

Les matériaux composites dans le sport

Yves Rémond est professeur à l'Université de Strasbourg et à l'École européenne de chimie polymères et matériaux. Il est spécialiste de modélisation des propriétés mécaniques des polymères et composites. Jean-François Caron est Directeur de recherche à l'École des Ponts ParisTech (ENPC) ; il enseigne à l'ENPC et à l'École Polytechnique. Il est spécialiste de mécanique numérique appliquée notamment aux structures composites.

L'incessante recherche de performance qui caractérise le sport a conduit à l'utilisation massive de nouveaux matériaux et en particulier au recours aux matériaux composites. Le matériel et les équipements sportifs (raquette de tennis, ski, etc., [Figure 1](#)) donnent à chacun l'expérience pratique de ces matériaux dont la présentation fait l'objet de ce chapitre.

1 Qu'est-ce qu'un matériau composite ?

L'expression est assez parlante en soi : un matériau composite

est un assemblage de différents constituants. Une définition aussi générale recouvre un très grand nombre de cas, certains aussi répandus que le béton, qui est un assemblage de cailloux, de sable et de ciment, d'autres avec des degrés de sophistication variés et, la suite le montrera, parfois très complexes.

Les matériaux composites fabriqués pour leurs propriétés d'usage par l'industrie sont souvent constitués de **fibres** immergées au sein d'une **matrice**⁴⁹ (colle ou polymère). Les fibres peuvent être fabriquées artificiellement par synthèse chimique ou être naturelles, issues de la matière végétale. Les organismes vivants donnent en effet des exemples de matériaux composites d'une incroyable complexité et même si les matériaux de synthèse sont loin de l'être autant, il est intéressant de se rapprocher de la nature pour prendre la mesure des infinies

49. Voir le Chapitre de N. Puget, paragraphe 1.2.2.



Figure 1

De nombreux sports font appel à des matériaux composites : tennis, snowboard, ski (voir le **Chapitre de N. Puget**), saut à la perche, etc.

Figure 2

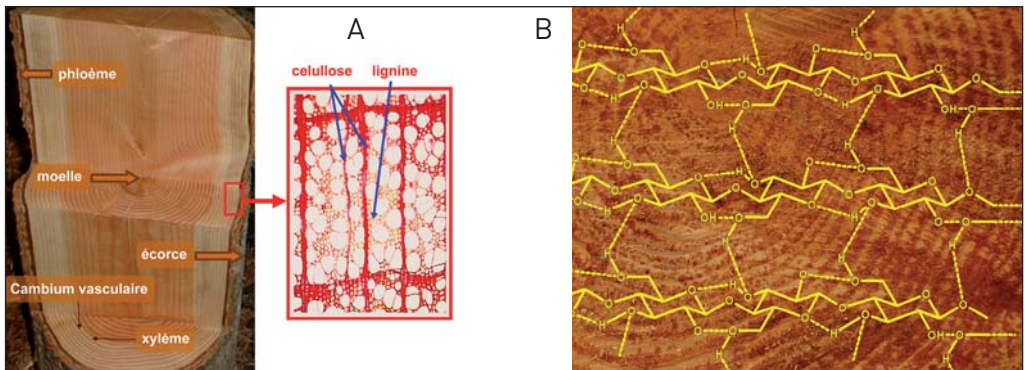
Le bois est le matériau composite le plus ancien à avoir été utilisé par l'homme (A) : il comporte des fibres de cellulose (polymère pouvant comporter une dizaine de milliers d'unités glucose : structure chimique en B) et de la lignine.

possibilités de ces assemblages moléculaires.

La **Figure 2A** représente le matériau composite le plus ancien à avoir été utilisé par l'homme : le bois. Au niveau moléculaire, on trouve les fibres de cellulose, polymère de 200 à une dizaine de milliers d'unités glucose (**Figure 2B**), et la matrice, constituée de lignine, autre assemblage polymère (zoom sur la **Figure 2A**). Ces assemblages

élémentaires s'assemblent à leur tour donnant naissance à d'autres assemblages aux échelles supérieures jusqu'à cette structure macroscopique bien connue des arbres.

Qu'il s'agisse du monde végétal, de celui des insectes (les carapaces chitineuses), des crustacés (les carapaces des homards, **Figure 3**), ou de l'homme (les ongles, les cheveux), les exemples peuvent se multiplier à l'infini.



La conclusion est là : les organismes vivants « utilisent » des matériaux dont l'étude fait apparaître une hiérarchisation de nombreux éléments qui permet la fonction assignée par la nature – bref, des matériaux composites.

La recherche de nouveaux matériaux s'est inspirée de tels exemples pour, en toute humilité et à une échelle de complexité bien modeste, structurer les matériaux aux différentes échelles pour qu'ils répondent aux objectifs fixés.

2 De l'utilisation des matériaux composites

La finalité de l'ingénieur est de disposer de matériaux qui répondent le mieux possible aux objectifs d'usage. Ceux-ci sont souvent multiples et contradictoires. On les veut performants mais peu coûteux ; résistants mais souples ; rigides mais légers. La démarche est de réunir, sous forme de matériaux composites, différents constituants dotés chacun de l'une des propriétés recherchées, dans l'espoir que le matériau final aura la somme de toutes ces propriétés. La pratique montre que cette démarche est fréquemment couronnée de succès, au-delà même des espoirs puisqu'on obtient parfois mieux que la somme des propriétés.

L'industrie automobile illustre cette situation : quand on fait des « ailes de voiture », on veut qu'elles résistent à la flexion. Le choix du métal comme matériau conduisait à leur donner une bonne résistance partout, même dans l'épaisseur où elle est inutile, voire néfaste. Un matériau



Figure 3

Les organismes vivants tels que les mollusques sont composés de matériaux composites (carapaces, etc.).

idéal mettrait la résistance là où il faut, en flexion. Un matériau composite permet de s'en rapprocher. On peut signaler aussi une « propriété » souvent masquée par les fonctions principales des objets : celle d'assurer la compatibilité du matériau avec son environnement – l'eau, les chocs, la fatigue... Là encore l'utilisation de matériaux composites pourra aider à résoudre les difficultés rencontrées (voir les [Chapitres de N. Puget et de F. Roland](#)).

Les objets que nous allons présenter plus loin, la raquette de tennis, la planche de snowboard, la perche de saut et le casque de protection, sont tous faits de matériaux composites qui mélangent des fibres (principalement des fibres de verre ou de carbone) avec une colle. La réalisation du composite à partir de ses matériaux constitutifs doit suivre les trois principes suivants :

Contrôler l'interface fibre-matrice

Les efforts appliqués au matériau le sont aussi bien à la

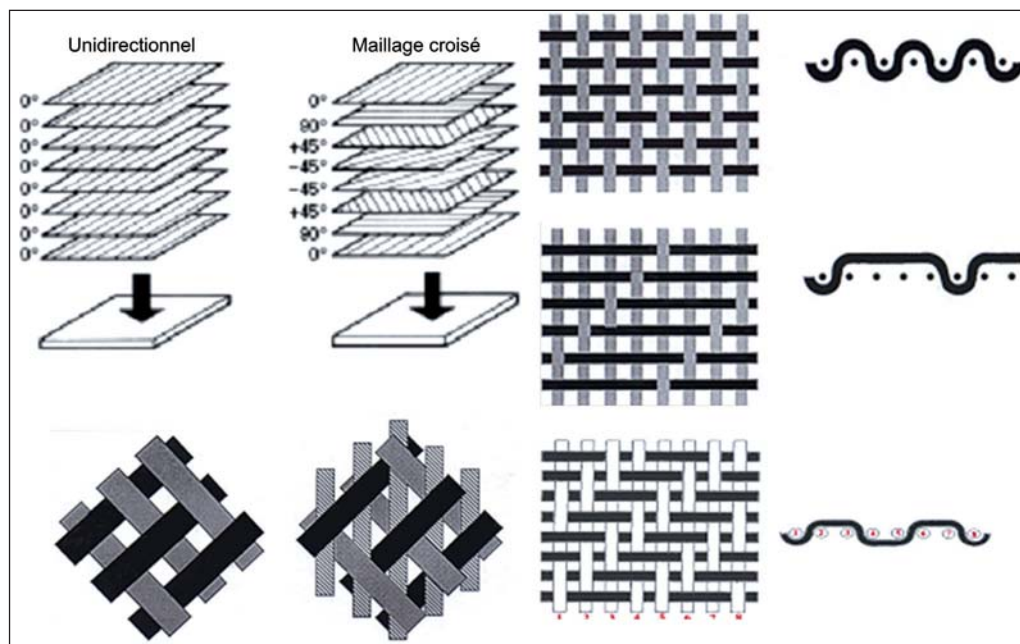


Figure 4

Des fibres de géométries variées : plaque stratifiée, unidirectionnelle ou non, tissée, tressée...

matrice qu'aux fibres, mais ce sont les fibres qui sont résistantes et non la colle. L'interface entre les deux types de constituants – fibres et colle – est un endroit particulièrement sensible ; il y a donc lieu de bien la formuler. Les chimistes sont capables de caractériser cette interface, de décrire les liaisons chimiques qui se forment et qui assurent la cohésion du matériau. Leurs études permettent d'orienter la constitution du matériau pour optimiser les performances de ces interfaces.

Contrôler la géométrie des fibres (Figure 4)

Le mot « fibre » évoque les textiles, et en effet les concepts du tissage peuvent être importés et employés pour conduire à une variété d'assemblages. Si les fibres peuvent être assemblées dans une géométrie où elles sont toutes parallèles entre elles (matériau unidirectionnel),

elles peuvent aussi être tissées, tressées, tricotées pour créer des surfaces bi-dimensionnelles tout comme le sont les tissus. Chaque type d'assemblage présente des propriétés différentes, par exemple par rapport à la résistance aux efforts. La géométrie la plus adaptée à l'utilisation des objets finis sera sélectionnée. À plus grande échelle, d'autres choix se présentent : empilements de plans (qui donne les matériaux qu'on appelle stratifiés), parallèles (unidirectionnels) ou croisés, différents types de tissage pour lesquels on utilise les mêmes mots que pour les textiles – satin, sergé, toile, taffetas, ou même constructions de tresses, de tricotages tridimensionnels... les ingénieurs s'en sont donné à cœur joie.

Contrôler l'assemblage à grande échelle

Un matériau, c'est bien sûr une composition moléculaire,

mais c'est aussi une géométrie et il s'agit de contrôler les assemblages à grande échelle, pour obtenir de nouvelles propriétés. La conception d'une plaque devant subir des efforts à la flexion illustre cette situation. Soit une plaque de Kevlar (*Figure 5*) – nom commercial qui désigne des fibres d'aramides⁵⁰ (voir le *Chapitre de F. Roland*) dans une colle. Cette plaque qui, seule, n'a pas de rigidité particulière en flexion est utilisée sous la forme de « sandwich » : entre deux plaques, on place un matériau mou qu'on appelle « nid d'abeille » qui n'a pas de rigidité propre mais dont la seule présence fait que l'assemblage sandwich devient très rigide alors que chacun de ses trois constituants séparé est souple.

La conception d'un matériau procède d'une démarche inductive : dans une première phase du travail, les propriétés à obtenir sont définies en fonction de l'usage recherché ; dans une deuxième phase du travail on cherche la composition du matériau qui va permettre le respect de ces propriétés. Les matériaux composites, avec la complexité de constitution qui vient d'être montrée, fournissent une quantité de schémas entre lesquels il faut choisir : la matrice peut être polymère ou résine (**thermodur-**

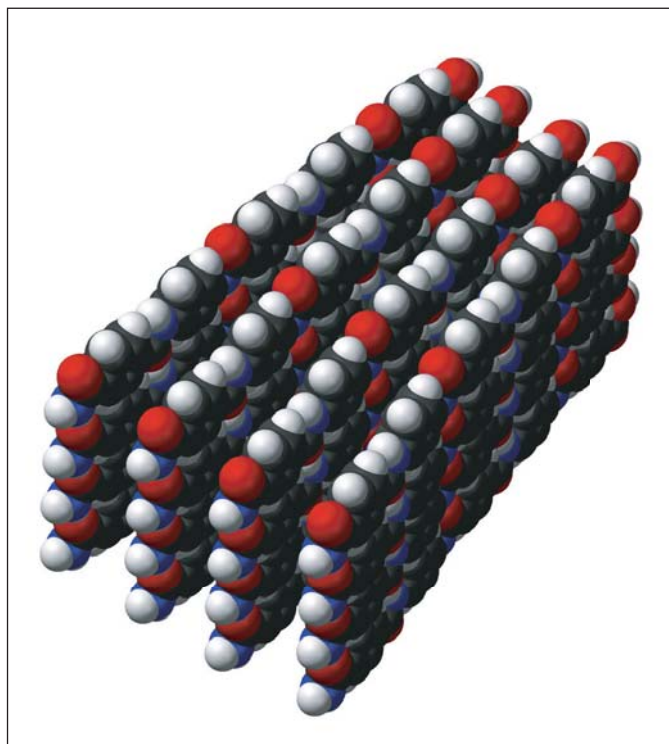
cissable, thermoplastique), un métal (acier aluminium) ou encore un céramique ; la fibre peut être un polymère d'origine végétale, un polymère de synthèse comme l'aramide (pour le Kevlar), une fibre de verre (pour les skis par exemple : voir le *Chapitre de N. Puget*), une fibre de carbone, etc.

Pour les matériaux du sport, deux propriétés mécaniques vont jouer un rôle clé : la rigidité et la résistance.

La rigidité est la mesure de la déformation sous une charge (par exemple la flexion d'une plaque, comme dans l'exemple précédent). Les matériaux composites permettent des rigidités considérables par rapports aux matériaux purs. Pour donner des ordres de

Figure 5

Schéma du Kevlar, matériau découvert en 1965 par des chercheurs de la société DuPont de Nemours.



50. Les aramides sont une classe de matériaux résistant à la chaleur et/ou présentant de bonnes propriétés mécaniques. Ils ne peuvent être utilisés que comme fibres, qui servent surtout à la fabrication de matériaux composites, en renfort de matrices (voir aussi le *Chapitre de F. Roland*).

grandeur des rigidités que l'on peut obtenir, voici des valeurs données en GPa (gigapascals) : pour le polyester ou l'époxy, 1 à 5 ; pour des fibres de verre dans une matrice d'aluminium, 70 ; pour l'acier, à titre de comparaison, 200, et pour les fibres de carbone, de 200 à parfois plus de 1 000.

La résistance, c'est la mesure de la traction maximale supportée par le matériau ; elle se mesure en mégapascals (MPa). Les matrices polymères dépassent rarement quelques dizaines de MPa, l'aluminium se situe à 450 MPa. Entre 1 000 et 1 500 MPa, on trouve les meilleurs aciers. Mais la résistance des fibres de verre comme celle des fibres de carbone peut s'élever jusqu'à 4 000 à 5 000 MPa. Les fibres de verre ne sont peut-être pas très rigides, mais elles sont au moins aussi résistantes que celles de carbone (voir le [Chapitre de C. Lory](#)).

3 Conception de matériels de sport : quelques exemples

Le mot « matériau » désigne bien plus qu'un échantillon de matière. Il implique plus profondément une démarche très puissante du scientifique et de l'ingénieur, démarche qui comprend les phases suivantes, souvent d'ailleurs exécutées de façon itérative, les résultats d'une phase pouvant modifier les données d'entrée d'une autre :

- *conception générale de l'objet* ;
- *phénoménologie de l'objet en fonctionnement*. Les phénomènes physiques qui

interviennent lors du fonctionnement du matériel doivent être identifiés et compris aussi bien que possible afin que l'influence des divers paramètres (géométrie, propriétés intrinsèques des matériaux de base, etc.) puisse être mise en évidence ;

- *modélisation*. Cette étape a pris une importance majeure dans toutes les « démarches matériaux » d'aujourd'hui. Le fonctionnement de l'objet final est simulé sur ordinateur à l'aide de l'analyse qualitative et quantitative qu'apporte la phénoménologie. Ce travail permet de déterminer les valeurs-cibles des paramètres (la géométrie, les dimensions, le poids, etc.) et des propriétés (rigidité, résistance, etc.) qui permettront d'atteindre le résultat recherché ;

- *établissement d'un cahier des charges*. Il s'agit de décider des caractéristiques que l'on veut obtenir de l'objet recherché. Dans le cas du matériel sportif, il pourra s'agir du poids, de la résistance, de la rigidité, du frottement, de la tenue aux contraintes thermiques etc. Ces caractéristiques objectives sont déduites de l'analyse du fonctionnement de l'objet, comme on le verra plus loin dans les exemples présentés. Les contraintes correspondant à la faisabilité de l'objet (par exemple possibilité de soudure ou d'assemblages) ne devront pas être oubliées ;

- *la fabrication* proprement dite.

Les exemples qui suivent visent à faire mieux saisir ces différentes étapes du travail – qui ont d'ailleurs soutenu

avec succès l'épreuve de servir de « projets » aux étudiants de l'École nationale des ponts et chaussées.

3.1. La raquette de tennis (Figure 6)

Conception

Si les raquettes existantes permettent de concevoir l'objet dans ses grandes lignes, il y a lieu d'aller beaucoup plus loin selon les performances recherchées.

Phénoménologie

Quelques exemples de phénomènes à étudier :

- Comportement de la raquette sous percussion : centre de percussion. La Figure 7 montre une raquette suspendue par la poignée. Le comportement du point P dépend du point d'impact de la balle : pour un certain point d'impact, le point P reste immobile – c'est le centre de percussion. C'est un point important de la géométrie de la raquette qu'il faut savoir prévoir avant la fabrication de l'objet.
- Comportement de la raquette sous percussion :

analyse vibratoire. Comme le fait une corde de guitare, la raquette frappée entre en vibration et ces vibrations sont marquées de « nœuds » et de « ventres ». Si l'on tape sur la raquette à un nœud de vibration, la vibration ne se manifesterait pas. On devine l'intérêt de faire coïncider le centre de percussion avec le nœud de vibration – faute de quoi le joueur, soumis à la vibration de la raquette, risque le fameux « tennis elbow »⁵¹.

Établissement du cahier des charges

Parmi les données d'entrée du cahier des charges, il y a lieu de d'abord caractériser le joueur : sa morphologie, son niveau de jeu (coordination), son style de jeu (offensif ou défensif), car tous ces paramètres vont influencer sur le type de contraintes auquel

51. On appelle « tennis elbow » une épicondylite, qui est un trouble musculosquelettique du coude, caractérisé par une inflammation douloureuse des structures situées à proximité de l'épicondyle latérale, une petite saillie osseuse à proximité de l'humérus.

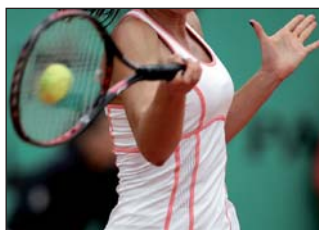


Figure 6

La raquette de tennis, un matériau composite qui associe des fibres et une colle.

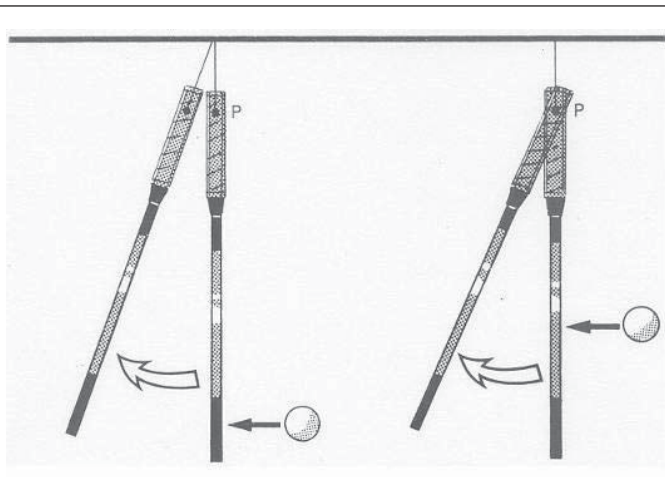


Figure 7

Le centre de percussion P est un point important de la géométrie de la raquette qu'il faut savoir prévoir avant la fabrication.



Figure 8

Le centre de gravité et le poids de la raquette doivent être caractérisés avec précision.

Figure 9

1) Image numérique de la géométrie choisie, qui a permis les calculs de résistance, de rigidité, des modes de vibration etc.
2) Fabrication du moule. 3) Moule terminé. 4) Raquette terminée.

sera soumise la raquette. Ces premières données sont ensuite traduites en propriétés objectives pour la raquette : sa puissance (force des impacts), sa capacité de contrôler la trajectoire de la balle (précision, récupération des coups ratés), sa manœuvrabilité, particulièrement sensible au filet, son confort. Tout ceci va se traduire en caractéristiques statiques – le poids, le centre de gravité (**Figure 8**),

la distribution des masses, l'inertie⁵² que l'objet final devra présenter – ainsi qu'en caractéristiques de résistance – à la flexion, à la torsion.

Fabrication

La **Figure 9** est issue du travail des étudiants : en 1, l'image numérique de la géométrie choisie, qui a permis les calculs de résistance, de rigidité, des modes de vibration etc. ; en 2, la fabrication du moule,

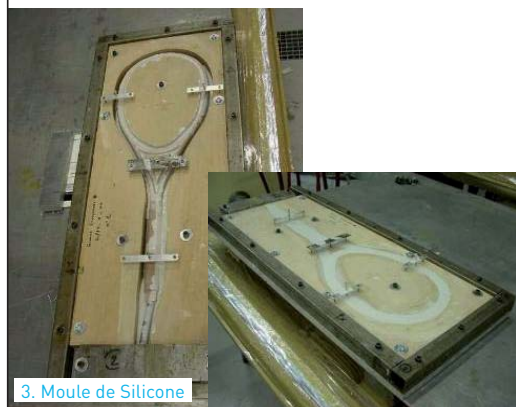
52. L'inertie est la propriété que possède un corps de rester immobile (ou de conserver son mouvement) lorsque aucune force externe ne s'y applique, ou que les forces qui s'y appliquent s'équilibrent.



1. Calcul EF



2. Fabrication du moule



3. Moule de Silicone



4. Prototype

représenté terminé en 3 ; en 4, la raquette terminée.

Dans la description de cette démarche, le « matériau » semble avoir disparu. En fait, même caché, il est omniprésent, car à chaque étape, il conditionne les paramètres qu'on sera capable d'atteindre ou non. À l'inverse, d'ailleurs, le travail oriente le choix des matériaux à sélectionner ou pousse au développement de nouveaux matériaux. L'infinie richesse des matériaux composites ouvre évidemment des perspectives précieuses, largement exploitées mais toujours renouvelées par de nouvelles possibilités de formulation.

3.2. La planche de snowboard (Figure 10)

Conception

Phénoménologie

Quelques exemples de phénomènes à étudier :

- La raideur en flexion. L'amplitude de la déformation de la planche sous le champ de contraintes de flexion, comme indiqué sur la [Figure 11](#), doit être caractérisée.

- La raideur en torsion. L'amplitude de la déformation de la planche sous le champ de contraintes de torsion comme indiqué sur la [Figure 12](#), doit également être caractérisée.

Modélisation

La géométrie choisie n'est pas rigoureusement celle d'une planche, mais un objet dont on doit maîtriser la variation d'épaisseur pour que la rigidité en flexion et en torsion réponde exactement à ce que l'on attend. La [Figure 13A](#) montre le modèle de la géométrie entrée dans



Figure 10

La planche de snowboard est faite d'un matériau composite qui doit résister aux nombreuses contraintes subies pas le sportif : flexion, torsion...

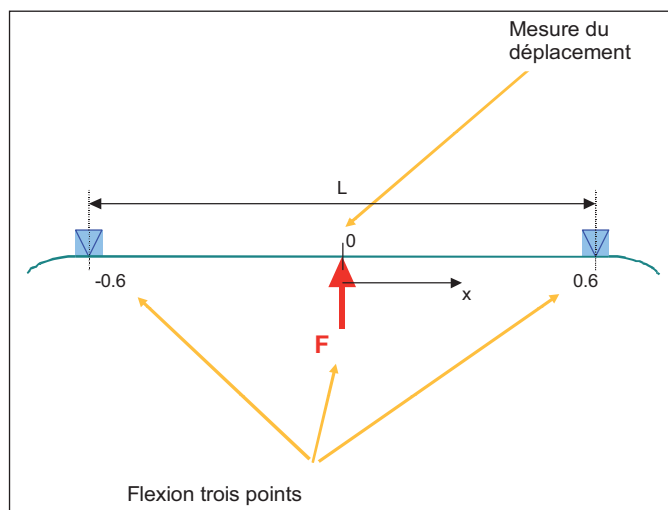
l'ordinateur et soumis à une flexion ; la [Figure 13B](#), celle du maillage utilisé pour le calcul et qui permet la caractérisation de la variation d'épaisseur d'un bout à l'autre de la planche. L'objectif est de savoir quelle va être l'épaisseur à un endroit donné et quel type de matériau composite doit être utilisé pour la fabrication du snowboard.

Établissement du cahier des charges

Ici encore, le cahier des charges doit d'abord caractériser le sportif : sa morphologie (son poids), son niveau (débutant ou expert), son style (freestyle/

Figure 11

On caractérise la planche de snowboard en flexion par trois points spécifiques : deux appuis (bleu) et la force centrale appliquée (rouge). Voir aussi le [Chapitre de N. Puget](#).



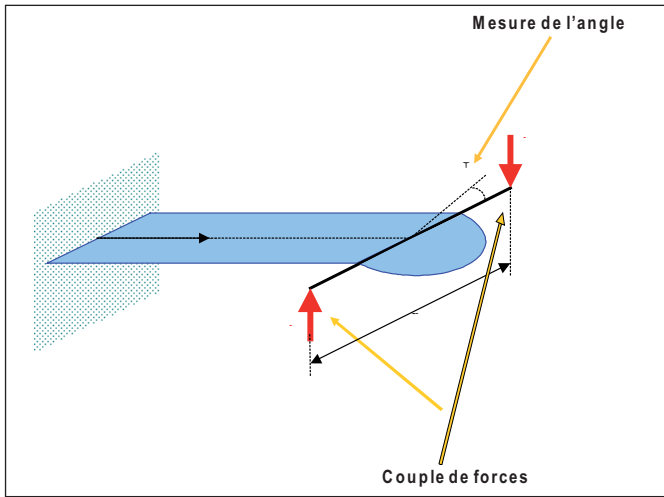
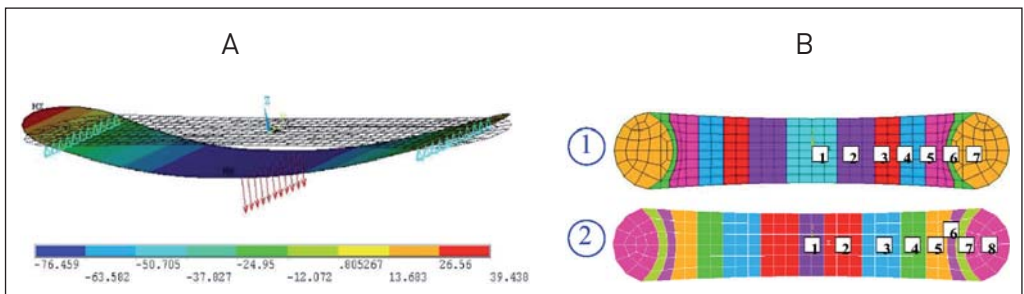


Figure 12

L'amplitude de la déformation de la planche sous le champ de contraintes de torsion doit être caractérisée par des paramètres précis.

Figure 13

On modélise une planche par un objet dont on doit maîtriser la variation d'épaisseur pour que la rigidité en flexion et en torsion réponde exactement à ce que l'on attend (A). Pour cela, on réalise un « maillage » permettant d'effectuer des calculs pour optimiser l'épaisseur de la planche d'un bout à l'autre (B).



freeride⁵³/freecarve) car tous ces paramètres vont influencer sur le type de contrainte auquel sera soumise la planche de snowboard. Ces premières données sont ensuite traduites en propriétés objectives pour le snowboard : sa capacité à contrôler les trajectoires (précision, rattrapage d'erreurs), sa manœuvrabilité (facilité du changement de direction, particulièrement sensible en freestyle), son confort. Le choix de paramètres objectifs dépendra de l'usage recherché.

53. « Freestyle » : sport de glisse sur neige consistant à faire des figures en ski à l'aide de modules de neige ou de métal ; « Freeride » : sport dans le cadre d'une pratique extrême.

Fabrication

Il faut bien que l'objet passe du stade de modèle numérique à celui d'objet réel. La Figure 14 montre des étapes de la fabrication d'une planche par les élèves de l'École nationale des Ponts et Chaussées qui en avaient fait l'étude.

3.3. La perche de saut (Figure 15)

Comme la raquette de tennis ou la planche de snowboard, la perche du sauteur à la perche est le fruit d'un travail technologique avancé. Ici, la conception du matériel doit peut-être encore plus tenir compte du sportif lui-même que dans les autres sports. Il faut non seulement que le sportif soit extrêmement puissant mais le « timing » du mouvement est particulièrement difficile à contrôler : il convient de prévoir le moment précis où la restitution de l'énergie de la perche vers le sauteur va être la plus efficace.

On utilise de nos jours principalement les fibres de verre, quelquefois les fibres de carbone, mais celles-ci apparaissent encore comme insuffisamment déformables. La Figure 16 montre l'évolution des records en saut à la perche au cours des années et donc en fonction des matériaux utilisés : au début, on



Figure 14

Les étapes de fabrication
d'une planche de snowboard.

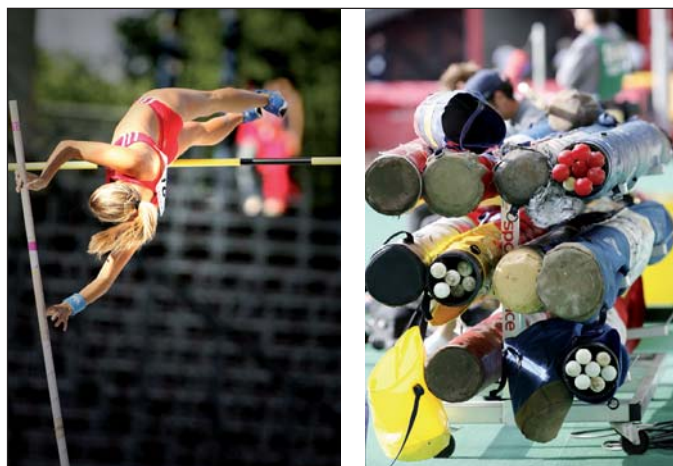


Figure 15

La perche du sauteur à la perche est faite d'un matériau composite très élaboré.

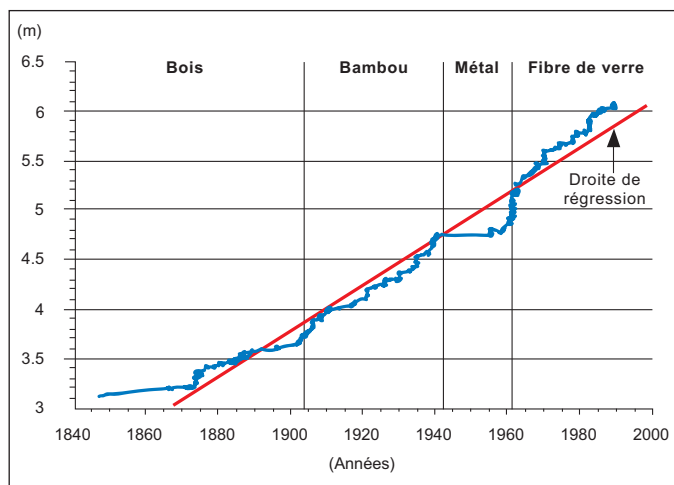


Figure 16

Évolution du record du monde de saut à la perche : une nette amélioration, au fur et à mesure que la perche évolue !

sautait avec des perches en bois (déjà un matériau composite !) ensuite avec des perches en bambou, puis en aluminium – avant de recourir aux fibres de verre (Tableau 1) (voir aussi le Chapitre d'après la conférence de D. Masseglia).

3.4. Optimiser les casques de protection

Tout récemment des casques de protection en matériaux

Fibre de verre	
SiO ₂	53-55 %
Al ₂ O ₃	14-15 %
CaO	17-23 %
MgO	1 %
Na ₂ O ₃	0,8 %
B ₂ O ₃	0-8 %
Fe ₂ O ₃	0,3 %
TiO ₂	0,5 %

Tableau 1

Après être passée du bois au bambou, du bambou à l'aluminium (1960), pour être ensuite conçue en polyester et en fibre de verre (aux Jeux olympiques de 1964), la perche est maintenant faite d'un mélange de résines synthétiques, de fibres de verre et de carbone, lui conférant à la fois élasticité et flexibilité, permettant l'« effet catapulte ».

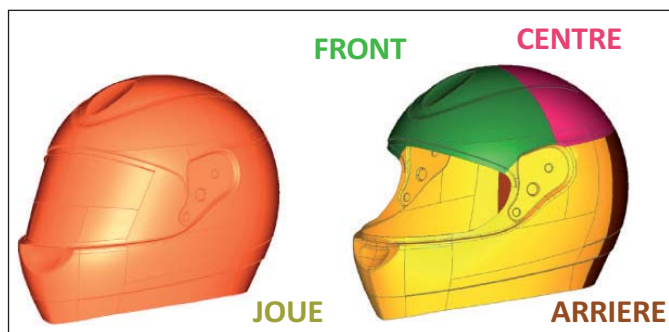
composites ont été développés. C'est l'occasion de rappeler que ces matériaux – mieux que les autres – sont susceptibles d'absorber de l'énergie (voir aussi le Chapitre d'après la conférence de D. Masseglia). Cette propriété résulte de l'importance des interfaces fibres-matrice, évoquée au début de ce chapitre ; c'est en cassant cette interface que le casque absorbe l'énergie du choc. Incidemment, la situation est similaire pour un pare-choc de voiture généralement fabriqué dans un composite constitué de polypropylène armé de petites particules d'élastomère en son sein : après chaque choc, même si aucune lésion n'apparaît, les nodules génèrent une importante microfissuration interne qui absorbe l'énergie.

L'approche, actuellement, est de considérer la protection de l'ensemble tête-casque et non, comme auparavant, en améliorant la seule résistance du casque. L'utilisation de matériaux composites, qui permet de varier les propriétés de résistance selon les différentes parties du casque, devient tout à fait essentielle.

La **Figure 17** montre que quatre zones ont été identifiées comme étant à l'origine, en cas de choc, de lésions spécifiques, très différentes les unes des autres. Il est en conséquence impératif d'adapter les matériaux utilisés dans la fabrication des différentes parties du casque, dont la structure finale est nécessairement complexe. Les tests de résistance concerneront en priorité la zone la plus fragile et la plus exposée, celle qui se situe un tout petit peu sur l'arrière du casque, là où les chocs même de faible énergie peuvent entraîner les lésions les plus graves; le matériau constitutif utilisé sera choisi en fonction des résultats obtenus lors d'essais standardisés.

3.5. Les matériaux composites en aéronautique

L'Airbus A380 innove en utilisant massivement les matériaux composites (**Figure 18**). Jusqu'à présent, leur emploi en aéronautique était limité aux avions militaires, de dimensions beaucoup plus faibles. Le caisson central de voilure, qui est l'attache des ailes – donc l'une des pièces majeures de l'avion – est désormais entièrement réalisé en composite. Mesu-



rant $7 \times 7 \times 3 \text{ m}^3$, il est réalisé en une seule pièce alors qu'il fallait, auparavant, assembler des dizaines de pièces pour aboutir à la pièce finale. Le gain en poids par rapport à la structure en acier, est de trois tonnes. C'est ce qu'on appelle l'allègement des structures, qui permet une moindre consommation de kérosène pour un poids transporté identique ou un nombre plus important de passagers ou davantage de fret. Des recherches similaires sont développées dans le cas de l'automobile, pour des voitures plus économes, que ce soit en essence ou, dans l'avenir, en électricité.

Pour se situer dans l'histoire, on peut se reporter à la **Figure 19**. Les principaux fabricants d'avion, Airbus et Boeing envisagent maintenant la construction d'avions dont le fuselage⁵⁴ pressurisé sera complètement fabriqué en composite, ainsi que les ailes. Ces solutions sont encore à l'étude pour les avions civils, alors qu'elles sont déjà mises en œuvre pour les avions militaires.

54. Le fuselage désigne l'enveloppe qui reçoit généralement la charge transportée, ainsi que l'équipage.

Figure 17

Le casque présente les quatre zones pouvant conduire à des lésions très différentes les unes des autres. Sa fabrication sera la résultante des études menées sur la résistance aux chocs des différentes parties.

Figure 18

Le caisson central de voilure de l'Airbus A380 est entièrement réalisé en composite



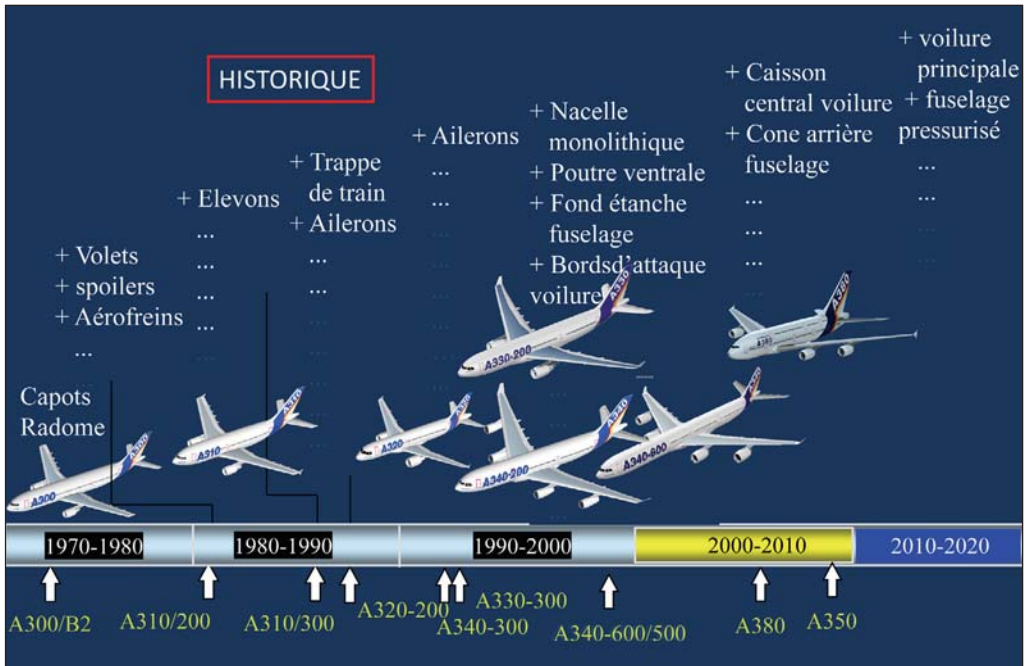




Figure 19
Historique des composites en Aéronautique.

Conclusion

L'aéronautique est un bon exemple de la manière dont les composites, champ immense, ouvert à toutes les imaginations, vont faire évoluer notre quotidien. Comme dans le cas de la Formule 1 (voir le [Chapitre de C. Lory](#)), l'aéronautique est en effet une sorte de banc d'essai pour des innovations, qui pourront être largement diffusées.

Pour un industriel, les caractéristiques techniques des composites et leur comparaison avec celles des matériaux métalliques classiques, comme illustré dans le [Tableau 2](#), peuvent être décisives. Ce tableau illustrera la conclusion de ce chapitre :

	Résistance en traction (MPa)	Tenue en fatigue après 107 Cycles (MPa)	Résistance en traction d'une plaque percée  MPa (Section percée)	Tenue en fatigue après 107 Cycles d'une plaque percée  MPa (Section percée)
Composite carbone isotrope ⁽¹⁾	450	~ 400	~ 250	~ 200
Alliage Aluminium	450	~ 170	450	~ 90

La première colonne montre que la résistance du composite et celle de l'aluminium sont du même ordre de grandeur, 450 MPa. La deuxième caractérise la résistance à la fatigue : on tire toujours sur le matériau, de façon moins intense mais répétée 107 fois. Le composite casse à 400 MPa et l'aluminium s'effondre à 170 MPa. Les deux autres colonnes répètent ces tests avec une plaque percée d'un trou (ce qui est représentatif des situations réelles où l'on utilise des rivets pour l'assemblage). En statique, le composite perd la moitié de sa résistance mais l'aluminium la conserve. En fatigue, au contraire, le composite gagne de très loin par rapport à l'aluminium.

Ceci illustre bien pourquoi l'utilisation de matériaux composites progressivement remplace celle de matériaux métalliques. C'est vrai en particulier dans le sport et dans l'aéronautique, mais la tendance est également avérée dans l'industrie en général. Et les progrès dans les formulations et les performances des matériaux composites ne sont pas prêts de s'arrêter avec la perspective, par exemple, de matériaux auto-cicatrisants, la mise au point et l'utilisation de matériaux nanostructurés et toutes les innovations encore en gestation dans les laboratoires des chimistes.

Tableau 2

Les composites en aéronautique. Intérêts et inconvénients pour le constructeur.

⁽¹⁾Une plaque composite carbone isotrope possède des fibres tous les 45°. Sa rigidité et sa résistance sont donc excellentes dans toutes les directions (c'est le principe même de l'isotropie).

Crédits photographiques

Fig. 17 : Doc. R. Willinger.

Fig. 21 : Doc. EADS J. Cinquin.

Tableau 2 : doc. EADS
J. Cinquin.