isolants, de qui justifie ce type d'emploi. Le butylcaoutchouc est l'un des matériaux les plus importants pour les chambres à air. Le caoutchouc styrène butadiène est le caoutchouc synthétique le plus populaire pour les pneus, il est pratiquement toujours composé avec des charges renforçantes comme le noir de carbone. Les polychloroprènes (Néoprène) constitue les combinaisons de plongée. Les polyesters peuvent être des élastomères. Les polyuréthanes peuvent se présenter sous forme de grades thermoplastiques, élastomères et thermodurcissables. Ils sont facilement moussés (40 % des cas). Ce sont les plus solides des élastomères. Ils sont utilisés dans les textiles (Lycra ou Spandex) doux et élastiques.

Les **silicones** sont des matériaux à hautes performances et à prix élevés. Composé de longues chaînes de groupements O-Si-O-Si-, ils ont une faible résistance mécanique mais peuvent être utilisés dans une plage exceptionnelle de températures (-100°C à +300°C). Ils ont une grande stabilité chimique. Application : moules, prothèses et accessoires médicaux.

2. Matériaux hybrides

Ils sont **hétérogènes** : assemblage composé de plusieurs **matériaux simples ou matières dans d'autres états** dont les propriétés sont ainsi **combinées**.

Par exemple la porcelaine est réalisée avec un dépôt de glaçure ou d'email (cuit) pour améliorer sa résistance à l'abrasion en surface

2.1. Mousses

C'est l'assemblage d'un solide et cellules de gaz. Les mousses peuvent être à cellules ouvertes ou fermées, micro cellulaires ou grades de filtrage.

Le **liège** est une mousse naturelle à cellules fermées, il est étanche et remarquablement stable, survivant dans le col d'une bouteille de vin pendant 50 ans ou plus sans se dégrader ou contaminer le vin. Les planches en liège sont faites en comprimant à chaud le liège granulé, elles sont utilisées pour l'isolation des murs et des plafonds. Le liège lui-même offre une combinaison remarquable de propriétés. Il est léger bien que résilient, isole contre la chaleur et le son, possède un coefficient de friction élevé, est imperméable aux liquides, chimiquement stable et résistant au feu. Applications typiques : bouchons de bouteilles; flotteurs, gilets de sauvetage; décoration des murs et des sols; isolation; chaussures; emballage; articles de fantaisie; la décoration; joints; surfaces de routes; linoléum; polissage; tampons de frein; amortissement des vibrations.

Les **mousses polymériques** sont fabriquées par l'expansion contrôlée et la solidification d'un liquide ou d'une masse fondue par un **agent gonflant** qui peut être physique, chimique ou mécanique. Le matériau cellulaire qui en résulte a une densité plus **basse**, ainsi



poste de radio en bakélite



gants en latex



chambre à air en butylcaoutchouc de synthèse



le liège,
écorce d'une variété de chêne



siège auto en mousse de PU

qu'une rigidité et une résistance plus **faibles** que le matériau parent. Cette diminution de propriétés dépend de sa densité relative – la fraction en volume de matériau solide dans la mousse. Les polyuréthanes sont facilement moussés en les mélangeant avec un agent gonflant. Applications typiques : Isolation thermique, parties centrales pour structures sandwich, panneaux, partitions, réfrigération, absorption d'énergie, emballages, bouées, flotteurs.

Sur le même principe

- la laine qui emprisonne beaucoup d'air voir est un isolant thermique qui a inspiré ceux en laine de roche et de verre très utilisés dans le bâtiment
- la brique d'argile extrudé avec des cellules d'air (type monomur),

2.2. Composites

Les composites sont un des grands développements du 20ème siècle dans le secteur des matériaux. Ils sont élaborés avec des fibres prises dans une résine. Les fibres supportent les charges mécaniques, alors que le matériau de la matrice transmet la charge aux fibres et offre la ductilité et la résistance aux chocs ainsi que la protection des fibres contre les dégâts causés par la manipulation et l'environnement. C'est le matériau de la matrice qui limite la température de service et les conditions de mise en œuvre. Les fibres continues donnent les performances les plus élevées.

2.2.1 Composites à matrice céramique

Le **béton**, inventé dans de l'empire Romain et encore de grand usage contemporain est un matériau composite : sa matrice est du **ciment** ; le renfort est **un mélange de sable et de gravier (l'agrégat)** occupant 60-80% du volume. L'agrégat accroît la rigidité et la tenue mécanique et réduit le coût (l'agrégat est bon marché). Le béton est résistant en compression mais craque facilement en traction. Ceci est combattu en ajoutant des renforts d'acier sous forme de fils, grilles ou barres ('rebar' en anglais) : c'est le **béton armé**; il peut supporter des charges utiles même lorsque le béton est craqué. Des performances encore plus élevées sont obtenues en utilisant des renforts de fils d'acier qui sont précontraints (préalablement étirés) avant que le béton ne prenne. En relâchant leur tension, les fils tirent le béton en compression ; le béton ne craque pas avant que les charges qui lui sont appliquées ne dépassent ces contraintes en compression : c'est le **béton précontraint**.

Les plaques de plâtre (plus connu sous la marque « **placo** ») sont composés d'un mélange de plâtre et fibre de bois.



structures complexes en béton renforcé

2.2.2 Composites à matrice organique

Composites de bois :

Lamellé collé
 contre-plaqué
 Medium (MDF)
 OSB



cloisons en contre-plaqué

Les composites à fibres de verre-polyester (GFRP) sont les moins chers et les plus largement utilisés avec des fibres coupées (les GFRP de hautes performances utilisent des fibres continues). Application : plaquettes de circuits électroniques, coques de bateau, carrosserie et les panneaux d'habillage intérieur des voitures, appareils ménagers, mobilier.



GFRP oil separator tank

Les composites à matrice époxy, plus résistants et plus chers, permettent de réaliser des outils pour le moulage de thermoplastiques en petite séries.

L'utilisation de thermoplastiques pour la matrice est une innovation récente qui permet le recyclage.

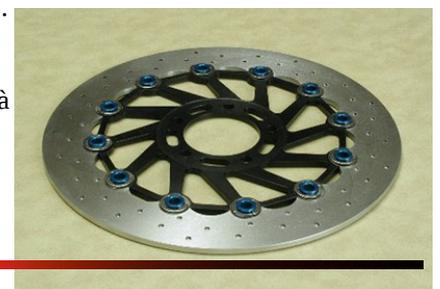
Les composites à fibres de carbone (CFRP) offrent une plus grande **rigidité et une meilleure tenue mécanique** mais ils sont nettement plus chers. Dans une matrice polyester ou époxy, ils ne sont pas recyclables.



Un cadre de vélo en CFRP pesant seulement 1,08 kg

2.2.3 Composites à matrice métalliques (CMM)

Les composites à matrice métallique sont des **métaux renforcés par des particules de céramique**. Les plus utilisés sont basés sur de l'aluminium renforcé avec des particules de carbure de silicium ou d'alumine. Le renforcement accroît la rigidité, la résistance mécanique et la température maximale de service sans accroître sérieusement le poids. L'attrait des composites à matrice métallique comme le Duralcan réside dans leurs rapports rigidité/poids et résistance mécanique/poids qui permet une réduction du poids pour des automobiles ou des équipements de sports.



Disque de frein en Al-SiC

3. Caractéristiques des matériaux

3.1. Propriétés physiques macroscopiques

3.1.1 Propriétés générales :

- Masse Volumique ρ (kg/m³) ou densité (sans unité) : rapport de la masse volumique à celle de l'eau (1 kg/m³). Exemples : mousse polymériques 0,01 – 0,5 ; bois 0,1-1,5 ; plastique 0,9 - 2 ; magnésium 1,7 ; céramiques 1,7-5,5 ; aluminiums 2-3 ; titane 4,5 ; cuivreux 7-10 ; aciers 7,2 – 7,8 ;

3.1.2 Propriétés mécaniques

- Limite élastique σ_e ou R_e (MPa) : indique la contrainte ($\sigma = \text{effort } F/\text{section } S$) limite du domaine élastique (déformation réversible). Exemples (MPa) : cuivreux ≤ 500 , aciers 100-1000, aluminiums 20-300
- Résistance à la rupture σ_r ou R_r ou R_m (MPa) : contrainte limite avant ruine (rupture) sous charge. Exemples (MPa) : bois 20-100, thermo-plastiques 5-70, thermodurcissables 30-90, cuivreux < 600 , fontes 250-900, aciers 150-1800, aluminiums 60-500, céramiques 1-600
- Allongement A (%) : déformation après rupture. Exemples : aluminiums 1-35, aciers 0,3-45, thermo-plastiques 5-600, thermodurcissables 250-900, caoutchouc 100-800
- Module de Young E (GPa) : caractérise la rigidité élastique (c'est à dire le rapport écart de contrainte sur écart déformation) surtout pertinent pour les matériaux linéaires (ni les fontes, plastiques, élastomères) ; il diminue avec la température, peut diminuer avec l'humidité (bois), varie dans le temps (vieillessement ou maturation de l'aluminium). Valeur assez spécifique à un matériau, c'est un bon indice de reconnaissance. Exemples (env.) : diamant 1000 ; carbone 450, alumine 380 ; acier 200 ; cuivreux 100 ; aluminium 70 ; béton 35 ; bois 10, nylon 2 ; latex 0,004.
- Coefficient de poisson ν (sans unité) : facteur de contraction transverse à la direction d'extension
- Limite de fatigue (MPa) : amplitude de contrainte alternative à moyenne nulle pour 10⁷ cycles de charge/décharge
- Dureté (HV, HB, HRC) : résistance à la déformation superficielle par poinçon, lié à R_m
- Ténacité (KCU, KCV en MPa.m^{0.5}) : résistance à la rupture par fracture (propagation de fissure) sous l'effet d'un choc ; synonyme de résilient, contraire de fragile

3.1.3 Propriétés thermiques

- Température de fusion T_f (°C) : passage de l'état solide à liquide (via vitreux : fluide visqueux). Exemples : thermoplastiques faible, céramiques : élevé, métaux : variable
- Température de changement de phase : entre phase cristalline et vitreuse
- Température maximale d'utilisation (°C) : pour maintenir les propriétés mécaniques, sinon : fluage (écoulement)
- Résistance à la combustion et fumée dégagée
- Coefficient de dilatation linéaire α_L (°K⁻¹) :
- Chaleur spécifique ou capacité thermique massique (kJ/kg.°K) : énergie thermique nécessaire pour élever la température. Exemples : cuivreux 0,15-0,4 ; ferreux 0,45 ; aluminiums 0,9 ; céramiques : 0,8 ; bois 1,2-2,5 ; plastiques 1,5 ; élastomères 2 ; air 1 ; huile 2 ; eau 4,18 ;
- Conductivité thermique λ (W/m.°K) : vitesse de conduction de la chaleur $\lambda = Q / (\Delta T/L)$. Exemples : polymères 0,1-0,5 ; céramiques 1-100 ; ferreux 30-60, aluminiums 150-240, cuivreux 25-400

3.1.4 Propriétés électromagnétiques

- résistivité ρ ($\Omega \cdot m$), inverse de la conductivité électrique σ (mesurée en siemens par mètre S/m). Exemples ($\Omega \cdot m$) : grande pour les isolants : polystyrène 10²⁰, verre 10¹⁷, Bakélite 10¹⁶, PEBD 10¹⁵, ABS 10¹³, PET 10¹⁴, eau pure 1,8.10⁵, air (variable), non négligeable pour le graphite 10⁻⁵, carbone 1,6.10⁻⁵, faible pour les métaux (surtout l'argent 16.10⁻⁹, cuivre 17.10⁻⁹, or 22.10⁻⁹, aluminium 28.10⁻⁹, fer 100.10⁻⁹, étain 120.10⁻⁹),. Pour les semi-conducteurs (silicium 4.10³, germanium 0,7) elle dépend d'autres conditions physiques (température, exposition à la lumière, dopage : introduction d'additifs)
- magnétisme : comportement en présence d'un champ magnétique

Les polymères ne sont pas magnétisables.

Le **ferromagnétisme** : est la capacité à s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur (cas du fer doux, alliages au nickel molybdène pour réaliser des électroaimants et circuits magnétiques), et pour certains de garder une aimantation importante même après la disparition du champ extérieur (cas des aimants permanents, matériaux magnétiques durs à base de terres rares, alliages samarium-cobalt ou néodyme-fer-bore).

Le **paramagnétisme** : est l'absence d'aimantation spontanée mais, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation : cas des Tungstène, Aluminium.

Le **diamagnétisme** : lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique génèrent un autre champ magnétique opposé. Les diamagnétiques sont parfaits si tout champ magnétique entraîne en leur sein des super-courants sans apport d'énergie du fait de l'absence de résistance électrique. Ces super-courants créent un champ magnétique qui compense exactement le champ magnétique extérieur à l'intérieur du supraconducteur. Cette propriété est utilisée pour réaliser la lévitation magnétique des supraconducteurs réalisés en bismuth, carbone pyrolytique.

3.1.5 Propriétés optiques

- transparence, transmission (%) : dépend de la longueur d'onde. Bonne pour certaines céramiques (verres 90-100, cristaux) et polymères amorphes (Polycarbonate PC 86-92 %, Styène-acrylonitrile SAN, PMMA, PS 85 %) ;
- coefficient de réflexion (%) donnant aspect brillant (métaux), ou mat
- couleur : métaux : déterminée par la composition, thermoplastiques : dépend d'additif

3.2. Propriétés techniques, économiques et écologiques

- Date (ou période historique) de découverte, d'usage généralisé (ordre chronologique) : naturels (os, cuir, pierre, bois) de synthèse ou artificiels (bronze, acier, verre, aluminium, plastiques, composites, nanomatériaux).

Tout au long du cycle de vie du produit :

En phase d'extraction : disponibilité et localisation des ressources, élaboration du matériau à partir du minerai

En phase de fabrication (procédé selon forme et matériau) : mise en forme (moulage, injection, déformation, forgeage, coupe, soudage, rectification) et traitement

En phase d'utilisation : résistance, isolation ou conduction, aspect, compatibilité, fluage

En phase d'élimination : tri sélectif, séparation, valorisation matière recyclabilité : facile pour les métaux, complexe pour les composites

En phase de conception : choix par optimisation des caractéristiques (une prioritaire ou performance synthétique : voir cartes d'Ashby), désignation normalisée ; représentation (type de hachures en vue en coupe), design, forme, dimensionnement

Critères économiques : offre, demande, prix (EUR/kg) : (par ordre croissant) céramiques non techniques, matériaux naturels, verres, métaux, polymères, céramiques techniques (max : diamant). Le prix varie dans le temps en fonction de l'offre (découverte de gisement, développement des procédés d'extraction et transformation), de la demande (applications technologiques, spéculation sur les marchés des matières premières).

Impacts environnementaux : consommation d'énergie, de matière, occupation des sols, émission de gaz à effet de serre, de substances toxiques pour l'humain (Hg, Pb, Cr6), l'eau, l'air, la biosphère (ex. : plastiques : BPA, aluminium)..

3.3. Propriétés microscopiques

3.3.1 liaisons chimiques

Les **liaisons covalentes** (mise en commun d'électrons par deux atomes) sont fortes et directionnelles. Elle assurent la cohésion du carbone donc la dureté, résistivité électrique et haute température de tenue des carbure de silicium, silicium, nitrures, polymères thermorécissables.

Les **liaison ioniques** entre deux atomes, possédant une grande différence d'électronégativité pour former un ion chargé positivement (cation) et un ion chargé négativement (anion) par transferts d'électron sont directionnelles. Elle donne une mauvaise conductivité, un haut point de fusion, transparence et fragilité. On les trouve dans le sel de cuisine (NaCl), les céramiques (alumine Al₂O₃), oxydes métalliques.

Les **liaison métalliques** (mise en commun des « électrons libres » par un grand nombre d'atomes) permet une bonne conductivité électrique et thermique, opacité et ductilité (aptitude à la déformation).

Les **liaisons de Van der Waals** dues aux interactions entre les moments dipolaires électriques de deux atomes à l'intérieur d'une molécule ont des effets sur les contacts en surface. Elles varient en intensité selon la température.

Les **liaisons hydrogène** lient un atome d'hydrogène à un atome électro-négatif : elles assure la cohésion de la glace d'eau, des polymères, la cellulose.

3.3.2 structure et organisation des solides

amorphe ou vitreux = désordonné, permet la transparence : verres minéraux, verres organiques, caoutchouc

cristalline = ordonné (cubique, hexagonal) : métaux, nombreuses céramiques, des polymères organiques

semi-cristallin :

4. Références

Les Matériaux. Luc Chevalier, Arnaud Poitou. Codegem MA1. ENS Cachan.

Michael F. Ashby, Choix des matériaux en conception mécanique, Dunod

J.-P. Bailon et J.-M. Dorlot, Des matériaux, 3e éd. (ISBN 2-553-00770-1)

Précis de {métallurgie, matières plastiques}. AFNOR-Nathan.

Fanchon, Guide de la Mécanique, Guide des STI. Nathan.

Revue technologie : numéros spéciaux {Acier, l'aluminium etc.} dans tous ses états.

Technologie. 1ere, Term. STI2D. Nathan 2011

Matweb, portail des matériaux (propriétés) (en) matweb.com

Introduction à la science des matériaux, Dépt. Sc. des matériaux, Wikiversity.org, Wikipedia.org



CES EduPack Version 6.2.0

Copyright © Granta Design Limited.

voir guide et notices

5. Annexe

5.1. caractéristiques de matériaux industriels usuels

| Matériaux | E GPa | ν | ρ kg/m ³ | λ W/mK | α_L K ⁻¹ | C_p J/kg.K | R_p MPa | R_c MPa | $\Delta\%$ |
|--|----------|-------|-----------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------|--------------|--------------|------------|
| Métaux non ferreux | | | | | | | | | |
| Aluminium (Al) | 69 | 0,34 | 2 710 | 238 | 23.10 ⁻⁶ | 0,9 | 20-130 | 60-150 | 1-35 |
| Alliages d'Al moulés | 70 | 0,33 | — | 146 | 24.10 ⁻⁶ | 0,9 | 70-240 | 140-300 | 1-8 |
| Alliages d'Al corroyés | 70 | 0,33 | — | 151 | 24.10 ⁻⁶ | 0,9 | 40-500 | 100-550 | 1-25 |
| Alliages d'Al silicium | 70 | 0,33 | — | 170 | 24.10 ⁻⁶ | 0,9 | 40-120 | 90-150 | 15-25 |
| Cuivre | 112 | 0,36 | 8 960 | 402 | 17.10 ⁻⁶ | 0,38 | 7-25 | 20-35 | 6-45 |
| Coussinets à l'étain | 52 | — | 7 400 | 56 | 23.10 ⁻⁶ | 0,21 | — | — | — |
| Coussinets au plomb | 29 | — | 10 100 | 24 | 20.10 ⁻⁶ | 0,15 | — | — | — |
| Cupro-aluminiums | 117 | 0,33 | 7 500 | 50 | 18.10 ⁻⁶ | 0,38 | 180-300 | 500-600 | 7-20 |
| Bronzes au plomb | 97 | 0,33 | 8 900 | 47 | 18.10 ⁻⁶ | 0,38 | — | 300-600 | 3-25 |
| Bronzes phosphoreux | 110 | 0,33 | 8 700 | 50 | 18.10 ⁻⁶ | 0,38 | — | 300-700 | 6-50 |
| Bronzes frittés | 60 | 0,22 | 6 400 | 30 | — | — | — | — | — |
| Laitons | 100 | 0,33 | 8 600 | 120 | 19.10 ⁻⁶ | 0,39 | 250-500 | 270-600 | 2-60 |
| Magnésium | 45 | 0,35 | 1 740 | 155 | 27.10 ⁻⁶ | 1,0 | 41 | 165 | 14 |
| Magnésium et alliages | 41 | 0,33 | 1 740 | 110 | 27.10 ⁻⁶ | 1,0 | 75-180 | 150-280 | 2-19 |
| Nickel | 210 | 0,31 | 8 800 | 62 | 27.10 ⁻⁶ | — | 120-140 | 350-480 | 10-40 |
| Titane | 110 | 0,33 | 4 540 | 22 | 10.10 ⁻⁶ | — | 170-480 | 240-550 | 15-25 |
| Titane et alliages | 110 | 0,33 | 4 540 | 22 | 14.10 ⁻⁶ | — | < 1 200 | < 1 300 | 5-20 |
| Zinc | 85 | 0,27 | 7 130 | 22 | 40.10 ⁻⁶ | 0,4 | — | — | — |
| Zinc et alliages | 85 | 0,27 | 7 000 | 110 | 35.10 ⁻⁶ | 0,4 | 140-370 | 190-440 | 2-20 |
| Métaux ferreux | | | | | | | | | |
| Aciers au carbone | 210 | 0,3 | 7 800 | 35 | 12.10 ⁻⁶ | 0,45 | < 1 000 | < 1 800 | 8-21 |
| Aciers faiblement alliés | 210 | 0,3 | 7 800 | 30 | 12.10 ⁻⁶ | 0,45 | — | — | — |
| Aciers fortement alliés | 193 | 0,27 | 7 900 | 30 | 17.10 ⁻⁶ | 0,45 | 180-650 | 400-990 | 10-45 |
| Aciers inoxydables | 210 | 0,3 | 7 800 | 30 | 12.10 ⁻⁶ | 0,45 | — | — | — |
| Aciers rapides | 115 | 0,26 | 7 200 | 50 | 11.10 ⁻⁶ | 0,42 | 100-260 | 150-400 | 0,3-0,8 |
| Fontes grises ou FGL | 165 | 0,28 | 7 200 | 35 | 12.10 ⁻⁶ | 0,42 | 250-600 | 400-900 | 2-15 |
| Fontes FGS | 170 | 0,26 | 7 300 | 35 | 12.10 ⁻⁶ | 0,42 | 190-430 | 380-650 | 2-18 |
| Fontes malléables MN... | 207 | 0,27 | 7 870 | 80 | 12.10 ⁻⁶ | 0,46 | 130 | 260 | 45 |
| Fer | 80 | 0,20 | 6 100 | 28 | 12.10 ⁻⁶ | 0,46 | — | — | — |
| Fer fritté | 170 | 0,30 | 7 870 | 70 | 12.10 ⁻⁶ | 0,46 | — | — | — |
| Fer forgé | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Thermodurcissables | | | | | | | | | |
| Époxydes | 2,5 | — | 1 500 | 0,19 | 55.10 ⁻⁶ | — | — | 30-90 | 250 |
| Phénoplastes | 4 | — | 1 400 | 0,15 | 70.10 ⁻⁶ | — | — | 35-60 | 750 |
| Polyesters | 3,5 | — | 1 200 | 0,19 | 75.10 ⁻⁶ | — | — | 40-90 | 250-900 |
| Thermoplastiques | | | | | | | | | |
| Nylons (polyamides) | 1,9 | 0,40 | 1 150 | 0,25 | 100.10 ⁻⁶ | 1,4 | — | 50-80 | 20-50 |
| Polycarbonate | 2,4 | — | 1 200 | 0,2 | 70.10 ⁻⁶ | — | — | 50-70 | 80-120 |
| Polyéthylène haute densité | 1,1 | 0,35 | 960 | 0,5 | 110.10 ⁻⁶ | 1,4 | — | 22-40 | 20-80 |
| Polyéthylène basse densité | 0,3 | 0,35 | 920 | 0,3 | 220.10 ⁻⁶ | — | — | 5-20 | 200-600 |
| Polypropylène | 1,5 | — | 1 150 | 0,12 | 100.10 ⁻⁶ | — | — | 30-50 | 250-600 |
| Polystyrène | 3,2 | — | 1 050 | 0,13 | 80.10 ⁻⁶ | — | — | 20-50 | 5-75 |
| Polytétrafluoroéthylène | 0,5 | — | 2 200 | 0,25 | 120.10 ⁻⁶ | — | — | 15-35 | 250-500 |
| PVC | 4,1 | — | 1 300 | 0,18 | 100.10 ⁻⁶ | — | — | 10-60 | 5-450 |
| Caoutchoucs | | | | | | | | | |
| Caoutchouc naturel | 0,004 | 0,50 | 1 000 | 1,6 | 100.10 ⁻⁶ | 2,0 | — | 24-32 | 500-800 |
| Caoutchouc nitrile | 0,004 | — | 980 | — | — | — | — | 7-24 | 400-600 |
| Caoutchouc silicone | — | 0,50 | 1 600 | — | 57.10 ⁻⁶ | — | — | 10 | 100-800 |
| Céramiques | | | | | | | | | |
| Alumine Al ₂ O ₃ | 380 | 0,26 | 3 950 | 30 | 8,8.10 ⁻⁶ | — | — | 250-500 | — |
| Béton | 35 | 0,20 | 2 400 | — | — | — | — | 1,6-4,1 | — |
| Carbure de silicium SiC | 450 | 0,19 | 2 900 | 90 | 4,7.10 ⁻⁶ | — | — | 450-550 | — |
| Graphite haute résistance | 27 | — | 1 700 | 125 | 3.10 ⁻⁶ | 0,8 | — | — | — |
| Granite | 70 | — | 2 770 | — | 7,2.10 ⁻⁶ | — | — | 70-280 | — |
| Grès | 40 | — | 2 300 | — | 9.10 ⁻⁶ | — | — | 80-100 | — |
| Fibre de carbone | 450 | 0,19 | — | — | — | 0,7 | — | — | — |
| Magnésie MgO | 207 | 0,36 | 3 580 | 48 | 14.10 ⁻⁶ | — | — | 105 | — |
| Marbre | 55 | — | 2 770 | — | 11.10 ⁻⁶ | — | — | 50-180 | — |
| Nitrure de silicium Si ₃ N ₄ | 304 | 0,24 | 3 200 | 30 | 3,6.10 ⁻⁶ | — | — | 410-580 | — |
| Verre de silice SiO ₂ | 75 | 0,16 | 2 200 | 1,3 | 0,5.10 ⁻⁶ | — | — | 110 | — |
| Verre borosilicate | 62 | 0,20 | 2 230 | 1,4 | 3,3.10 ⁻⁶ | — | — | 70 | — |
| Zircone ZrO ₂ | 152 | 0,32 | 5 560 | 2,0 | 10.10 ⁻⁶ | — | — | 140-240 | — |
| Bois | | | | | | | | | |
| Chêne | 12 | — | 680 | — | — | — | 40-60 | 50-100 | — |
| Douglas | 12 | 0,29 | 450 | — | — | — | 10-30 | 50-80 | — |
| Epicéa | 12 | — | 410 | — | — | — | — | 20-80 | — |
| Hemlock | 11 | — | 440 | — | — | — | — | 30-90 | — |
| Pin (rouge) | 10 | — | 400 | — | — | — | — | 20-60 | — |

