

Le rôle des matériaux composites dans les performances sportives

Yves Rémond est professeur émérite à l'Université de Strasbourg – École de Chimie, Polymères et Matériaux (ECPM), agrégé de mécanique. Il est spécialiste du comportement des matériaux structurants : les polymères, les matériaux composites, les biomatériaux, et de leurs applications dans le sport, que ce soit l'automobile, l'industrie aéronautique ou le spatial. Il a dirigé l'Institut de Mécanique des Fluides à Strasbourg et dirigé la mécanique des matériaux à la direction du CNRS à Paris. Il est membre du Haut Comité mécanique.

1 Les conditions nécessaires à la performance

À l'École de Chimie de Strasbourg, beaucoup d'élèves sont très sportifs. L'année dernière, Clara Bayol a été championne du monde de match racing¹ (**Figure 1**), une course entre deux bateaux identiques, un peu comme la Coupe de l'America².

La performance sportive nécessite des conditions que

tout le monde connaît, à commencer, naturellement, par un système musculosquelettique adapté à la pratique sportive visée (**Figure 2A**). Il faut ensuite acquérir un geste parfait au prix d'un entraînement important (**Figure 2B**). En fait, certains sports essaient d'éviter ces biais puisque si on pratique, par exemple, le judo, la lutte ou la boxe, il y a des catégories de poids qui font que, malgré des morphologies différentes, on peut quand même arriver à des performances importantes. On pourrait aussi imaginer qu'en hauteur on fasse des catégories de taille : quand on mesure 2 mètres de haut, on

1. Discipline de voile où seuls deux bateaux identiques s'affrontent directement.

2. Compétition de voile en match racing, nommée d'après la première course en 1851.



Figure 1

Clare Bayol, championne du monde 2023 de Match Racing.

ne saute pas la même hauteur que quand on mesure 1,60 m. Reste que la morphologie et le geste à acquérir ne sont pas les seules caractéristiques. Beaucoup de sports nécessitent un équipement supplémentaire, qui lui aussi devra posséder des propriétés particulières. La **Figure 2C** représente le champion coréen de tir à l'arc. Il est clair qu'il faut que son arc ait des capacités, des caractéristiques extrêmement performantes. On peut aussi citer le handisport : l'athlète peut avoir besoin

d'une prothèse de jambe et d'une lame de course³ en carbone. Évidemment, il faut que cette lame de course ait des propriétés totalement adaptées à l'athlète (**Figure 2D**).

2 Les équipements et leurs applications diverses pour les matériaux

On peut classer les différents équipements en cinq catégories (**Figure 3**). La première catégorie correspond aux équipements de protection, incluant notamment les casques. On peut se demander si un casque participe vraiment à la performance du sportif. En l'occurrence, on peut répondre par l'affirmative : si un sportif a besoin d'un maximum de légèreté, il a un intérêt à avoir un casque à la fois léger et protecteur. Cela participe à la performance de l'athlète. On peut raisonner de façon analogue pour les prolongements des membres, à savoir les skis, les raquettes, les perches. Ou

3. Équipement utilisé par les athlètes en situation de handicap pour la course.

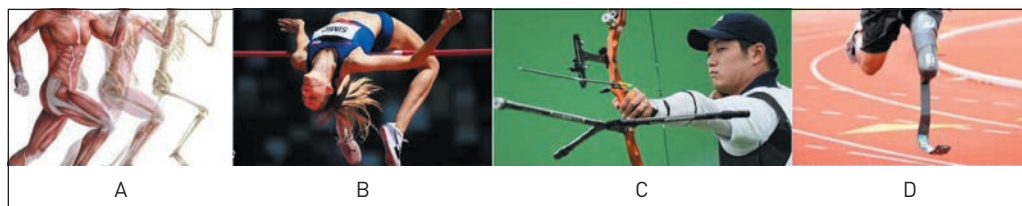


Figure 2

Les facteurs de la performance sportive.

A. Le squelette et l'appareil musculaire. B. Le geste parfait : Anna Simic, record de saut en hauteur de 1,99 m en 2014. C. L'équipement : Lee Seung-Yun, champion du monde de tir à l'arc en 2013. D. Prothèse de handisport : lame de course en carbone pour enfant.

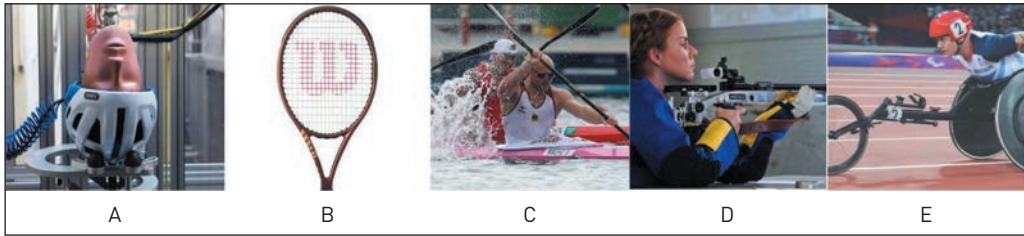


Figure 3

Les catégories d'équipement aident à :

A. La protection : essai de casque de protection ICube, Université de Strasbourg – CNRS. B. La performance : raquette de tennis (cadre et cordage). C. Le transport : Ronald Rauhe, course en ligne de kayak. D. Arme de précision pour tir sportif. E. Course en fauteuil.

encore pour les équipements de transport – tels un vélo, un bateau, une luge, etc. – ou pour les armes – arc, arbalète, pistolet, fusil. Et puis, bien sûr, on a aussi tous les éléments de suppléance pour le handisport.

Quelques remarques pour faire saisir la complexité de la qualification d'un matériel :

- Quand on teste **des casques**, on peut parfaitement prendre toute une série de casques, les tester de façon statique⁴, leur taper dessus pour tester la résistance puis les classer du meilleur au moins bon. Mais cela ne fonctionne pas bien. Pourquoi ? Parce que quand on refait ce test avec une tête artificielle, un crâne et un cerveau artificiel qui baigne dans le liquide céphalorachidien⁵, on s'aperçoit qu'on n'a pas du tout le même classement et qu'un casque qui n'était pas très bon quand il était vide peut devenir excellent quand il permet d'éviter des hématomes

sous-duraux⁶ : quand une petite veine en pont entre le sinus sagittal supérieur⁷ et le cerveau casse, on a un hématome sous-dural qui peut conduire au décès. Pour éviter cela, ce ne sont pas des casques vides qui doivent être testés.

- Sur la **Figure 3C**, on voit le champion allemand de **canoé**, bien connu aux Jeux Olympiques, utilisant une pagaie – ce n'est ni une rame ni un aviron – tel le prolongement de la main du sportif à l'eau (alors qu'une rame ou un aviron s'appuient sur le bateau), et les propriétés du bateau doivent être adaptées à cet usage.

- Concernant **le tir**, les conditions de l'environnement sont telles que les matériaux en jeu sont très critiques.

- Pour ce qui a trait aux éléments du **handisport**, retenons que quand on a un fauteuil de course, cela ressemble peu au

6. Accumulation de sang sous la membrane qui entoure le cerveau, souvent causée par un traumatisme crânien.

7. Canal veineux situé dans la partie supérieure du crâne, permettant le drainage sanguin du cerveau.

4. Branche de la mécanique étudiant les corps au repos ou en équilibre.

5. Fluide biologique entourant le cerveau et la moelle épinière.

fauteuil utilisé dans la rue pour les promenades. Là encore, il faut choisir des matériaux particulièrement adaptés.

3 Les propriétés des matériaux : quelle place pour les matériaux composites ?

3.1. Les propriétés attendues des matériaux pour les équipements sportifs

Essayons d'esquisser un cahier des charges à remplir par les matériaux pour sportifs, c'est-à-dire de lister les principales propriétés qu'ils devront posséder pour être qualifiés.

- Premièrement, on demande en premier lieu une **très grande rigidité** (capacité d'un matériau à se déformer peu sous un effort extérieur), ainsi qu'une certaine souplesse. On dira qu'on veut une « **rigidité pilotée** ».
- On attend une **résistance** (capacité à résister à des efforts extérieurs). Il peut s'agir d'une résistance à un effort statique, dynamique⁸, à une vibration, à une résistance au choc.
- On attend une **certaine durée de vie** : si on saute à la perche, on va sauter un certain nombre de fois, il va y avoir un certain nombre de chocs de la perche sur l'élément buteur⁹.

- On attend de la **légèreté**, parce que la plupart du temps ce sont des équipements qui ont un certain poids et qui devront être transportés par l'athlète.

- On attend enfin une **restitution d'énergie**, par exemple pour la raquette de tennis ou la perche.

En considérant ces différentes propriétés, on peut faire une remarque inattendue, à savoir que **les cahiers des charges ressemblent à ceux qui sont exigés par les fabricants des avions**. La **Figure 4** présente un avion Rafale¹⁰, un avion presque entièrement construit en matériaux composites, hormis sa motorisation. La similitude des cahiers des charges conduit à considérer les possibilités des matériaux composites pour les applications aux équipements sportifs comme celles qu'ils ont pour l'aéronautique.

3.2. Quelles propriétés pour quels matériaux ?

Pour progresser vers l'identification des matériaux performants pour les activités sportives, il convient d'aborder leurs nombreuses possibilités. Il faut en effet tenir compte d'une myriade de paramètres : le choix des matériaux, les compromis entre les propriétés diverses mentionnées plus haut (la résistance¹¹, la

8. Branche de la mécanique étudiant les mouvements et les forces en action.

9. Réceptacle en métal empêchant la base de la perche de glisser lors d'un saut.

10. Avion de combat polyvalent développé par Dassault Aviation en 1986.

11. Capacité d'un matériau à résister aux contraintes et aux charges appliquées.

rigidité¹² et la densité). À cela s'ajoutent des contraintes économiques, naturellement présentes partout. La complexité du problème est encore plus aiguë qu'il n'y paraît au premier regard, car des recherches se poursuivent dans les laboratoires et multiplient l'inventaire des possibilités à étudier.

Voici quelques exemples pour illustrer les choix auxquels sont confrontés les ingénieurs, et les changements de données qui peuvent survenir et parfois remettre en cause les premiers choix.

- Il faut noter la richesse originelle mais aussi l'**explosion récente du domaine des matériaux**. Il y a trois grandes classes de matériaux : les métaux, les polymères, les céramiques, hormis les matériaux naturels ou les biomatériaux. Ces classes correspondent à des dizaines, pour ne pas dire des centaines de matériaux différents qui intègrent différemment toutes les propriétés citées au paragraphe précédent (rigidité, résistance, durée de vie, légèreté, restitution d'énergie).

- Les choix faits pour parvenir aux solutions actuellement retenues pour les avions sont représentatifs de la démarche des ingénieurs. Prenons quelques exemples.

Question initiale : faut-il utiliser l'acier ou l'aluminium ? L'acier est deux fois plus rigide que l'aluminium et environ trois fois plus résistant. En revanche, il est trois fois plus lourd que

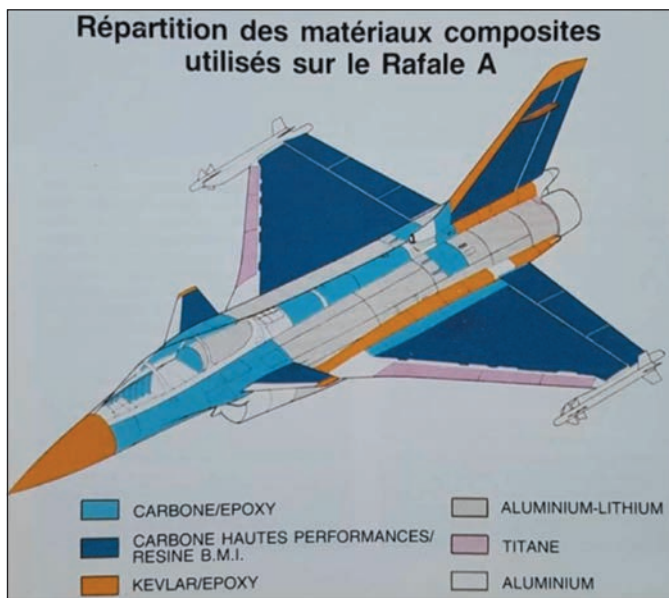


Figure 4

Matériaux composites utilisés sur le Rafale A.

l'aluminium. Par ailleurs, du fait des progrès techniques réalisés dans les années 1960, sa production industrielle était alors moins difficile et moins coûteuse. Le jeu des comparaisons et l'évolution de la situation technique due aux travaux des laboratoires à cette époque ont permis de fabriquer beaucoup d'avions en aluminium.

Dans la même période, se sont posées des questions sur les matériaux polymères. Regardons les polymères, et en particulier les polymères très utilisés dans les composites qui sont généralement des thermodurcissables¹³ : ils sont intéressants pour le domaine des matériaux

12. Propriété d'un matériau à conserver sa forme et à résister à la déformation.

13. Type de polymère qui se solidifie lorsqu'il est chauffé et ne fond pas lorsqu'il est chauffé à nouveau.

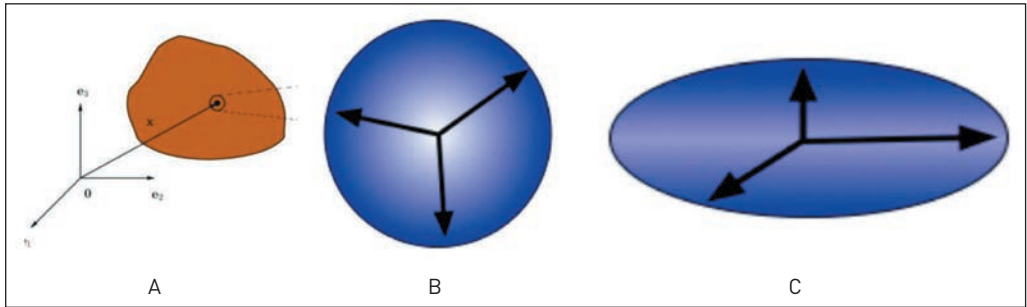


Figure 5

A. Objet 3D. B. Matériau isotrope. C. Matériau anisotrope.

composites, mais leur impact sur l'environnement est un point négatif. Par ailleurs, d'autres polymères n'ont pu être envisagés sur certains créneaux : ainsi, pour les époxy¹⁴ ou les polyesters¹⁵, la résistance aux contraintes est de l'ordre de 3 ou 4 GPa¹⁶ contre 200 GPa pour l'acier, ce qui les prive de certains usages. Les polymères sont des matériaux mous et donc peu résistants : leur résistance est aux alentours de 100 MPa contre 1000 MPa pour l'acier. En revanche, ce sont des matériaux légers avec une densité de l'ordre de 1, contre presque 8 pour l'acier. Ces domaines technologiques sont presque toujours le lieu d'arbitrages multiples.

14. Résine thermodurcissable utilisée comme adhésif, revêtement ou matériau composite.

15. Polymère synthétique souvent utilisé dans la fabrication de fibres et de plastiques.

16. Gigapascal, unité de mesure de la contrainte ou de la résistance des matériaux.

3.3. Une exigence du sport : l'anisotropie des propriétés mécaniques

Se pose aussi la question de l'anisotropie. Si vous prenez un point quelconque dans un matériau quelconque (Figure 5A), et si autour de ce point vous portez l'intensité d'une propriété, dans toutes les directions et si la figure que vous obtenez est une sphère, c'est que le matériau est isotrope – cette propriété sera la même dans toutes les directions (Figure 5B). Mais cela n'intéresse pas du tout le sportif d'avoir, par exemple, une perche très résistante dans son épaisseur ! Ce qu'il veut, c'est qu'elle soit élastique dans la longueur. En réalité, un équipement sportif ne doit avoir des propriétés performantes que là où c'est nécessaire. **Ce n'est pas l'isotropie qu'il faut demander aux matériaux mais l'anisotropie**¹⁷ (Figure 5C).

C'est une des principales raisons de l'intérêt des **matériaux composites** pour les

17. Propriété d'un matériau dont les propriétés varient selon la direction.

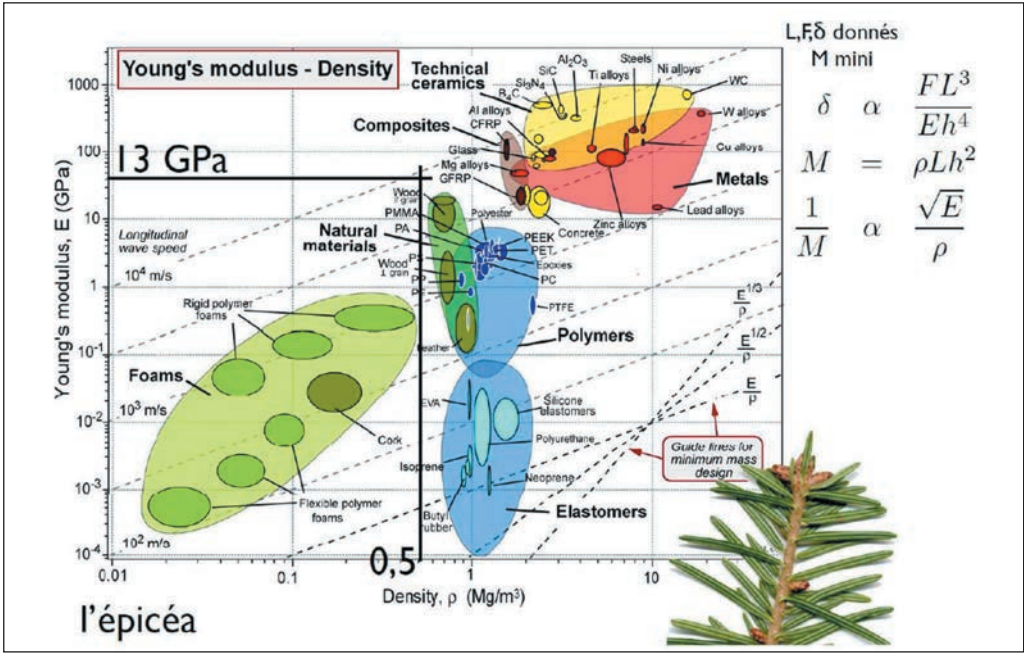


Figure 6
 Diagramme d'Ashby, qui relie densité et rigidité avec une échelle log-log¹⁸.

équipements sportifs, car ils sont particulièrement bien adaptés à des propriétés anisotropes. Un matériau composite, c'est une association de fibres, principalement de verre et de carbone, avec une colle qui est un polymère, souvent époxy ou polyester. Comme ces fibres vont pouvoir être orientées exactement dans les directions où on en a besoin, on obtient un matériau anisotrope sur mesure, et le « sur-mesure » est une dimension clé de l'optimisation que l'on recherche pour la performance sportive.

3.4. Classification des matériaux selon leurs propriétés

Je présente le diagramme de la **Figure 6** bien qu'il soit un peu technique parce qu'il est très classique dans la profession. Imaginez que vous avez affaire à une étagère avec des rayonnages pour ranger tous les matériaux connus en les classant selon les principales propriétés. Vous mettez à gauche les matériaux les plus légers et à droite les matériaux les plus lourds, en bas les matériaux les plus mous et en haut les matériaux les plus rigides, etc. Le résultat ? En haut à droite figurent les matériaux les plus lourds et les plus rigides : on retrouve **les métaux et les**

18. Représentation graphique où les deux axes sont des échelles logarithmiques.

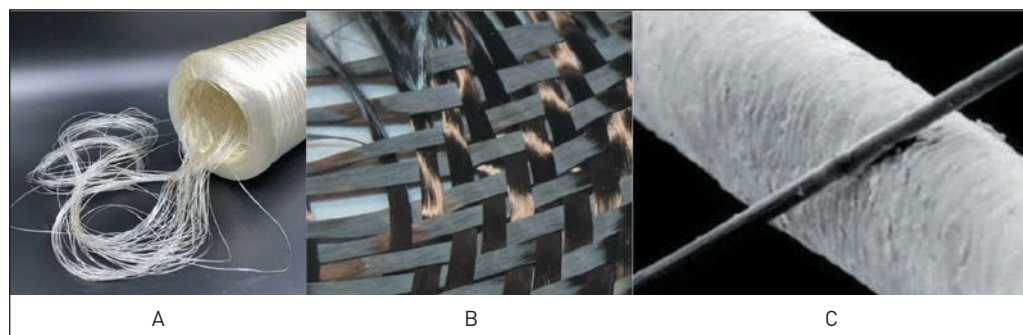


Figure 7

A. Filament de fibres de verre. B. Mèches de fibres de carbone. C. Comparaison des diamètres d'un cheveu et d'une fibre de carbone : ce dernier est plus de dix fois plus fin.

céramiques¹⁹ dans la zone vert clair, vous avez **les mousses, mousse de polyuréthane**²⁰, **mousses variées**, des matériaux **extrêmement légers**. Dans la zone bleue du bas, on a **les caoutchoucs, les élastomères**²¹, et dans la zone bleue du haut, **les polymères**. On retrouve aussi les matériaux naturels variés, comme le bois, et enfin **les matériaux composites**.

Les matériaux composites sont très haut placés : ils sont très rigides et plus lourds que les polymères et les élastomères, mais bien plus légers que les métaux. **Parmi les matériaux très rigides et légers, les matériaux composites sont les matériaux mieux placés** parmi l'ensemble des matériaux qui existent.

19. Matériau non métallique composé d'oxydes métalliques, souvent dur et résistant à la chaleur.

20. Polymère utilisé dans la mousse et les revêtements pour sa résilience et sa durabilité.

21. Polymères ayant des propriétés élastiques, tels que le caoutchouc.

3.5. Les fibres : une place à part dans les matériaux

Il existe une grande variété de fibres. Nous considérerons ici les **fibres de carbone**²² et les **fibres de verre**²³. Comparons-les aux métaux et aux polymères.

La fibre de verre a une rigidité identique à celle de l'aluminium, 70 GPa, mais une résistance de 4500 MPa contre 300 à 400 MPa pour l'aluminium, soit dix fois plus résistante.

La fibre de carbone a une rigidité au minimum équivalente à celle de l'acier, 200 GPa, mais on peut aller jusqu'à 700-800 GPa voire davantage. Concernant sa résistance, l'acier était à 1000 MPa – 1500 pour certains aciers très spéciaux. On peut aller jusqu'à 7000 MPa avec le carbone.

22. Fils de carbone très fins issus de la combustion intense de polymères et réputés pour leur résistance.

23. Verre fondu en fils très fins, offrant une bonne résistance à la traction et à la flexion.

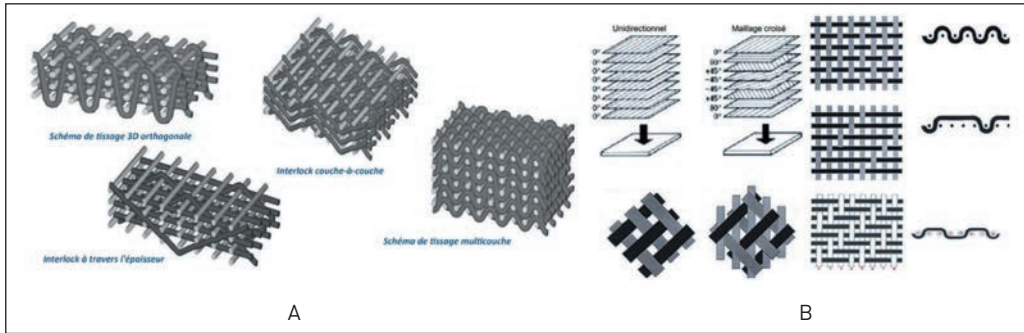


Figure 8

Schémas de conditionnement des fibres.

A. Tissage tridimensionnel. B. Constitution d'un stratifié.

Il est clair que les fibres de verre ou les fibres de carbone sont des matériaux extrêmement performants. La **Figure 7A** reproduit un filament constitué de centaines de fibres de verre. Sur la **Figure 7B**, ce sont des mèches de fibres de carbone : il y a des milliers de fibres de carbone dans ces mèches. La **Figure 7C** illustre une fibre de carbone devant un cheveu : le diamètre d'un cheveu est de 70 microns environ ; celui d'une fibre de carbone mesure entre 5 et 10 microns.

Pour utiliser les fibres, on les conditionne dans de la colle puis on les empile dans de nombreuses directions différentes : on peut les tisser, les tricoter, même en trois dimensions pour faire des objets massifs (**Figure 8A**). Les possibilités sont très nombreuses. On peut en particulier les conditionner comme des stratifiés (**Figure 8B**). Ce sont des plaques ou des morceaux de coque avec des courbures qui ont quelques millimètres d'épaisseur.

Telles sont les **extraordinaires possibilités des matériaux composites**. Ils constituent des matériaux «à la carte» et pour du «sur-mesure». Ils permettent de placer les propriétés physiques à l'endroit et dans la direction où l'on en a besoin. De plus, ils ne présentent pas de corrosion mais ont une bonne résistance à la fatigue²⁴. **Les matériaux composites sont remarquablement bien adaptés pour des utilisations dans l'aérospatiale, l'aéronautique et les équipements sportifs de compétition.**

4 Exemples d'applications pour les matériaux composites dans le sport

4.1. La raquette de tennis

L'étude de la raquette de tennis pour son optimisation commence, pour le physicien, par un petit calcul d'éléments

24. Capacité d'un matériau à résister à une défaillance due à des charges répétées.

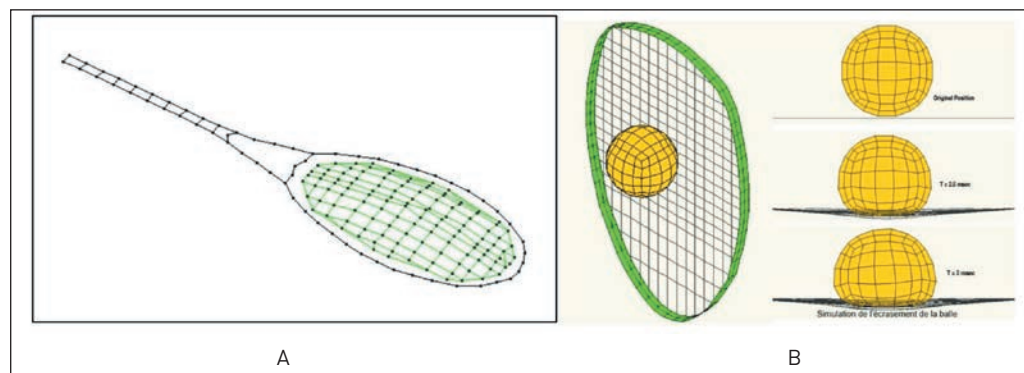


Figure 9

A. Vibration du tamis par simulation numérique. B. Simulation de l'écrasement de la balle par calcul d'éléments finis.

finis²⁵ devenu très rapide avec un ordinateur classique. Le résultat montre que, quand on tape dans une balle avec une raquette, celle-ci vibre de tous les côtés : le tamis²⁶ et le support du tamis vibrent partout (*Figure 9A*). On voit que la balle s'écrase complètement, change de volume, etc. (*Figures 9B et 9C*) : toute la physique particulière du choc de la balle est visible sur une raquette.

Au moins quatre points particuliers du tamis sont intéressants et doivent être pris en compte pour bien comprendre le fonctionnement de la raquette : le centre de percussion, le centre d'inertie, le centre de surface et le nœud de vibration (*Figure 10A*).

Une petite expérience absolument élémentaire permet de définir le **centre de percussion**. Vous prenez une raquette

et vous attachez au manche un petit fil. Par le manche, vous la laissez pendre, et puis vous lancez une balle horizontalement sur le tamis (*Figure 10B*). La raquette peut évidemment se désaxer autour du point d'attache, *via* le centre de rotation. Ici, celui-ci est en dehors de la raquette, mais si vous lancez la balle à un autre endroit du tamis (le centre de percussion), il peut être sur le manche de la raquette. Si tel est le cas, cela veut dire qu'au moment où le joueur tape la balle, il va y avoir – pour peu qu'on fasse coïncider ce centre de percussion avec l'axe de rotation du poignet – juste un mouvement de rotation du poignet qui sera aisément encaissé par la musculature. Sinon, on a un déplacement latéral qui entraîne le *tennis elbow*²⁷ et des souffrances physiques pour l'athlète.

25. Méthode numérique utilisée en calculs d'ingénierie qui divise un domaine en éléments plus petits.

26. Partie de la raquette de tennis avec des cordes, utilisée pour frapper la balle.

27. Blessure causée par une sur-utilisation des muscles de l'avant-bras, commune chez les joueurs de tennis.

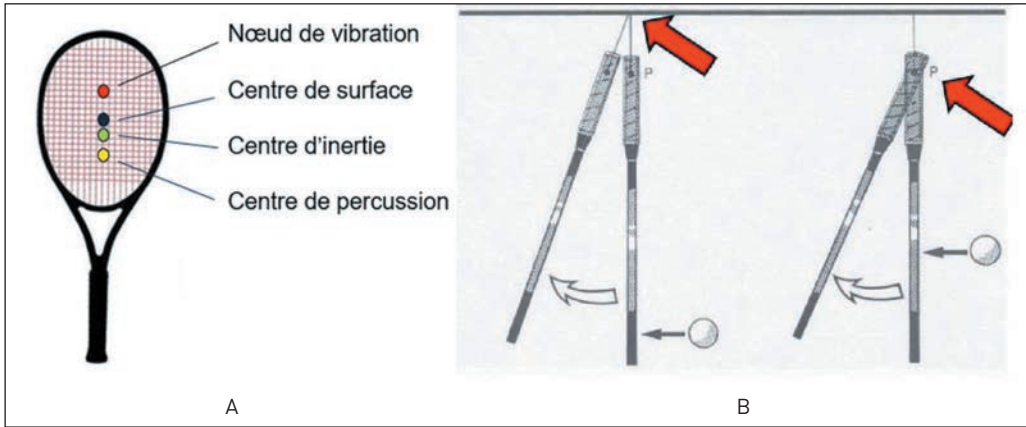


Figure 10

A. Points particuliers d'une raquette de tennis. B. Centre de rotation et centre de percussion.

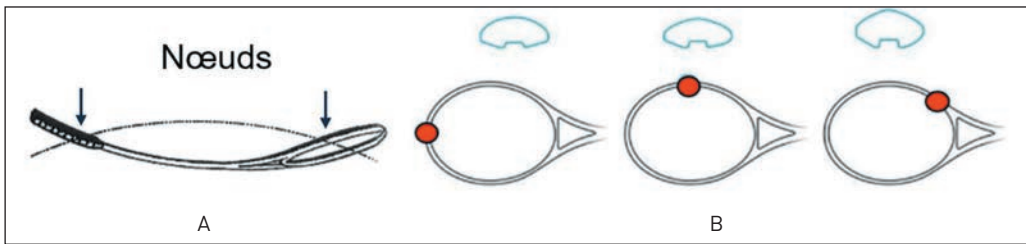


Figure 11

A. Nœuds de vibration. B. Sections inhomogènes du cadre.

Qu'est-ce que le **nœud de vibration**²⁸ (Figure 11A) ? Quand on tape sur une raquette de tennis, celle-ci entre en vibration. Le premier mode de vibration est une vibration de flexion. Deux points ne vont pas vibrer : l'un est sur le manche, l'autre sur le tamis. Si la balle tape sur ce nœud de vibration, aucune vibration de la structure n'est induite. En revanche, si elle tape à côté, des vibrations vont démarrer avec de

nombreux modes, mais c'est le mode premier qui sera le mode principal. On doit donc chercher à ce que ce nœud de vibration soit précisément situé par rapport à l'endroit où le joueur va taper la balle. Ce joueur doit être très bon, car il doit savoir exactement où il va taper la balle sur la raquette. On a également intérêt à ce que ce nœud sur le manche soit aussi proche que possible du poignet du joueur pour, là encore, éviter les douleurs avec un déplacement anormal.

Voyons ensuite le **centre de surface** et le **centre d'inertie**.

28. Point fixe sur une corde vibrante où l'amplitude de vibration est nulle.

Le centre de surface est identique au centre d'inertie si le cadre est entièrement homogène, avec la même géométrie et la même masse partout. Comme ce n'est pas le cas (**Figure 11B**), on a une différence entre le centre de masse et le centre d'inertie, mais on a intérêt à ce que ces points soient le plus proche possible de l'intérieur du tamis pour optimiser les choses. Cela demande néanmoins un joueur très aguerri parce que cela veut dire que s'il tape à côté, il peut se passer n'importe quoi. Les exigences concernant les propriétés de la raquette peuvent être formulées ainsi : on veut une certaine puissance et, pour un athlète confirmé, la **puissance** la plus importante. On veut un contrôle, c'est-à-dire la **précision** des trajectoires. On veut aussi – nouvelle notion – la **récupération des coups ratés**. Un coup raté, c'est un coup dans lequel la balle va taper le tamis en dehors de son axe. Une torsion de la raquette est alors provoquée. Et si l'on n'a pas prévu d'introduire des fibres pour résister à cette torsion, **le coup est raté**. Si vous mettez des fibres capables de résister à la torsion, vous en mettez donc moins qui seront capables de résister à la flexion, et la raquette sera moins performante. Comme d'habitude, il s'agit d'une compétition, d'un compromis entre les différentes propriétés, selon que l'on est un athlète débutant ou un athlète très confirmé.

La **rigidité** en même temps que la puissance, c'est beaucoup de rigidité en flexion et un moment d'inertie très élevé, ce que les joueurs appellent le

« *swing weight*²⁹ ». La précision des trajectoires va dépendre aussi de la tension du tamis, quand la récupération des coups ratés dépend de la rigidité en torsion. C'est pour cela que l'on voit de grands champions à qui il arrive de rater des coups : avec un coup qui a l'air facile, si la balle tape un peu à côté de l'endroit où il pensait devoir taper au centre de la raquette, le coup est raté. Cela est dû aux raquettes optimisées pour la restitution d'énergie en flexion, négligeant complètement la torsion. Et ce alors qu'un débutant dira : « Mais moi je les rattrape ces coups, même en tapant sur le bois », comme on disait autrefois, quand les raquettes étaient en bois.

On veut aussi la **facilité de changer de geste**, qui demande d'avoir un **moment d'inertie**³⁰ **faible**. Cela est important quand on est au filet, où le moment d'inertie doit être le plus faible possible. À vrai dire, ce n'est pas tout à fait compatible avec la puissance qui réclame au contraire un moment d'inertie élevé.

Comment fabrique-t-on la raquette par compromis entre toutes les exigences mentionnées ? En fait, cela se traduit dans la **conception et la fabrication des matériaux d'une façon très simple** (**Figure 12A**). Si la raquette est verticale et si vous mettez des fibres dans la direction de la raquette dans le manche, vous augmentez

29. Inertie résultant de la distribution du poids d'une raquette de tennis qui affecte la maniabilité.

30. Mesure de la résistance d'un objet à changer de rotation, dépendant de sa masse et de sa distribution.

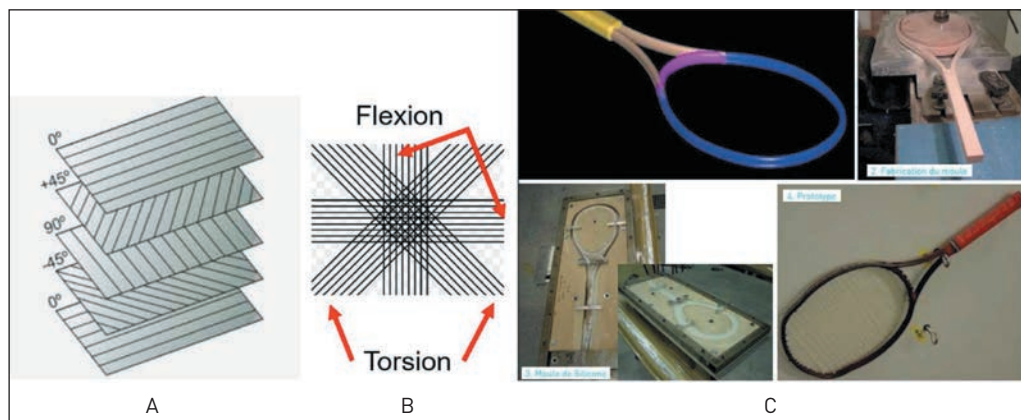


Figure 12

La raquette de tennis.

A. Conception et orientation des fibres du cadre. B. Fibres en flexion et en torsion. C. Simulation numérique et fabrication d'une raquette.

la résistance à la flexion. En revanche, si vous mettez des fibres inclinées à plus ou moins 45° (Figure 12B), vous mettez de la rigidité en torsion, mais si vous avez un stock de fibres à placer, plus vous en mettez en flexion, moins vous en avez en torsion, etc.

Avec mon collègue Jean-François Carron, professeur à l'École des Ponts et Chaussées, les élèves ont calculé, en fonction de leur morphologie, de leur géométrie, la meilleure raquette possible pour eux par simulation numérique. Ils ont fabriqué et obtenu le moule en silicone³¹ (Figure 12C) dans lequel ils avaient mis les fibres. Ils sont tous repartis avec une raquette de tennis personnalisée.

4.2. La perche

La perche est intéressante parce que c'est un sport dans lequel les matériaux utilisés ont beaucoup varié depuis l'origine (Figure 13). Au début du xx^e siècle, on faisait des perches en bois, ensuite des perches en bambou qui étaient creuses, avec une souplesse un peu plus grande, puis on s'est mis à faire des perches en aluminium. C'est seulement dans les années 1960 que l'on a utilisé des perches en fibre de verre avec un petit peu de fibre de carbone.

L'évolution du record du monde du saut à la perche en fonction du matériau utilisé est spectaculaire (Figure 14). Jusqu'en 1900, avec les perches en bois, on atteignait péniblement 3,50 m. Avec les perches en bambou, cela a augmenté jusqu'à la Seconde Guerre mondiale où on arrivait à 4,50 m. L'apparition des perches en aluminium n'a absolument rien changé : vous

31. Polymère souvent utilisé dans les moules pour ses propriétés d'étanchéité et de flexibilité.

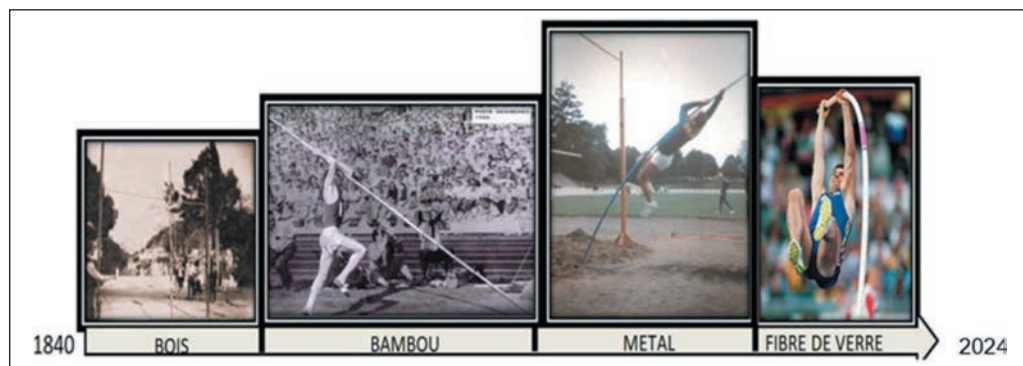


Figure 13

Évolution des matériaux utilisés dans les perches.

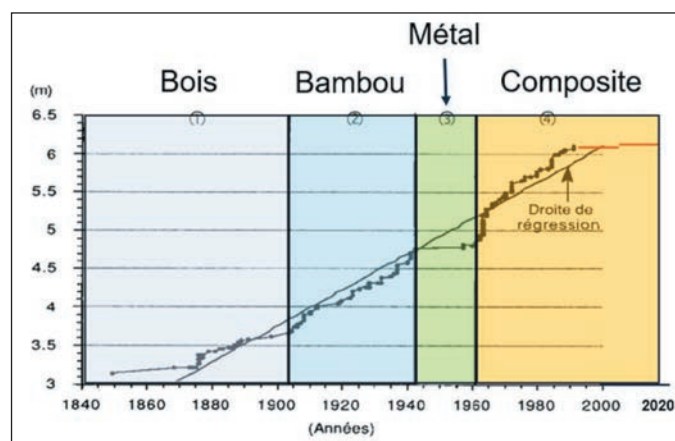


Figure 14

Évolution du record du saut à la perche en fonction du matériau utilisé.

voyez que le record du monde a totalement stagné, la perche en aluminium n'apportait rien. C'était un matériau qui était utilisé en aéronautique.

À partir des **années 1960 sont arrivées les perches en fibre de verre**, d'une très grande souplesse et avec une grande restitution d'énergie, exactement ce qu'il fallait pour l'athlète. Instantanément, le record a bondi jusqu'aux

années 1990 avec Bubka³². Maintenant, on a un Français qui est champion du monde³³, mais c'est à 1 cm près, et le record du monde n'a pas réellement bougé depuis 25 ans. On n'est en théorie pas très loin du plafond.

Comment sont faites ces perches d'aujourd'hui ? Vous avez des fibres de carbone qui sont dans la direction de la perche – on ne peut pas en mettre trop, sinon la perche serait trop rigide – et on complète la perche avec des tissus de verre qui vont renforcer sa capacité à résister aux chocs – notamment en arrivant sur le butoir – et à épaissir l'ensemble de la perche. Ainsi, on a des perches qui sont extrêmement performantes (**Figure 15**).

32. Ancien champion ukrainien de saut à la perche, célèbre pour avoir établi le record de 6,15 m en 1985, record qui restera invaincu durant 21 ans avant d'être battu par Renaud Lavillenie avec 6,16 m en 2014.

33. L'actuel titulaire du record du monde de saut à la perche masculin est Armand Duplantis (Suède) avec un saut à 6,26 m établi à Chorzow (Pologne) en août 2024.

4.3. Le snowboard

Troisième exemple, les snowboards. A priori, c'est simple : c'est une planche qui a un peu une forme de 8, mais où on va retrouver exactement les mêmes problèmes que sur la raquette de tennis, à savoir qu'un snowboard doit résister à la flexion mais aussi à la torsion, notamment dans les virages ou dans les tubes³⁴ (Figure 16).

Une question générique pour qui veut améliorer un équipement sportif : « Peut-on le faire sans changer de matériaux ni changer la quantité de matière utilisée ? » A priori, ce n'est pas très facile, mais la fabrication des snowboards démontre que c'est possible. En effet, il faut agir sur la géométrie. La technique consiste à **faire appel aux matériaux dits « sandwich »**, qui permettent de contrôler la géométrie et grâce auxquels des gains de performance spectaculaires ont été obtenus dans plusieurs disciplines.

Qu'est-ce qu'un matériau sandwich ? C'est une version des matériaux composites. Typiquement, on part de deux plaques composites entre lesquelles on va introduire un matériau passif, sans propriété particulière. Il n'a aucune propriété mécanique. Cela peut être une mousse, du balsa³⁵, du nid d'abeille³⁶,

34. Piste en forme de U utilisée pour réaliser différentes figures en snowboard ou en ski.

35. Bois léger souvent utilisé dans la construction de modèles réduits et d'artisanat.

36. Structure hexagonale utilisée pour sa légèreté et sa résistance dans les matériaux composites.

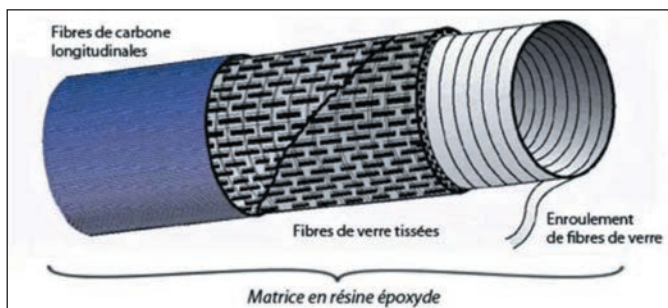


Figure 15

Structure des perches en composite.

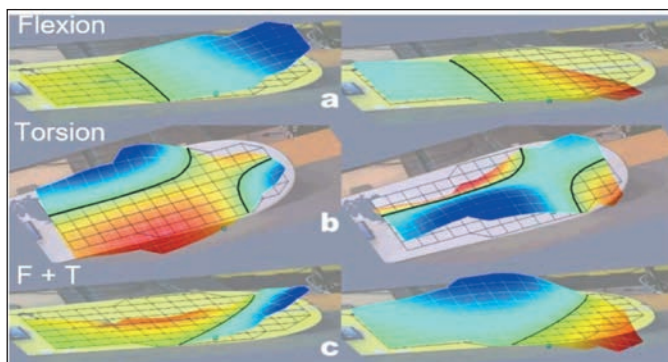


Figure 16

Contraintes en flexion et en torsion sur le snowboard.

etc. Son rôle est simplement de séparer les deux plaques. Sur la Figure 17A sont représentées deux plaques formant une épaisseur totale égale à t qui sont collées sans être séparées. On pose la rigidité, la résistance et la masse à la valeur de 1. Maintenant, on les sépare avec une mousse ou un nid d'abeille : en passant de t à $2t$, on a doublé l'épaisseur mais on a **multiplié par 7 la rigidité en flexion simplement en les écartant l'une de l'autre**.

Si on multiplie par 4 l'épaisseur, on multiplie la rigidité

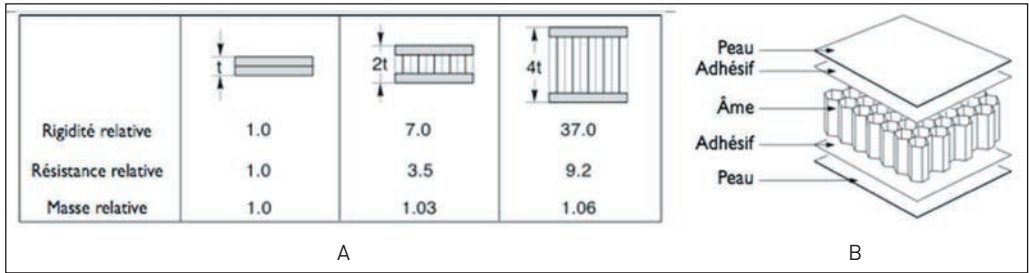


Figure 17

A. Variation des propriétés d'un matériau sandwich en fonction de l'écartement. B. Structure d'un matériau sandwich.

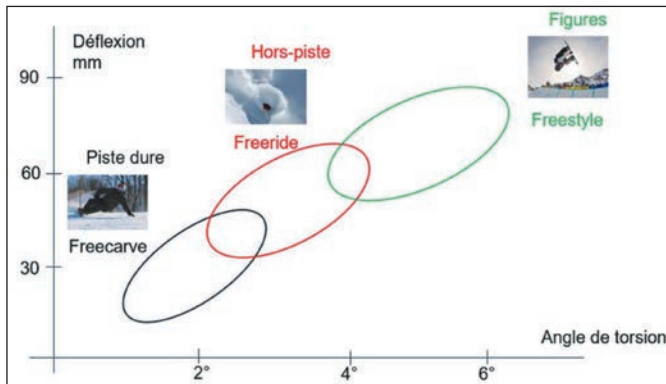


Figure 18

Rigidité en flexion et en torsion pour les trois activités en snowboard.

par 37, c'est gigantesque : on peut augmenter fortement la résistance en flexion alors que la masse n'a quasiment pas bougé.

En s'adaptant à une géométrie particulière, on peut donc changer considérablement les propriétés des équipements sportifs par l'introduction de matériaux sandwich avec des peaux en matériaux composites (Figure 17B).

Dernière information concernant les snowboards. Il y a trois types d'activité en snowboard (Figure 18). Le freecarve

consiste à utiliser une planche pour être sur une piste dure et avoir des virages serrés – faire du slalom par exemple sur une piste damée –, là il faut des planches qui sont très rigides à la fois en flexion et en torsion. Figure 18, à gauche, on voit la rigidité en flexion : plus on est haut, plus la rigidité est faible. Figure 18, en bas, la rigidité en torsion : plus l'angle est important, plus la rigidité en torsion est faible. Quand on est en freeride, c'est-à-dire le hors-piste, on a besoin d'avoir une souplesse plus importante que quand on est sur une piste damée : les planches freeride qui sont fabriquées sont à l'intérieur de cette ellipse (Figure 18, au milieu). Pour le freestyle – des figures dans le tube qu'on voit parfois à la télévision –, on a besoin d'avoir des planches très souples parce que les angles au bord du tube sont très importants, mais il ne faut pas que cela empêche la vitesse de l'athlète : les planches adaptées sont particulièrement flexibles à la fois en flexion et en torsion. Voilà qui illustre la diversité des choix techniques à considérer.

4.4. L'aviron

Autre exemple ici avec une tranche de coque d'aviron³⁷ (**Figure 19**). Les pagaies sont fabriquées principalement en **fibre de carbone avec interpositions de nids d'abeille** : ce sont des matériaux sandwich particulièrement résistants avec une rigidité extrêmement forte nécessaire car l'objet est très long.

Le matériau est principalement la fibre de carbone en tissu ou bien unidirectionnel avec, en interposition, des nids d'abeille ou des mousses variées.

Pour la planche de surf, le problème est un peu différent. Pour que l'utilisateur puisse bénéficier de la force d'Archimède³⁸, il faut que la planche ait du volume pour que l'athlète dessus ne prenne pas l'eau. La planche de surf comprend une âme³⁹ en polystyrène très volumineuse (**Figure 20**). Il suffit de mettre très peu de fibres pour obtenir une rigidité très importante.

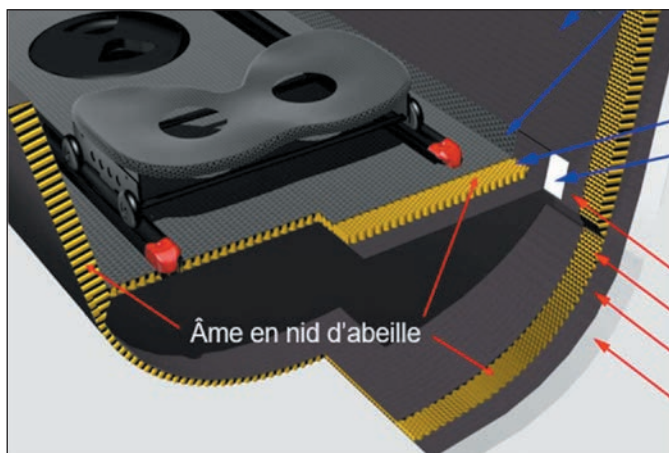


Figure 19

Tranche d'une coque d'aviron.

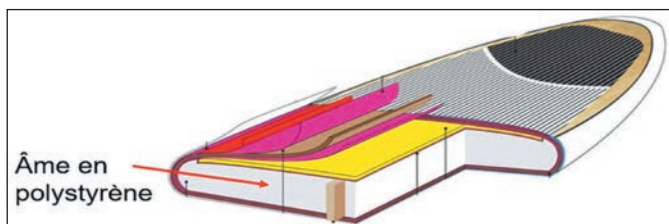


Figure 20

Structure d'une planche de surf avec son âme en polystyrène.

4.5. La lame de course pour le handisport

Sur la **Figure 21A**, on a des équipements de prothèses en carbone à gauche avec ici des coureuses qui ont une seule prothèse. Sur la **Figure 21B** est représenté un coureur avec

deux prothèses ; contre-intuitivement, cette situation est un peu plus favorable techniquement, parce que la symétrie de la course favorise cette géométrie avec deux prothèses au lieu d'une prothèse d'un côté, un membre valide de l'autre...

On peut apprécier cette comparaison sur la **Figure 22**. La courbe en rouge est celle d'un athlète handicapé et son battement a une fréquence plus grande que celui de l'athlète valide. En effet, dans un membre amputé au niveau du genou, le moment d'inertie est plus faible avec la même

37. Sport nautique où les athlètes propulsent un bateau long et fin à l'aide de pagaies.

38. Force ascensionnelle exercée par un fluide sur un objet immergé, égale au poids du fluide déplacé.

39. Structure centrale d'une planche de surf, souvent faite de mousse, qui lui confère sa flottabilité et sa rigidité.

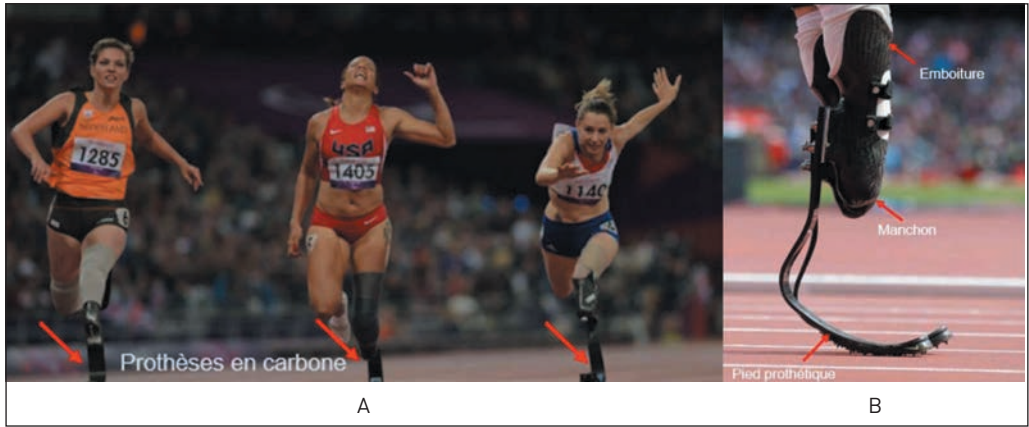


Figure 21

A. Athlètes unijambistes avec des prothèses en carbone. B. Athlète avec deux prothèses.

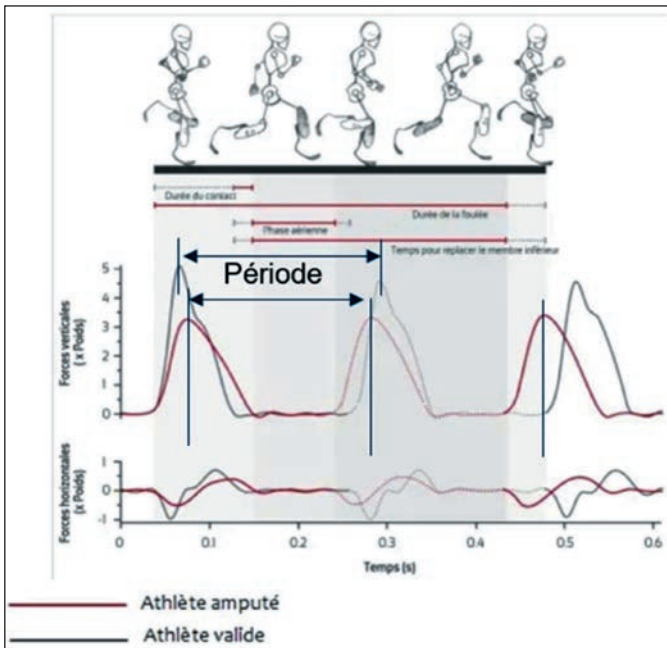


Figure 22

Comparaison de la fréquence de battement et de la force appliquée d'un athlète valide et d'un athlète amputé.

musculature de la cuisse. Il va donc prendre un peu moins de temps pour ramener la jambe en arrière : la fréquence de battement est 20 % supérieure environ.

On constate aussi – avec la force exercée sur le sol en rouge – que la force exercée sur le sol de l'athlète handicapé est moins importante et dure plus longtemps que celle de l'athlète valide. Pourquoi ? Comme il n'y a pas les muscles de rebond du mollet et du pied, on a uniquement de la restitution de l'énergie de déformation de flexion, **le temps d'appui sur le sol de l'athlète handicapé est donc plus long**. Toutes ces caractéristiques font que quand on a une prothèse d'un côté et une jambe valide de l'autre, ce n'est pas du tout facile de gérer tout cela.

À la question : « Est-ce qu'il y en a un qui est plus avantage que l'autre ? », il y a eu beaucoup d'études là-dessus et on ne sait pas très bien répondre. En moyenne, quand



Figure 23

A. Fauteuil de course. B. Fauteuil de basket.

même, il semble plus facile pour les athlètes valides de faire des performances avec quelquefois des nuances, comme par exemple sur 200 ou 400 mètres. On avait un athlète sud-africain – je ne veux pas citer son nom parce qu’il a fait beaucoup de dégâts par la suite⁴⁰ –, qui faisait des fins de course extrêmement rapides. Pour la fin de course, quand on a une prothèse en carbone avec une lame en carbone, la lame en carbone n’est pas fatiguée, alors que le mollet et le pied de l’athlète valide commencent à être saturés en acide⁴¹ : **les fins de course des athlètes avec une lame sont plus performantes que celles des athlètes valides**. Pour les débuts de course, ce n’est pas tout à fait la même chose

et je pense que c’est un peu illusoire de vouloir catégoriser tout cela.

4.6. Le fauteuil

Comme dernier exemple, regardons les chaises : il y en a de toutes sortes. On voit qu’il n’y a rien de commun entre une chaise de course, un fauteuil de course (**Figure 23A**) et un fauteuil pour le basket (**Figure 23B**) – c’est encore différent pour les fauteuils pour l’escrime, qui sont fixés au sol avec une distance fixe entre les deux escrimeurs. On joue alors sur la souplesse. On voit aussi des fauteuils en aluminium, **d’autres qui sont entièrement en carbone, très optimisés**, y compris pour la résistance à l’air.

40. Oscar Pistorius, athlète sud-africain et recordman du monde du 100 m handisport en 2007, reconnu coupable du meurtre de sa compagne Reeva Steenkamp en 2017.

41. Acide lactique, produit métabolique résultant de l’exercice intense, contribuant à la fatigue musculaire.

Conclusion

Il est essentiel de se souvenir des points suivants :

1. Il y a toujours un travail infini pour améliorer les matériaux pour le sport
2. Les matériaux composites sont un miracle. Leurs propriétés, leur diversité, les perspectives qu'ils ouvrent sont porteuses de progrès spectaculaires. Ceci est vrai dans tous les domaines, et en particulier pour les équipements des sportifs de haut niveau et des sportifs handicapés.