

BENOIT VIEILLE
SÉLIA BENMABROUK

MATÉRIAUX INNOVANTS EN GÉNIE MÉCANIQUE

A
I
D
E
—
M
É
M
O
I
R
E

- Propriétés mécaniques et physico-chimiques
- Comportement mécanique en service
- Règles de dimensionnement
- Exemples d'applications

DUNOD

Direction et conception graphique de la couverture :
Nicolas Wiel et Elizabeth Riba (graphiste)
Mise en pages : Nord Compo

© Dunod, 2026
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-089560-1

Table des matières

Introduction	7
Chapitre 1. Des matériaux innovants	11
1.1 De nouveaux matériaux pour de nouvelles exigences	11
1.2 Matériaux innovants	15
1.2.1 Les capteurs à fibres optiques (CFO)	15
1.2.2 Les matériaux cellulaires	20
1.2.3 Le silicium	37
1.2.4 Nanomatériaux	43
1.2.5 Nanotubes de carbone	48
1.2.6 Aciers à hautes résistance et ductilité – TRIP/TWIP/TRIPLEX	55
1.2.7 Biosteel® – la soie d'araignée synthétique	62
Chapitre 2. Des matériaux innovants pour l'aéronautique	65
2.1 Un peu d'histoire...	67
2.2 Exemples de sollicitations subies par des pièces aéronautiques	69
2.2.1 Ailes d'un avion	69
2.2.2 Fuselage d'un avion	70
2.2.3 Train d'atterrissage	73
2.3 Les alliages d'aluminium	74
2.3.1 Aéronautique : relever le défi des composites	78
2.3.2 Le retour en force des alliages de faible densité en aluminium-lithium	79
2.3.3 Une première : l'A350 utilise des panneaux soudés par friction	80

2.4	Les alliages de titane	81
2.4.1	La filière de production du titane	81
2.4.2	La demande et les prix du titane	82
2.4.3	L'aéronautique : premier consommateur de titane	82
2.4.4	Les différents grades de titane	85
2.4.5	Un nouvel alliage aluminium-titane pour l'aéronautique	88
2.4.6	Propriétés et comportements mécaniques	88
2.5	Les alliages de magnésium	91
2.5.1	De l'utilisation du magnésium dans les aérostructures	92
2.5.2	Comportement mécanique	95
2.6	Les superalliages	101
2.6.1	Principales familles de superalliages	102
2.6.2	Propriétés mécaniques	103
2.6.3	Principaux champs d'application des superalliages	106
Chapitre 3. Des matériaux composites innovants		112
3.1	Les composites, des « multi-matériaux »	113
3.1.1	Classification selon la matrice	115
3.1.2	Classification selon le renfort	117
3.2	Les composites à matrice innovante	119
3.2.1	Composites à matrice thermoplastique haute performance	119
3.2.2	Composites à matrice métallique renforcée	132
3.2.3	Composites à matrice céramique renforcée par des fibres longues	140
3.2.4	Composites carbone-carbone	149
3.3	Les composites à renfort innovant	154
3.3.1	Nanoparticules et nanocomposites	154
3.3.2	Composites renforcés par des fibres de carbone	166
3.3.3	Composites renforcés par des fibres de bore	171

3.3.4	Composites renforcés par des fibres de Zylon®	173
3.3.5	Composites renforcés par des fibres naturelles	176
3.4	Les stratifiés hybrides métal-fibres	188
3.4.1	Stratifiés GLARE® (GLASS REinforced aluminum laminates)	190
3.4.2	Stratifiés ARALL (ARamid ALuminum Laminates)	194
3.4.3	Stratifiés CARAL® (CARbon REinforced Aluminum Laminates)	196
3.5	Les structures sandwich innovantes	197
3.5.1	Composites sandwich classiques	198
3.5.2	Composites sandwich à âme innovante	203
	Chapitre 4. Les matériaux intelligents	212
4.1	Notion de matériau intelligent	213
4.1.1	Fonction capteur	215
4.1.2	Fonctions mémoire et processeur	215
4.1.3	Fonction actionneur	216
4.2	Les principaux matériaux intelligents	217
4.3	Transduction thermomécanique	219
4.3.1	Dilatation thermique des matériaux	219
4.3.2	Alliages à mémoire de forme	220
4.4	Transduction électromécanique	243
4.4.1	Matériaux piézo-électriques	243
4.4.2	Exemple du contrôle actif des vibrations d'une raquette de tennis	259
4.4.3	Matériaux électrostrictifs	265
4.4.4	Polymères électroactifs ou EAP	267
4.5	Transduction magnétomécanique	271
4.5.1	Matériaux magnétostrictifs	271
4.5.2	Ferro-fluides et fluides magnéto-rhéologiques (MR fluids)	275
4.5.3	Alliages à mémoire de forme magnétiques (AMFM)	277



Aide-mémoire Matériaux innovants en génie mécanique

4.6	Transduction chimico-mécanique	281
4.6.1	Polymères ioniques	281
4.6.2	Muscles artificiels à nanotubes de carbone	284
4.6.3	Muscles naturels	289
4.7	Bilan	289
Conclusion		293
Bibliographie		295
Index		307

Introduction

Dans un monde où les **défis technologiques et environnementaux** redéfinissent constamment les frontières de l'ingénierie, les **matériaux** s'imposent comme des piliers essentiels de l'**innovation en mécanique**. Cet ouvrage explore les avancées les plus récentes dans ce domaine, en mettant l'accent sur des matériaux qui transcendent les limites traditionnelles des métaux, polymères et céramiques classiques. Des nanocomposites aux matériaux intelligents, en passant par les alliages à mémoire de forme et les piézoélectriques, ces innovations ouvrent la voie à une fonctionnalisation et à des conceptions plus légères, plus résistantes et plus durables, tout en répondant aux exigences croissantes de performance mécanique et d'efficacité énergétique.

Les enjeux liés à l'adoption de ces matériaux sont multiples et interconnectés. D'abord, l'**enjeu environnemental** : face à la crise climatique, il est impératif de développer des matériaux à faible empreinte carbone, recyclables ou biosourcés, qui minimisent les émissions de CO₂ lors de leur production et de leur utilisation. Ensuite, l'**enjeu économique** : bien que ces innovations offrent des gains de performance, leur coût de fabrication, les difficultés d'usinage et d'intégration peuvent freiner leur déploiement à l'échelle industrielle. Enfin, l'**enjeu de fiabilité et de sécurité** : ces matériaux, souvent aux propriétés anisotropes ou singulières, posent parfois comme défis la prédiction de leur comportement sous des contraintes extrêmes (foudre, feu, irradiations, corrosion), ou dans des conditions d'utilisation spécifiques (vibrations ou chocs thermiques). Dans un contexte où les **normes réglementaires** se durcissent (en aéronautique ou en automobile notamment), ignorer ces enjeux pourrait compromettre non seulement les projets d'ingénierie, mais aussi la transition vers une économie verte.

Dans ce contexte, les applications des **matériaux innovants** sont vastes et en perpétuelle évolution. En **aéronautique et aérospatial**, les composites

renforcés de fibres de carbone ou de graphène (nanotubes de carbone) permettent de réduire le poids des structures tout en augmentant leur résistance, favorisant ainsi des économies de carburant et une plus grande fiabilité. Dans l'**industrie automobile**, les matériaux piézoélectriques ou autoréparants s'intègrent à des systèmes de suspension intelligents ou des carrosseries résistantes aux impacts, contribuant à la sécurité et à l'électrification des véhicules. Le **secteur biomédical**, où la biocompatibilité et la durabilité sont primordiales, bénéficie de l'arrivée de matériaux comme les alliages nickel-titane pour des prothèses ou des implants osseux. Ces exemples illustrent comment ces matériaux ne se contentent pas d'améliorer les performances existantes, mais habilitent de nouvelles fonctionnalités, comme la détection intégrée ou l'adaptation en temps réel.

L'une des particularités des matériaux innovants réside également dans leurs échelles caractéristiques, qui s'étendent du macroscopique au nanoscopique, influençant directement leur comportement et leur modélisation. À l'**échelle macroscopique** (millimètre à mètre), on considère les propriétés globales comme la rigidité ou la ductilité, souvent modélisées par des lois classiques issues de la mécanique des milieux continus. À l'**échelle mésoscopique** (micromètre), les microstructures – telles que les grains dans les alliages ou les interfaces dans les composites – dictent les phénomènes de fatigue et de propagation de fissures. Enfin, à l'**échelle nanoscopique** (moléculaire), les effets quantiques et de surface prédominent, comme dans les nanotubes de carbone dont les forces de van der Waals amplifient la résistance mécanique.

Le dimensionnement de ces matériaux requiert ainsi une **approche multiscalaire et multidisciplinaire**. Traditionnellement, on utilise des méthodes analytiques basées sur les équations de l'élasticité ou la théorie des poutres pour les structures simples. Cependant, pour les matériaux innovants, les lois de comportement classiques ne sont généralement pas adaptées. Des outils avancés comme la modélisation par éléments finis ou la dynamique moléculaire sont indispensables. Des normes comme l'**ASTM** ou l'**ISO** guident ces calculs, en intégrant des essais expérimentaux pour valider les modèles. Ce **processus itératif** assure non seulement la robustesse, mais aussi l'efficacité, en minimisant le surdimensionnement qui alourdirait les coûts et l'impact environnemental.

Cet ouvrage vous guidera à travers ces différents concepts, en combinant théorie, cas d'études et perspectives futures, pour étoffer le bagage des ingénieurs, chercheurs et étudiants avec des outils indispensables à l'innovation en génie mécanique. Ensemble, explorons comment ces matériaux, plus que des curiosités scientifiques, sont les catalyseurs d'un avenir plus résilient et inventif.

1

Des matériaux innovants

Depuis ses origines, la **science des matériaux** est en perpétuelle évolution avec l'utilisation de matériaux structurels inertes, la conception de matériaux à des fins particulières, la découverte des **matériaux actifs ou adaptatifs** (dits « intelligents ») et la perspective future de matériaux précisément intelligents – pourvus de capacités de reconnaissance, de différenciation et de réaction complexes.

1.1 De nouveaux matériaux pour de nouvelles exigences

Pour conférer ces nouvelles capacités aux matériaux et alliages, il est essentiel de répondre à plusieurs critères en termes de propriétés, fonctions ou domaines d'application [1]. L'évolution des besoins a rendu les cahiers des charges fonctionnels plus complexes, exigeant des matériaux plus spécifiques et mieux adaptés à leur usage, avec l'objectif de créer des matériaux sur mesure. Cette fonctionnalisation répond à des attentes diverses et parfois complémentaires :

- **Matériaux plus performants** : Pour les matériaux de structure, la performance signifie de hautes rigidité et résistance combinées à une faible densité. D'autres critères sont la capacité à maintenir les propriétés mécaniques dans des **conditions extrêmes** (résistance au fluage, à la fatigue, aux chocs thermiques) et la résistance à la corrosion ou au feu. Ces matériaux sont souvent des métaux et des céramiques, massifs ou composites. L'amélioration des performances inclut également la capacité à absorber les chocs, les vibrations, le bruit, à dissiper la chaleur et à maîtriser le frottement. Les **matériaux à structure interne** (mousses, alvéoles, nids d'abeille) répondent bien à ces exigences.

- ▶ **Matériaux plus durables** : La durabilité est cruciale pour la **sécurité**. La résistance au vieillissement et aux dommages est essentielle dans les transports, la construction et l'industrie. Une meilleure durabilité se traduit par une réduction des coûts d'exploitation et des interruptions de production. Un développement technologique avancé amène la capacité des matériaux à signaler leur endommagement ou à **s'auto-réparer**.
- ▶ **Multiplication des fonctionnalités** : Cette tendance consiste à donner de nouvelles propriétés aux matériaux de structure. Par exemple, les verres autonettoyants.
- ▶ **Aptitude à la fabrication** : On peut ajouter des fonctionnalités pour faciliter la production et le traitement. Par exemple, l'ajout de propriétés électriques aux plastiques automobiles permet de les peindre directement sur les chaînes de production. Les matériaux peuvent être fonctionnalisés de plusieurs manières : **en surface** (nouveaux traitements), **dans la masse**, ou **par des assemblages** (matériaux multiples). Les avancées dans la connaissance des matériaux nanostructurés favorisent cette tendance. L'incorporation de nanotubes de carbone, par exemple, permet d'améliorer les performances mécaniques ou d'ajouter de nouvelles propriétés électriques. L'utilisation de **matériaux adaptatifs** (piézoélectriques, alliages à mémoire de forme) accompagne aussi cette évolution (cf. Chapitre 4).
- ▶ **Aptitude à la recyclabilité** : La recyclabilité est de plus en plus un critère de sélection majeur. C'est une fonction que l'on cherche à développer, notamment dans les secteurs soumis à des réglementations ou à des contraintes économiques liées à la fin de vie des produits. Le concept de développement durable est devenu incontournable dans le processus de conception.

La clé pour répondre à ces attentes est la maîtrise complète des sciences et techniques des matériaux, en particulier la compréhension des **corrélations entre la structure et les propriétés**. Cela requiert une connaissance fine des structures aux échelles nano-, méso- et macroscopique, ainsi qu'une maîtrise des procédés de mise en œuvre et de traitement.

Une collaboration étroite entre chimistes, physiciens et mécaniciens est essentielle pour adapter au mieux les propriétés des matériaux à leur usage.

Ce besoin de **collaboration scientifique** se traduit au niveau industriel par la nécessité de développer des méthodes de **conception intégrée**.

■ Choix des matériaux pour des applications structures

Dans l'aéronautique, le choix d'un matériau pour la voilure d'un avion (Figure 1.1) est un bon exemple du grand impact d'une géométrie spécifique sur les performances [2]. Comme pour toute conception, l'**optimalité est une question de compromis**. Les critères mécaniques classiques pour ce genre de pièce sont :

- La **rigidité** (E) : le module d'Young.
- La **limite d'élasticité** (σ_y ou R_e) ou la **résistance mécanique** R_m .
- La **ténacité** (K_{IC}) ou facteur d'intensité des contraintes : résistance à l'initiation d'une fissure.
- Le **poids** (ρ) : la densité.

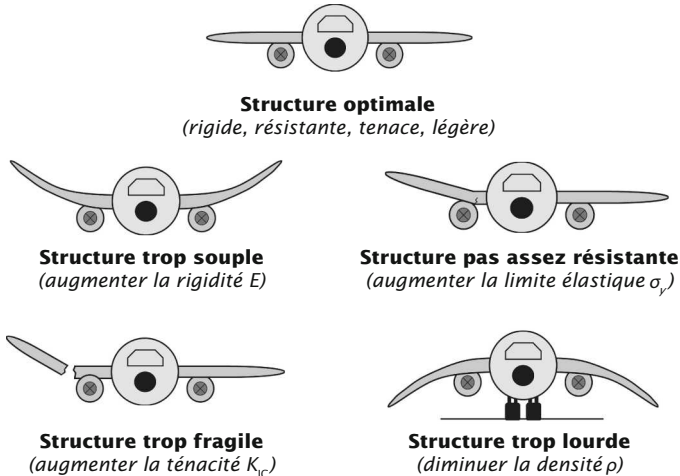


Figure 1.1 – Exemple de choix des propriétés mécaniques pour une structure optimale [3].

Évidemment, un choix optimal du matériau ne suffit à garantir à lui seul une structure dont le comportement mécanique est optimal. Il est nécessaire de prendre en compte d'autres facteurs essentiels : influence des procédés de fabrication, conception de la structure, comportement en fatigue, environnement potentiellement pénalisant (température, feu, corrosion, produits chimiques, etc.), variation du chargement thermomécanique... D'où le développement d'une démarche de conception intégrée prenant en compte ces facteurs aux différentes étapes de la réalisation de la structure.

■ Vers des matériaux et systèmes intelligents

Pour répondre aux exigences des matériaux du futur, les matériaux intelligents vont au-delà des critères traditionnels en intégrant des fonctions de **détection** et d'**activation conditionnelle**. En raison de leurs capacités multifonctionnelles, ces matériaux sont souvent intégrés dans des structures intelligentes (ou structures **adaptatives** et **auto-contrôlables**).

Pour répondre même partiellement aux nouvelles exigences, des matériaux avec des fonctions spécifiques peuvent être intégrés dans des structures adaptatives. On peut citer :

- ▶ Les **matériaux essentiellement capteurs** : Ils peuvent détecter des signaux, ajuster leur sensibilité aux changements environnementaux ou même restaurer une sensibilité perdue. Par exemple pour contrôler l'intégrité structurale (*Structural Health Monitoring* – SHM) en temps réel, détectant des sollicitations critiques ou l'apparition de dommages au sein de la structure.
- ▶ Les **matériaux auto-cicatrisants** (*self-healing materials*) : Couplés aux systèmes précédents, ils sont capables de s'auto-réparer. Souvent, il s'agit d'**agents chimiques encapsulés** dans le matériau qui, une fois un défaut détecté (comme une fissure), s'activent pour le réparer.
- ▶ Les **matériaux catalyseurs** : Ils sont capables de détecter l'avancement d'une réaction ou d'en déclencher une.
- ▶ Les **textiles intelligents** : Ils peuvent détecter divers signaux provenant du corps humain ou de l'environnement pour améliorer le confort.

Ces matériaux, bien qu'ils ne soient pas des matériaux intelligents au sens strict de la définition, sont des composants clés qui peuvent être intégrés à des structures intelligentes pour accomplir une fonction spécifique.

1.2 Matériaux innovants

Certains matériaux plus simples répondent aussi à des critères énoncés précédemment et présentent des propriétés intéressantes pour des champs d'application donnés. Au même titre que les matériaux intelligents ou à fonction ajoutée, on peut les qualifier d'émergents. Cette section donne une description des principaux matériaux émergents non intelligents, liste non exhaustive dans la mesure où elle se limite au domaine de l'ingénierie mécanique.

1.2.1 Les capteurs à fibres optiques (CFO)

Développée par une entreprise américaine dans les années 1970, la **fibre optique** est un filament extrêmement fin en verre ou en plastique protégé par une gaine, conçu pour guider la lumière et transmettre des données sur des milliers de kilomètres. Elle est fabriquée à partir d'un barreau de silice de haute pureté, dont la composition centrale est modifiée pour ajuster l'indice de réfraction. Grâce à sa résistance à la cristallisation et à la corrosion, la silice est un matériau idéal pour les applications optiques. La fibre optique permet des **débits de données** bien supérieurs à ceux des câbles coaxiaux et peut prendre en charge un réseau à large bande pour transmettre simultanément des données, des appels téléphoniques, des vidéoconférences ou des signaux de télévision [4]. Le signal lumineux est modulé en intensité pour transporter de grandes quantités d'informations, ce qui a joué un rôle crucial dans la **révolution des télécommunications optiques** . Ses propriétés sont également utilisées dans le domaine de l' **imagerie** .

En plus de leur rôle dans les télécommunications, les fibres optiques en silice sont d'excellents **transducteurs de mesure** [5]. Les capteurs à fibres optiques (CFO) remplissent des fonctions similaires aux capteurs traditionnels (mesure, contrôle, détection d'alarme, etc.) tout en bénéficiant des propriétés uniques des fibres : faible encombrement, légèreté, large bande