

...Quels matériaux pour les prothèses des parasportifs ?

Date de publication : Lundi 01 Juillet 2024

Rubrique(s) : Question du mois



Parasport : les origines

La compétition sportive pour les personnes souffrant de handicaps physiques trouve son origine en 1948, lorsque le Dr. Guttman, neurochirurgien britannique d'origine allemande, décide d'organiser les premiers « *Jeux mondiaux des chaises-roulantes et des amputés* », pour réinsérer psychologiquement ses patients paraplégiques, vétérans de la Seconde Guerre mondiale.

En 1952, cet événement prend une dimension internationale et, depuis les premiers *Jeux paralympiques de 1960* qui se tiennent à Rome, une semaine après les J.O., les suivants se déroulent tous les 4 ans dans la ville choisie pour les Jeux olympiques.

Le handisport nécessite du matériel adapté, aussi bien pour les déplacements (*prothèses de membres* ou fauteuils roulants), que pour les accessoires spécifiques (sangles, ballons pour non-voyants, protections, etc.).

Les **prothèses** sont les **dispositifs artificiels destinés à remplacer une partie amputée du corps**, membre, portion de membre, articulation. Elles existent depuis l'Antiquité ! Jusque dans les années 1980, les athlètes handicapés ne portaient pas de prothèses spécifiques lors des compétitions sportives.

Par la suite, des prothèses spécialement conçues pour les parasports ont été développées. Elles doivent remplir plusieurs fonctions : légèreté, résistance mécanique, biocompatibilité, confort. Les matériaux et les conceptions utilisés dans les prothèses diffèrent selon le type de sport pratiqué.

Elles sont souvent faites sur mesure et privilégient l'efficacité plutôt que l'esthétique.

De quoi sont faites les prothèses des sportifs handicapés ?

Les prothèses des blessés de la Première Guerre mondiale *étaient en bois et cuir* ! Désormais elles se caractérisent par des matériaux aux propriétés différentes. Les *métaux* comme *le titane, l'aluminium ou l'acier*, sont utilisés pour leur résistance et leur légèreté (en réalité ce sont des alliages acier inox, nickel-titane, etc.). Mais de nouveaux matériaux ont fait leur apparition comme *la fibre de carbone, le kevlar, la fibre de verre, les matériaux composites, les silicones, etc.* et ils ont largement modifié les performances des athlètes handicapés.

Oscar Pistorius, champion paralympique et olympique sur 400 m, utilise des *lames en fibre de carbone*, jouant le rôle de pied et de mollet. Sa « flex foot » est inspirée de la jambe arrière du guépard, le plus rapide des animaux.

Herr Hugh, grimpeur de très haut niveau dans les années 80, a créé des jambes prothétiques lui permettant d'escalader à nouveau après son accident. Dans son cas, le pied est *en titane*.

Ces prothèses sont aujourd'hui largement

utilisées et résument bien l'apport des matériaux nouveaux.

Exemple d'une prothèse de membre inférieur

Elle comporte 3 éléments : l'emboîture, le manchon, la prothèse (fig. 1).

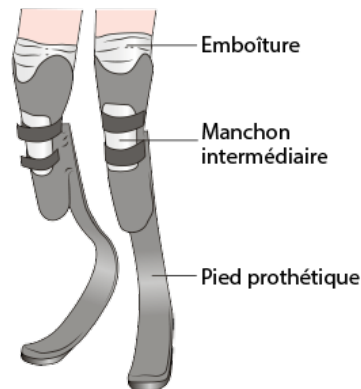


Figure 1. Flex foot. Source Brevet national des collèges 2020

<https://lewebpedagogique.com/technopp/archives/640>

1 - **L'emboîture** relie la prothèse au moignon (membre amputé), elle est la base sur laquelle se fixent les éléments de la prothèse, elle permet l'appui au moignon et transmet l'énergie du corps vers le « membre artificiel ».

Elle peut être réalisée avec un *matériau composite* ⁽ⁱ⁾ appelé « carbone tubulaire ». Ce sont des *fibres de carbone* ⁽ⁱⁱ⁾ imprégnées de *résine acrylique* ⁽ⁱⁱⁱ⁾.

D'autres composites sont formés avec du *Kevlar* ^(iv), des fibres de verres ou de carbone, tous biocompatibles, qui permettent l'allègement de la prothèse et un meilleur aérodynamisme.

L'emboîture est conçue sur mesure pour éviter tout mouvement du moignon dans l'emboîture.

2 - **Le manchon** est l'interface entre la peau et l'emboîture, il est destiné à protéger le membre.

Partie souple de la prothèse, il est le plus souvent en *silicone* ^(v), matériau choisi pour son élasticité, sa biocompatibilité, sa durabilité et sa capacité à réduire les frottements et les irritations. Des copolymères ou du polyuréthane sont aussi employés.

3 - La **prothèse** elle-même, pied, genou, jambe, main... ne supporte pas les mêmes efforts selon le sport pratiqué.

Comparaison des propriétés physiques des matériaux			
	Densité	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Métaux			
Acier	7,8	210	400-800
Titane	4,5	114	300-1400
Aluminium	2,7	70	90
Composites			
Fibre de carbone	1,8	300-600	2500-7000
Kevlar	1,45	130	3600
Fullerènes			
graphène	2,27	1000	42000
nanotube de carbone	1,3	1000	50 000

Les « **lames de course** » constituant les prothèses des coureurs à pied sont désormais majoritairement en *fibre de carbone*.

En fait, les fibres de carbone tissées sont imprégnées de *résine époxy* et c'est ce matériau composite qui possède un ensemble de propriétés remarquables (*cf.* tableau comparaison) :

- légèreté due à la très faible densité

de 1,8

- résistance 10 fois supérieure à celles de l'acier, ce qui donne une *résistance spécifique* 50 fois supérieure à celle de l'acier (quotient résistance / densité) (résistance à la compression et la traction, flexibilité)
- tenue en température
- longévité, due à l'inertie chimique (sauf à l'oxydation).

La fibre de carbone contribue au renforcement de nombreux composites. Mais sa production est complexe ^(vi) et la rend très coûteuse. La réparation et le recyclage des pièces sont problématiques.

Les avancées et les perspectives

Aujourd'hui de nouveaux composants électroniques révolutionnent l'efficacité des prothèses pour compenser le handicap.

Les progrès les plus innovants résident dans les **prothèses bioniques** (fig. 2) dans lesquelles un (ou plusieurs) composant(s) est géré électroniquement pour reproduire au mieux le fonctionnement humain. (bionique est la contraction de biologique et électronique).



Figure 2. Main bionique <https://fr.motorica.org/blog>

Des capteurs et des composants, conducteurs ou semi-conducteurs électroniques, captent l'activité (contraction-énergie) des muscles du membre résiduel et la transmettent à la prothèse.

Dans ce domaine, *le graphène et les nanotubes de carbone*, nouvelles formes (allotropes) du carbone de découverte récente, sont très prometteurs. **Le graphène** ^(vii) est constitué d'un feuillet d'atomes de carbone disposés sur un réseau de type nid d'abeille. Sa résistance à la rupture est deux cents fois supérieure à celle de l'acier (tout en étant six fois plus léger).

Un ou plusieurs feuillets peuvent s'enrouler pour former un **nanotube de carbone** ^(viii) (fig. 3).

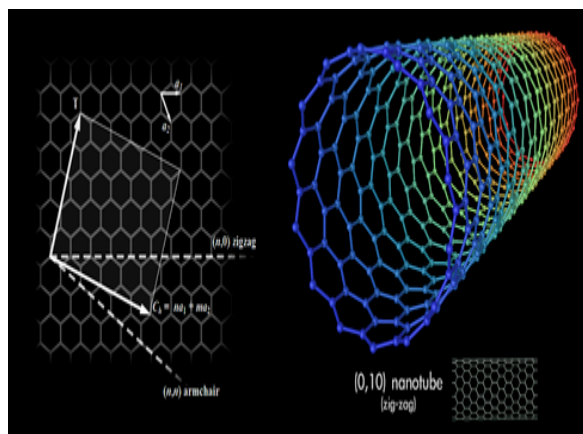


Figure 3. Nanotube de carbone.

Source : Mstroeck. [Licence CC BY-SA 3.0](#) [↗],
[Wikimedia Commons](#) [↗]

Flexibles et ultra-résistants, les nanotubes de carbone peuvent, entre autres propriétés, transmettre les courants électriques du corps humain, grâce à leur comportement métallique ou semi-conducteur. Ainsi la présence de nanotubes de graphène a-t-elle permis ⁽¹⁾ de fabriquer des *mains prothétiques fonctionnelles* capables d'interagir avec des

écrans tactiles (utile pour les sports électroniques !).

En conclusion, le temps de la jambe de bois du pirate est bien révolu ! L'évolution scientifique et technologique des prothèses permet maintenant aux sportifs handisports de pratiquer leur discipline à haut niveau.

Dans certains cas, les avancées technologiques donnent des capacités accrues aux athlètes handicapés, au point que leurs performances peuvent égaler voire devancer celles des sportifs valides. Par exemple la prothèse permet à l'athlète une restitution d'énergie plutôt constante (et donc moins de fatigue pour l'athlète). La lame de carbone d'un sprinter, selon sa conception ou sa longueur, donne à l'athlète une foulée plus longue et transmet une énergie supérieure à celle des athlètes non amputés. Peut-on alors parler d'« *athlètes augmentés par la technologie* » ?

Des questions éthiques sur la participation de ces athlètes au côté d'athlètes valides dans les compétitions internationales [\(2\)](#) existent déjà. Toutefois, au cours de l'histoire de l'athlétisme paralympique, seuls quelques athlètes ont atteint les performances des athlètes valides...

Andrée Harari et l'équipe question du mois

(i) Les matériaux composites sont constitués de deux ou plusieurs composants dont les propriétés, différentes mais complémentaires, confèrent au composite des

caractéristiques spécifiques.

Dans le cas présent ils présentent, pour l'application recherchée, les avantages suivants :

- résistance : le matériau supporte de nombreux chocs et pressions externes grâce au renfort des fibres de carbone,
- volume et masse plus faibles : allègement parfois considérable du produit final,
- durée de vie : du fait de sa résistance et sa relative inertie chimique, le matériau est durable.

(ii) La fibre de carbone est constituée de fibres extrêmement fines (5 à 10 microns de diamètre) d'atomes de carbone agglomérés en microcristaux. L'alignement des cristaux le long de l'axe de la fibre la rend très résistante. Plusieurs milliers de fibres de carbone sont enroulées ensemble pour faire un fil. Les fibres de carbone étant formées de domaines graphitiques, elles présentent les propriétés électriques du graphite.

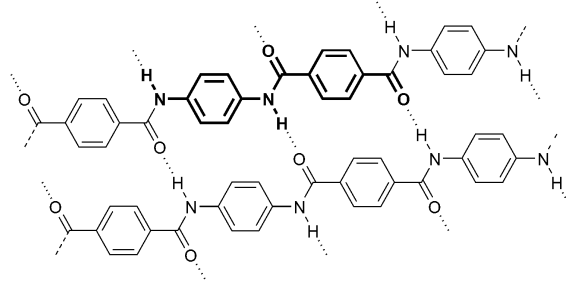
Cependant les propriétés sont unidirectionnelles, (anisotropie). Ce n'est pas le cas des métaux qui sont capables de supporter des charges dans n'importe quelle direction (propriété isotrope).

(iii) Une résine acrylique est un polymère thermoplastique ou thermodurcissable obtenu à partir d'acide acrylique ($H_2C=CHCOOH$), ou autres composés apparentés. Ses propriétés utiles sont la résistance mécanique, la biocompatibilité, la transparence.

(iv) Le Kevlar (nom commercial du **poly(p-phénylènetéréphtalamide) (PPD-T)** est un polymère thermoplastique constitué de

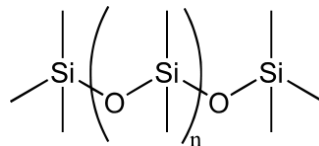
noyaux aromatiques séparés par des groupes amide. Les liaisons hydrogène lui confèrent son exceptionnelle résistance spécifique (rapportée à la densité), supérieure à celle de l'acier, mais inférieure à celle des fibres de carbone.

Comme les autres fibres textiles, il ne fait pas partie des matières plastiques (fig. 5).



Structure du kevlar. Licence [CC BY-SA 3.0](#), [Wikimedia Commons](#)

(v) Les silicones, ou polysiloxanes, sont des composés inorganiques (il n'y a pas d'atomes de carbone dans la chaîne principale) formés d'une chaîne silicium-oxygène dans laquelle des groupes se fixent sur les atomes de silicium. Le type le plus courant est le polydiméthylsiloxane linéaire (PDMS).



PDMS. licence [CC BY-SA 3.0](#), [Wikimedia Commons](#)

Si l'on fait varier les chaînes, les groupes fixés et les liaisons entre chaînes, les silicones fournissent une grande variété de matériaux dont la consistance varie du liquide au plastique dur, en passant par le gel.

(vi) La fibre de carbone est fabriquée à partir des précurseurs comme :

- Les fibres de polyacrylonitrile (fibres

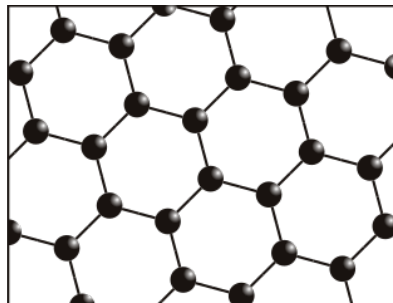
de PAN de formule $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{C}\equiv\text{N}$). Ces dernières sont oxydées vers $200-300^\circ\text{C}$ pendant une durée allant de 30 minutes à 3 heures et deviennent infusibles. Ces fibres sont ensuite carbonisées sous atmosphère inerte entre $1\ 000^\circ\text{C}$ et $1\ 500^\circ\text{C}$ pour éliminer les éléments H, N, et O. La graphitisation par un second traitement thermique à haute température (plus de $2\ 000^\circ\text{C}$) améliore la structure des fibres.

- Le brai, goudron issu de distillation de résidus de pétrole ou de houille.
- La cellulose.

(vii) Le graphène est un composé bidimensionnel cristallin, identifié en 2004.

Cette forme de carbone, correspond à un feuillet unique de graphite, de réseau hexagonal, type nid d'abeille. Ses propriétés sont donc bidimensionnelles :

- résistance à la rupture deux cents fois supérieure à celle de l'acier (tout en étant six fois plus léger)
- exceptionnelles conductivités électrique et thermique
- durabilité



Structure du graphène. Domaine public, [Wikimedia Commons](#)

(viii) Un nanotube de carbone, observé pour la première fois en 1991 [\(4\)](#) [\(5\)](#), est une structure cristalline composée d'atomes de

carbone qui peut être décrite comme un feuillet de graphène enroulé sur lui-même. C'est un tube creux, de diamètre interne d'environ un nanomètre (10^{-9} m) et d'une longueur de l'ordre de quelques microns. Les nanotubes peuvent être mono-feuillet ou multi-feuillets. La structure d'un *nanotube de carbone multi-feuillets* correspond soit à plusieurs feuillets de graphène concentriques, soit à un seul feuillet de graphène enroulé sur lui-même de façon hélicoïdale. Du point de vue électrique, les nanotubes mono-feuillets ont la particularité remarquable d'être soit métalliques (conducteurs) soit semi-conducteurs. En outre ils ont une excellente rigidité (mesurée par le module de Young), comparable à celle de l'acier et une extrême légèreté.

Références


- (1) [Nanotubes de graphène](#), sur le site Motorica (2021)
- (2) [Le sport augmenté, une révolution en marche à autoriser ?](#), Journée Transhumansime : de nouveaux droits, Mai 2021, Aix-en-Provence, France, M. Lahaye, V. Perkins, Ch. Charleux, G. Nicolas, V. Andrieu et A. Mahalatchimy, halshs-03406451v2
- (3) [Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films](#) K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov *et al.*, *Science*, vol. 306, n° 5696 (2004) p. 666–669
- (4) [Helical microtubules of graphitic carbon](#), S. Iijima, *Nature*, 354 (1991) p. 56-58.
- (5) [Who should be given the credit for the discovery of carbon nanotubes?](#) M. Monthieux et V. L. Kuznetsov, *Carbon*, vol.


Pour aller plus loin


* [Les nouvelles prothèses](#) Serge Lécolier,
Revue Chimie Paris, n° 338-339 (2012) p.
8-11

* [Handicap et évolution scientifique et
technologique : la prothèse dans le
handisport](#)  (PDF) Comité Départemental
Olympique et Sportif de l'Aisne,
aisne.franceolympique.com

* [Société Össur, fabricants de produits
orthopédiques non invasifs](#) 

* [Cours de physique du solide : les
nanotubes de carbones](#)  (pdf) sur le site
de l'Institut Rayonnement-Matière de
Saclay (Iramis) - CEA

* [Cette main bionique peut fonctionner
plusieurs années](#) , R. Fouchard, News de
science (2023) sur le site des Techniques
de l'Ingénieur

* [Prothèses bioniques : retrouver les
fonctions perdues](#) , article réalisé avec M.
Maier, de l'École des neurosciences (unité
FR3636), CNRS - Université Paris
Descartes, Site de la Fondation pour la
Recherche Médicale

*Crédit illustration : Championnats du
monde d'athlétisme IPC 2013. 200 mètres
féminin T44. De gauche à droite : Sophie
Kamlisch (GB), Marie-Amélie Le Fur (France),
Marlou van Rhijn (Netherlands)
Fanny Schertzer, licence [CC BY-SA 3.0](#) ,
[Wikimedia Commons](#)*