

# Performance d'un ski de course :

## structure composite et glisse sur neige

*Nicolas Puget est ingénieur matériaux composites, responsable du développement de matériel de course, de la recherche avancée et de l'innovation des matériaux de course du groupe Rossignol.*

Ce chapitre sur les performances d'un ski de course met en évidence les relations entre la nature des différents matériaux composites utilisés pour sa fabrication, la technicité de leur assemblage, et le comportement obtenu dont la glisse sur neige. Nous verrons que les difficultés technologiques à résoudre pour élaborer ces structures composites font appel à une large partie des thèmes abordés dans trois autres chapitres de cet ouvrage : sur les matériaux composites pour le sport ([Y. Rémond et J.-F. Caron](#)), les apports de la chimie pour le confort et les performances ([F. Roland](#)) et sur les revêtements complexes antifriction ([C. Lory](#)).

De nombreux champions de ski utilisent le matériel que

nous allons décrire ([Figure 1](#)). On compte parmi eux une partie de l'équipe de France présente aux Jeux olympiques d'hiver à Vancouver en 2010, avec notamment les belles médailles obtenues dans les épreuves de Biathlon par Marie-Laure Brunet et Martin Fourcade. Jean-Baptiste Grange, blessé dès le début de saison, n'a pas pu participer aux Jeux olympiques, mais il avait brillamment remporté le Globe de slalom en 2009. Viennent ensuite Julien Lizeroux, deuxième du classement mondial de slalom en 2010 ; Didier Defago, champion olympique de descente à Vancouver ; Ted Ligety, l'Américain qui a encore dominé cette saison la discipline du slalom géant, et enfin Vincent Vittoz qui a brillamment réussi en début de saison 2010.

### 1 Les matériaux composites pour le ski

Comme l'illustre l'ouvrage *La chimie et le sport*, de nombreux

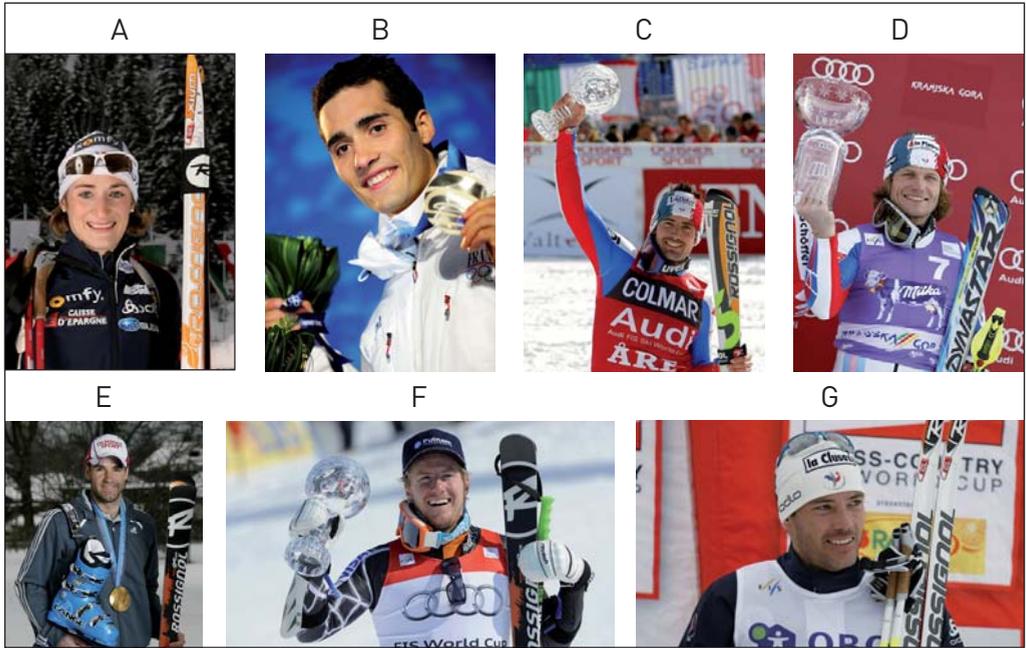
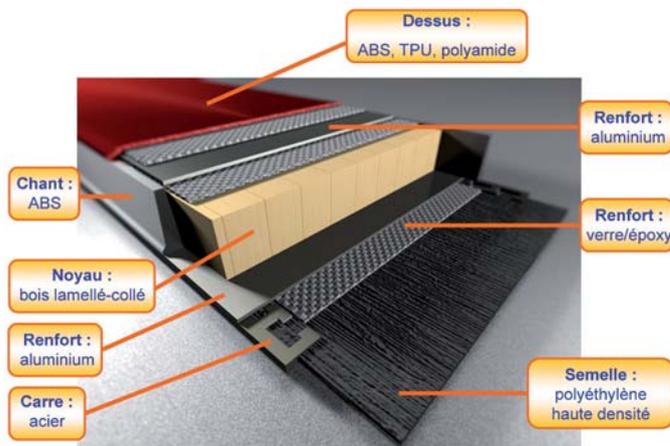


Figure 1

De nombreux champions utilisent des skis en matériaux composites élaborés pour favoriser les performances et la qualité de glisse sur neige : A) Marie-Laure Brunet (France), B) Martin Fourcade (France), C) Jean-Baptiste Grange (France), D) Julien Lizeroux (France), E) Didier Defago (Suisse), F) Ted Ligety (États-Unis), G) Vincent Vittoz (France).

Figure 2

Vue éclatée des couches d'un ski. Les skis peuvent être assimilés à des poutres hétérogènes, constituées d'un assemblage collé d'une dizaine de couches de natures différentes.



équipements sportifs sont constitués de matériaux composites<sup>56</sup> (raquettes de tennis, perche de saut, textiles pour vêtements sportifs, etc.). Quels sont ceux utilisés pour les skis ?

### 1.1. Le ski : une poutre hétérogène, un composite à lui seul

Un ski peut être décrit comme une poutre hétérogène, constituée d'un assemblage collé d'une dizaine de couches de natures différentes (Figure 2) :

- la **semelle**, l'élément en contact avec la neige : elle est en polyéthylène haute densité (PEhd), appelé aussi polyéthylène ultra haut poids moléculaire (PE uhmw) ;
- des **carres** en acier : la dureté de ce matériau permet au ski de résister à l'abrasion

56. La définition des matériaux composites est donnée dans le [Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron](#).

de la neige et aux rayures dues aux pierres ; sa limite élastique contribue à la tenue du ski aux grandes déformations, et leur affutage permet l'accroche du ski sur la glace ;

- au-dessus de la semelle, une **couche de composite** avec un renfort verre/époxy ; ce stratifié verre/époxy, déjà décrit dans le [Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron](#), est le matériau composite par excellence (plus largement utilisé que les fibres de carbone), pour répondre au problème des grandes déformations mécaniques que rencontre le ski pendant son utilisation ;

- dans les skis de compétition, on trouve un **noyau en bois**, car le bois est un formidable matériau composite naturel (microfibres de cellulose, matrice<sup>57</sup> de lignine, décrits dans le [Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron](#)). La technique des lamellés-collés permet d'orienter les fibres de ce composite pour mécaniser et apporter des bénéfices en performance par rapport à des âmes en mousse type polyuréthane ou autres qui ne possèdent pas les mêmes qualités de nervosité et de transmission des appuis ;

- des **renforts** en alliages d'aluminium associés aux renforts verre/époxy pour constituer des structures « fibro-métal ». Ces alliages entrent largement dans la composition de nos skis pour leurs caractéristiques isotropes<sup>58</sup> et leur comportement vibratoire ;

- les zones de **transmission** : ce sont des parois verticales appelées chants, qui peuvent être en ABS<sup>59</sup> ou en matières phénoliques ;

- la **couche thermoplastique** de décoration : elle joue également un rôle de protection (coups et rayures, tenue aux UV), qui est dans le cas présent une bicouche ABS et polyuréthane (ABS+TPU).

Avec le collage de l'ensemble de ces matériaux, le ski lui-même devient un composite complexe !

## 1.2. Les constituants du ski, un composite de haute performance

### 1.2.1. La résine époxy

Cette résine **thermodurcissable** est largement utilisée dans l'intégralité de nos skis, qu'ils soient alpins ou nordiques (ski de fond ou saut à ski), sans oublier le snowboard (décrit dans le [Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron](#)). La résine est issue de la polymérisation du diglycidyléther du bisphénol A (DGEBA), lui-même obtenu par la réaction du bisphénol A avec l'épichlorohydrine ; ce DGEBA est ensuite mélangé à un durcisseur qui déclenche la polymérisation et conduit à une colle dont une des références commerciales est appelée Araldite® ([Figure 3](#)).

physiques d'un milieu dans toutes les directions.

59. ABS = Acrylonitrile Butadiène Styène : c'est un copolymère polyphasé constitué d'un copolymère acrylonitrile et styrène, avec des nodules de butadiène noyés dans la matrice acrylonitrile/styrène. Le polybutadiène apporte de la résistance aux chocs et assouplit le polystyrène-acrylonitrile.

57. Matrice : terme utilisé pour décrire l'ensemble de l'environnement chimique d'un objet.

58. L'isotropie caractérise l'invariance des propriétés

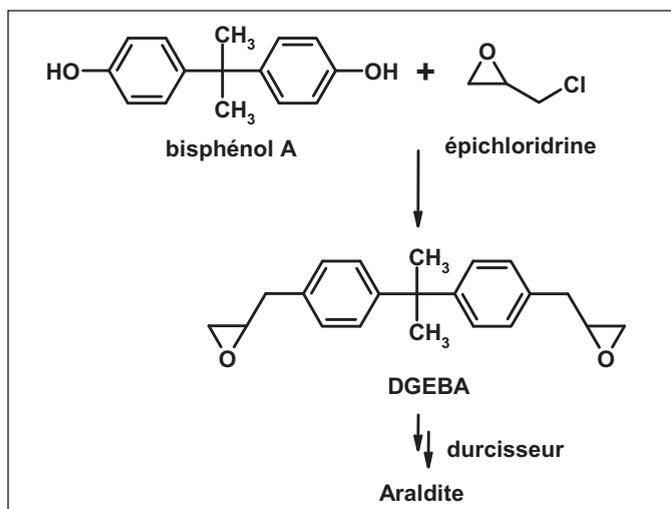


Figure 3

Une résine époxy comme l'Araldite® résulte de polymérisation du DGEBA, issu de la réaction du bisphénol A avec l'épichlorhydrine, molécule qui appartient à la famille des époxydes (d'où le nom « résine époxy »).

Figure 4

Les fibres de verre entrent dans la composition de nombreux matériaux, notamment dans le sport : perches d'athlétisme, skis, planches de surf, etc.



Pour les applications au ski, cette résine possède surtout les avantages suivants :

- un bon collage des métaux et des polymères, notamment ceux à faible tension de surface (notion expliquée dans le [Chapitre de P. Letellier](#)) comme le polypropylène ou le polyéthylène. Cette propriété est importante car ces polymères, pris isolément, sont difficiles à coller ;

- un faible retrait après polymérisation : la stabilité dimensionnelle des nos produits est très importante : les lignes de cotes des skis sont réglées à quelques dixièmes de millimètres et la conformité géométrique est évidemment un critère de qualité et donc de performance à la sortie de nos moules de fabrication ;

- de bonnes caractéristiques mécaniques : le cisaillement et la limite élastique élevés de la résine époxy (voir la [Figure 9](#)) permettent de générer de très bonnes caractéristiques mécaniques sur le composite final.

### 1.2.2. La fibre de verre

La fibre de verre ([Figure 4](#)) est un filament de verre pouvant renforcer de nombreux matériaux composites largement utilisés aujourd'hui. On utilise la fibre de verre E, différente des fibres de verre utilisées dans l'aéronautique (verre R ou verre S). Les composants chimiques de la fibre de verre E sont entre autres : la silice ( $\text{SiO}_2$ ), l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), la chaux ( $\text{CaO}$ ), la magnésie ( $\text{MgO}$ ) et l'oxyde de bore ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ). Le mélange est fondu dans un four à 1 500 °C puis passe à travers une filière. Les fibres obtenues sont traitées dans une opération importante appelée l'*ensimage*, un traitement de surface destiné à faciliter les opérations ultérieures de transformation ou de mise en œuvre (voir l'[En-cart](#) : « *L'ensimage, un traitement de surface pour une meilleure cohésion* »). On en montrera par la suite toute l'importance pour l'interface fibre/matrice et ses conséquences. Puis les fibres sont tissées pour optimiser les grammages (la densité), ce qui a une incidence sur le poids final et permet aussi d'optimiser les orientations des fibres afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques en flexion et torsion ([Figure 5](#)).

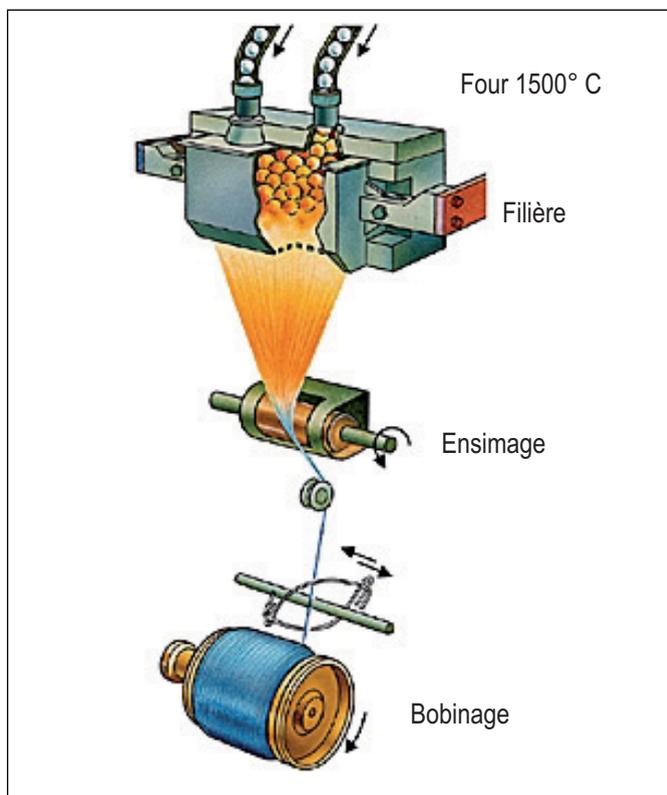
### 1.2.3. Les rôles des résines époxy mises en œuvre dans la fabrication des skis

La résine époxy a deux fonctions dans le ski. La première est d'**imprégner** et de **stratifier** les fibres de verre pour constituer le composite verre/époxy ([Figure 6](#)). La deuxième est de **coller** les différents composants entre eux pour assurer une bonne

cohésion dans la structure du ski. Cette phase vise à obtenir une compatibilité fibre/matrice très importante pour le composite. La **Figure 6** montre une coupe observée au microscope d'un stratifié fibres de verre/résine époxy. Le collage de ces fibres avec la résine doit être le meilleur possible et cette qualité dépend de la compatibilité de la surface des fibres avec la matrice.

Le rôle de l'ensimage évoqué précédemment (**Figure 7**) est justement d'améliorer cette compatibilité. Contrairement à l'exemple d'un matériau utilisé dans les casques de moto (voir le **Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron**) – où le but est d'affaiblir les liaisons à l'interface fibre/matrice afin de libérer de l'énergie au moment d'un choc –, ici l'objectif est inverse : le but est de créer des liaisons covalentes solides à l'interface entre la résine et la fibre, capables de résister à des déformations très importantes, à des vibrations, à des chocs, pour des températures qui peuvent aller de 0 à -30 °C. Il faut donc assurer une très bonne cohésion, une très bonne tenue de la matrice autour de la fibre. C'est la fonction des agents de pontage aminosilanes adsorbés sur la fibre lors de l'ensimage qui conduiront, par réaction chimique, à des liaisons très solides avec les résines (**Encart : « L'ensimage, un traitement de surface pour une meilleure cohésion »**).

Pour étudier de près ces caractéristiques de collage entre fibre et matrice, un test dit de **fragmentation** est réalisé en laboratoire afin de connaître la caracté-

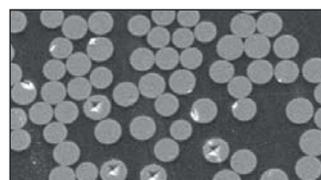


**Figure 5**

*Élaboration de fibres de verre : un mélange composé de silice, d'alumine, de chaux, de magnésie et d'oxyde de bore est fondu dans un four à 1 500 °C avant de passer à travers une filière. Après ensimage, les fibres obtenues sont tissées et optimisées selon les caractéristiques recherchées.*

**Figure 6**

*Coupe d'un stratifié verre/époxy imprégné pour assurer la cohésion des couches de matériaux composites.*



éristique d'une fibre unique imprégnée de résine. Puis on s'intéresse au composite complet en procédant à des **tests de traction** ou de **flexion** sur le tissu de fibre de verre imprégné de résine. L'application d'une traction sur cette fibre permet de caractériser des distances d'interfragments et des zones de décohésion (zones où le matériau perd de sa cohésion, **Figure 8**). Les résultats obtenus sur ces fibres élémentaires permettent ensuite de porter un pronostic sur les caractéristiques mécaniques du composite verre/époxy final, ce qui est très important pour le développement de nouveaux renforts composites (combinant soit de nouvelles fibres, soit une nouvelle matrice,

### L'ENSIMAGE, UN TRAITEMENT DE SURFACE POUR UNE MEILLEURE COHÉSION

Le rôle de l'ensimage illustre un apport de la chimie pour assurer la compatibilité des fibres de verre avec la matrice et les caractéristiques nécessaires pour des composites de hautes performances. On utilise par exemple un aminosilane, qui sert d'agent de pontage à la surface des fibres de verre (Figure 7). La fibre passe sur un rouleau (Figure 5) qui l'imprègne d'une solution d'aminosilane. Celui-ci est hydrolysé en milieu aqueux puis greffé sur la surface de la silice de la fibre via l'un des groupements hydroxyles « OH », ce qui favorisera ensuite, via les hydroxyles restants, le collage avec la résine époxy.

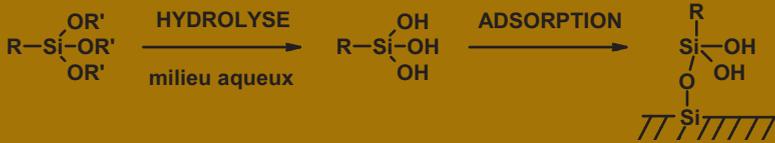


Figure 7

Un silane peut être utilisé comme agent de pontage à la surface des fibres de verre pour améliorer leur compatibilité avec la matrice avec laquelle elles vont former le matériau composite.

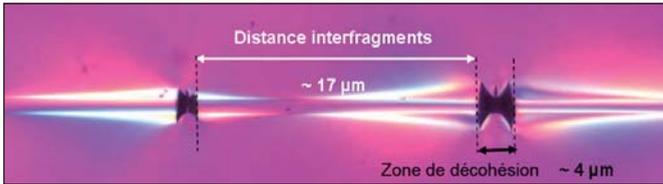
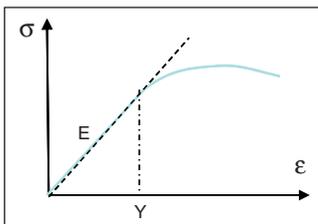


Figure 8

Lors d'un contrôle fibre-matrice, on effectue dans un premier temps un test de fragmentation sur une fibre élémentaire où sont déterminées les caractéristiques micromécaniques à l'interface fibre-matrice.

Figure 9

On applique différentes contraintes  $s$  sur une fibre de verre et l'on mesure la déformation produite  $\epsilon$ . Le tracé de la courbe de  $\sigma$  en fonction de  $\epsilon$  permet d'obtenir entre autres le module d'élasticité  $E$ , connaissant la relation :  $\sigma = E\epsilon$ , appelée loi d'élasticité de Hooke. Cette relation s'applique tant que la limite d'élasticité  $Y$  du matériau n'est pas atteinte, limite à partir de laquelle il commence à se déformer de manière irréversible, voire se rompt.



soit d'autres méthodes d'ensimage). Ainsi il est indispensable, avant de passer au stade du prototype (nouveau composite, nouveau ski) de bien appréhender ce qui se passe à l'échelle du micron pour la cohésion d'une fibre élémentaire avec la matrice.

Pour exemple, la courbe de la Figure 9 est une courbe classique de contrainte/déformation en flexion, à partir de laquelle on peut déduire les caractéristiques mécaniques du matériau.

On étudie ensuite la casse d'éprouvettes composite verre/époxy en « test de flexion trois points<sup>60</sup> » ; on obtient des modules d'élasticité sur le composite final de l'ordre de 35 000 MPa, ainsi qu'une contrainte à la rupture de l'ordre de 800 MPa. Ces valeurs sont très compétitives par rapport à l'aluminium et à sa tenue en fatigue.

La seconde fonction de la résine époxy tient à son rôle d'adhésion. Les différentes couches qui composent le ski

60. Un test de flexion trois points est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion d'un objet (la flexion est la déformation qui se traduit par une courbure) : au cours de ce test, on applique une force au centre de la fibre posée sur deux appuis.

comportent des matériaux de natures très différentes qu'il faut pouvoir coller entre eux pour toute la durée de vie du produit (mélange de polymères, d'alliages aluminium, de fibres de verre, de bois ou de polyuréthane pour le noyau) (Figure 10). Il ne s'agit pas seulement de coller la semelle, le noyau et les carres pour une durée limitée ; l'ensemble doit tenir fermement à la structure car la perte ou la dégradation d'une seule interface de collage, dégrade rapidement et complètement la rigidité et donc la robustesse du produit.

L'un des autres moyens chimiques utilisé pour améliorer l'adhésion entre la résine époxy et les différentes couches de matériaux est le **traitement de surface**. Dans le cas de l'aluminium, matière largement utilisée dans nos skis, nous avons recours à l'« anodisation », qui va permettre de coller directement ce composant avec la résine. Ce traitement consiste à former électrochimiquement une couche superficielle d'oxyde d'aluminium : au cours d'un procédé industriel d'électrolyse, on forme une couche de cent microns, constituée de structures hexagonales poreuses d'alumine qui constituent une accroche mécanique pour la colle et qui conduisent à de très bonnes valeurs de collage (Figure 11).

#### 1.2.4. Les autres traitements de surface

D'autres traitements de surface peuvent aussi être mis en œuvre selon les éléments constitutifs du ski. Par exemple les carres en

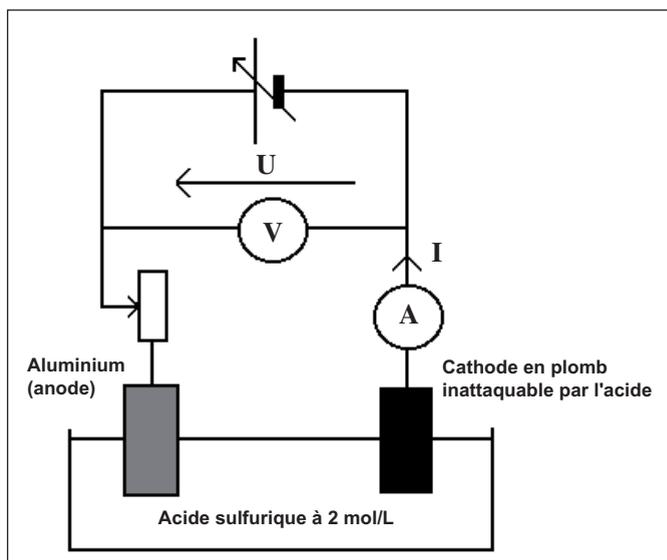
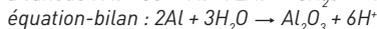
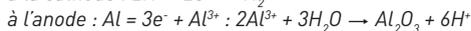
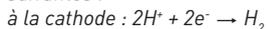


Figure 10

Ces coupes transversales de ski montrent plusieurs matériaux collés entre eux (polymères **thermoplastiques** et **thermodurcissables**, bois, matériaux alvéolaires, alliages métalliques, laques et encres).

Figure 11

Les pièces sont renforcées par un alliage d'aluminium grâce à un traitement de surface appelé anodisation. Dans une cuve d'électrolyte remplie d'acide sulfurique, la pièce est à l'anode, tandis que la cathode est généralement du plomb. Les réactions d'électrolyse qui ont lieu sont les suivantes :



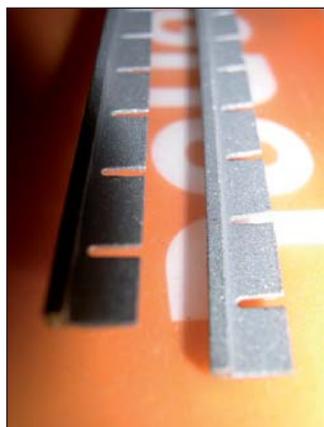


Figure 12

L'opération de sablage apporte une rugosité importante aux carres en acier.

Figure 13

L'utilisation des skis (skis alpins, skis nordiques, ou snowboard) implique des conditions aux limites sévères – grands déplacements, contraintes élevées (températures comprises entre 0 °C et -30 °C)... – qui ne doivent pas mener l'assemblage à la rupture.



acier sont sablés<sup>61</sup> : on voit sur la **Figure 12** l'importance de la rugosité apportée à ce composant en acier par cette opération de sablage. Sans ce traitement, il serait difficile d'y coller un morceau de polyéthylène. Notons que les traces de ce sablage assez prononcé seront ensuite complètement éliminées par polissage des deux facettes extérieures des carres pendant la phase de finition des skis.

On doit aussi mettre en œuvre une opération de ponçage et de flammage<sup>62</sup> du polyéthylène haute densité de la semelle pour nettoyer la surface et lui permettre d'acquiescer des points d'ancrage pour les adhésifs qui lui seront présentés ultérieurement. C'est une opération industrielle assez élémentaire, mais sans laquelle nous ne pourrions pas coller solidement tous les morceaux

61. Le sablage est une technique industrielle de nettoyage des surfaces, utilisant un abrasif projeté à grande vitesse à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse sur le matériau à décaper.

62. Le flammage est une exposition à une flamme oxydante générée par la combustion d'un hydrocarbure, afin d'introduire des fonctions polaires dans les molécules à la surface du matériau et interagir avec les fonctions présentes dans les adhésifs.

qui composent un ski (voir **Figure 15**).

### 1.3. Efforts et déformations appliqués aux skis

L'intérêt de la qualité des collages et des matériaux mis en œuvre dans la fabrication des skis est lié aux contraintes mécaniques extrêmes qui leur sont imposées. Quelques photos permettent d'imaginer l'amplitude des déformations que subissent les skis dans leurs conditions habituelles, normales, d'utilisation en compétition (**Figure 13**) ; ils ne s'agit pas ici de cas de chutes pour lesquels les skis auraient à résister à des déformations et des efforts mécaniques bien plus importants encore. La sévérité des conditions aux limites imposées au matériel impliquent une parfaite maîtrise des paramètres de conception (dimensionnement du ski) et des contrôles réguliers des composants pour maîtriser la qualité. En effet, les performances mécaniques des matériaux utilisés sont contrôlées sur éprouvettes en laboratoire, et également à l'aide de tests destructifs sur ski. Citons les tests de casse en flexion trois points qui permettent de vérifier les valeurs de rupture et de délaminage.

Sur la **Figure 13A**, le skieur réceptionne un saut légèrement sur les talons des skis : ces conditions aux limites sont reproduites dans le test de la **Figure 14**. Le ski doit être capable de supporter une déformation importante sans casser. Pour des skis de compétition, on a pu atteindre une flèche maximale de 120 mm sous un effort d'une tonne sans que le ski ne casse.

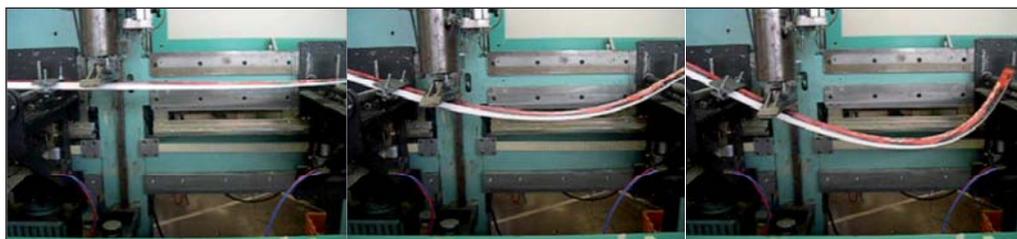


Figure 14

Au cours d'un test, une flèche exerce une pression sur un ski pour évaluer sa résistance.

Voilà ainsi démontré le lien entre une forte cohésion de la matrice avec ses fibres, de bonnes interfaces de collage, et l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées sur le produit final. Ces performances illustrent ce que la chimie appliquée aux matériaux composites permet de réaliser dans le cas d'un ski.

Après avoir évoqué les relations entre la nature des matériaux composites et les propriétés mécaniques d'un ski, intéressons-nous maintenant à la glisse et aux matériaux et/ou aux traitements qui vont la favoriser.

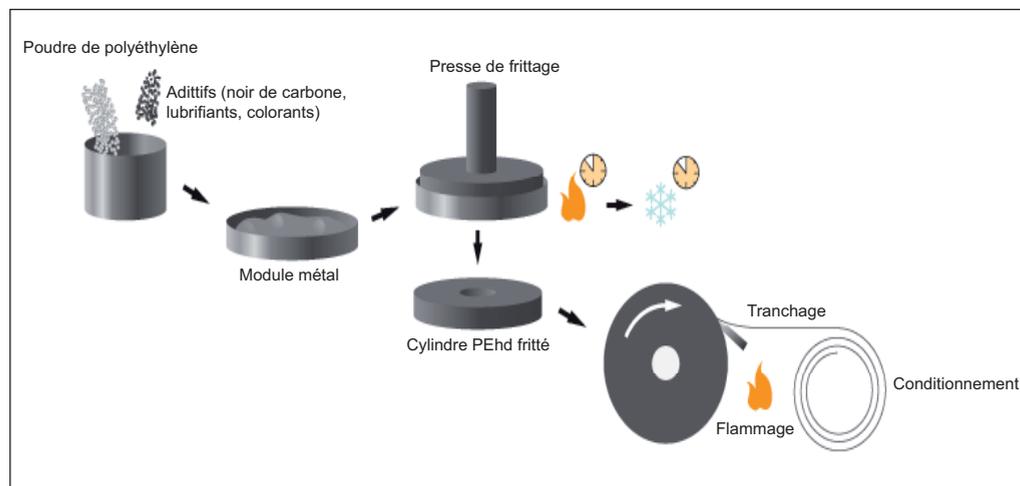
## 2 La glisse

Une paire de ski alpin glisse à des vitesses de l'ordre de

20 à 40 m/s ; la glisse s'opère à l'interface de la semelle et de la neige. Les vitesses de déplacements sont très importantes, le régime est donc transitoire : c'est une succession de chocs, d'accélération ; l'interface de glisse ne rencontre jamais de conditions stables et continues. En fait, le ski ne glisse pas directement sur la neige mais sur un film d'eau créé entre la semelle et la neige. Le phénomène est complexe car il combine des paramètres très variables entre le skieur, le matériel et son environnement : le skieur possède des qualités intrinsèques de glisse variables selon les individus tels que son poids, sa position aérodynamique, ainsi que l'aptitude à doser le relâchement musculaire dans un effort intense. Le

Figure 15

Frittage et flammage d'une semelle en polyéthylène.



matériel – skis, combinaisons, casques et bâtons – fait l’objet de nombreuses études, et plus précisément pour le ski, la tribologie<sup>63</sup> des surfaces, la physico-chimie des surfaces, la chimie des matériaux pour les semelles, le dimensionnement et le comportement vibratoire de la structure, et la nivologie<sup>64</sup> : en effet, les cristaux de neige évoluent selon le site, le jour, les conditions d’hygrométrie ou d’ensoleillement... Toutes ces conditions modifient en permanence le matériau neige qui est en soi un matériau très complexe ! Ceci rend alors particulièrement difficile l’optimisation

63. La tribologie (du grec *tribein* = frotter et *logos* = étude) désigne la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements relatifs. Il recouvre, entre autres, tous les domaines du frottement, de l’usure et de la lubrification.

64. La nivologie est l’étude des caractéristiques de la neige et des couches neigeuses, s’appuyant sur des mesures et modèles spécifiques et menée tant à des fins de recherche scientifique que dans des buts pratiques, de sécurité notamment (prévision et prévention des avalanches).

de la performance de glisse des skis.

## 2.1. La glisse et le matériau des semelles

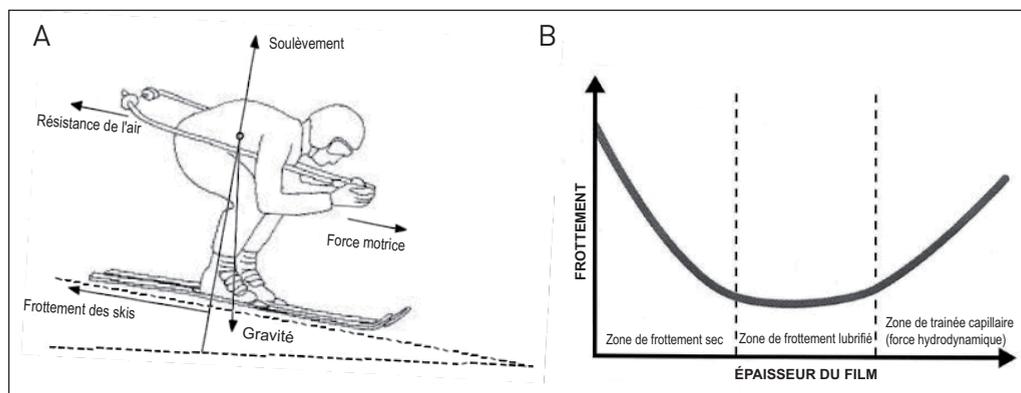
Le procédé de fabrication des semelles de skis de compétition utilise principalement des polyéthylènes ultra haut poids moléculaire obtenus par le procédé de frittage de poudre<sup>65</sup>. Ces fines poudres sont pressées au cours d’un cycle de température : on monte en température puis l’on refroidit afin de densifier ces poudres ; on obtient alors des polymères de très hauts poids moléculaires, nécessaires pour assurer de bonnes caractéristiques de glisse. On termine par des opérations de tranchage, ponçage et flammage, indispensable nous l’avons vu, au collage des semelles sur les skis (*Figure 15*).

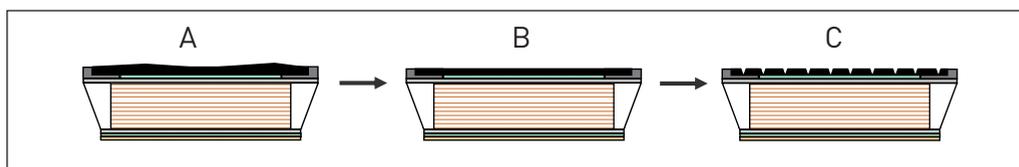
Le graphique de la *Figure 16B* illustre l’évolution du frottement en fonction de l’épaisseur du film d’eau sous le ski.

65. Le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu’à la fusion. Sous l’effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui assure la cohésion de la pièce.

Figure 16

A) Frottements d’un ski sur la neige. B) Représentation schématique de la courbe de « Strybeck » mettant en évidence les régimes de lubrification des frottements d’un ski sur la neige.





**Figure 17**

*Les semelles en polyéthylène fritté sont aujourd'hui les plus performantes et utilisées par tous les départements de compétition. A) Les semelles sont successivement ponçées pour obtenir une surface parfaitement plane. B) Une opération de polissage est réalisée pour obtenir une surface lisse. C) Une dernière étape de structuration (microrugosités) permet d'optimiser la surface à rugosité adaptée selon les types de neige.*

Les conditions optimales pour obtenir les meilleurs résultats de glisse se situent au milieu du graphique : cela signifie qu'il faut créer et entretenir une interface entre la semelle et la neige qui soit un mélange de cristaux de neige, d'eau et d'air afin que les frottements soient minimums. Cette zone, dite de *frottements lubrifiés*, constitue l'interface qui permet d'obtenir les meilleures conditions de glisse. Sur la gauche du graphique, la zone est dite de *frottements secs* : l'abrasion augmente et les résultats de glisse avec le même matériel sont nettement moins bons sur une neige dite « sèche ». Sur la droite du graphique, le film d'eau est trop important, beaucoup plus épais. C'est quasiment une situation d'aquaplaning et le phénomène de succion apparaît et freine les skis, ce phénomène ajoute des frottements supplémentaires à l'avancement du ski sur la neige.

Dix facteurs influent sur les frottements sur la neige. Certains dépendent de la mise en œuvre du ski :

1- En plus de la charge appliquée (poids du skieur), il convient de prendre en considération la répartition des pressions qui détermine la manière dont le matériel va appliquer la pression sur la neige (cette pression peut être ponctuelle ou au contraire bien étalée sur la longueur).

2- Les formes et élasticités de la surface de glisse (qui prennent en compte les rigidités et les géométries des skis).

3- Les matériaux de semelle évoqués précédemment.

4- La texture de semelle que nous allons observer par la suite.

D'autres facteurs dépendent de la météo :

5- La compressibilité de la neige.

6- Les taux d'humidité.

7- La densité de la neige.

8- La dureté des cristaux.

9- La taille et la forme des cristaux.

10- La vitesse de glisse.

## 2.2. La glisse et la texture des semelles

Lorsqu'un ski sort de son moule de fabrication, il n'est pas parfaitement plat : on observe sur la première structure renversée (**Figure 17A**, avec la semelle qui regarde vers le ciel), un défaut de planéité volontairement exagéré sur le dessin. Pour corriger ce défaut de planéité, la semelle subit plusieurs ponçages et polissages (**Figure 17B**) ; une rectitude géométrique est obtenue, et les carres en acier sont alors dans le plan de la semelle. La semelle devient parfaitement plane et polie. Mais cet état de surface sur la neige se retrouverait en situation d'aquaplaning (la partie droite du graphique de la **Figure 16**) avec un film d'eau accumulé

sous la surface de glisse et l'apparition d'un phénomène de succion empêchant la glisse. C'est la raison pour laquelle une fois l'étape de polissage terminée, on réalise une opération de structuration, à l'image de ce qui est fait sur les pneumatiques, mais en utilisant des ponceuses à contrôle numérique pour générer des microrugosités orientées (Figure 17C). Ces microrugosités permettent d'optimiser la surface : la surface obtenue est anisotrope<sup>66</sup> : elle est orientée dans le sens de la glisse afin de générer et évacuer ce film d'eau lors du déplacement du skieur. Les paramètres et motifs de structuration varient pour s'adapter aux différents types de neige<sup>67</sup>.

### 2.2.1. Différents types de neige

La première difficulté est de caractériser les types de neige. Ils sont très nombreux, les différentes formes de cristaux sont bien répertoriées et classées. La difficulté réside dans la variation de ce matériau neige : les cristaux évoluent d'un stade à un autre, du jour au lendemain, entre le haut et le bas de la piste, et selon l'exposition de la piste,... Ce sont donc des paramètres supplémentaires

à prendre en compte et qui poussent aujourd'hui à privilégier la mise au point de semelles polyvalentes. L'objectif est non seulement de mettre au point le matériel le plus adapté possible sur l'ensemble d'un tracé mais également sur l'ensemble d'une saison. En effet, les neiges d'Amérique du Nord, d'Europe, de Scandinavie, d'Asie... ont toutes leurs spécificités liées aux climats de ces zones (température, hygrométrie, ensoleillement...).

### 2.2.2. Différents types de structuration

Les structurations apportées aux semelles des skis permettent à la fois de générer, d'entretenir et d'évacuer le film d'eau afin de rester dans la zone optimale du graphique de la Figure 16, où les frottements sont moindres. Le principe reste le même pour préparer la semelle d'un ski de fond. Une différence élémentaire est que sa surface de glisse ne possède pas de carres, et qu'une grosse rainure centrale permet d'évacuer l'eau et de donner un aspect directionnel et guidant au ski. Les micro-sillons de la structuration sont plus fins et plus resserrés car les vitesses sont nettement inférieures à celles atteintes en ski alpin.

Les micro-topographies sont réalisées au laboratoire afin de caractériser, par des paramètres de rugosité, les différents états de surface. Les structurations sont réalisées par des ponceuses numériques qui assurent la reproductibilité des motifs. La nature des meules, la géométrie des diamants utilisés,

66. L'anisotropie est le contraire de l'istropie (voir note 58).

67. Cette structuration est réalisée en usine, cet état de surface est donc figé pour une paire de ski. Ce qui implique en compétition, à l'image des pneumatiques dans les sports mécaniques, de disposer de plusieurs paires de skis avec des structurations de semelles typées pour différentes conditions de neige.

ainsi que les paramètres de rotation et de profondeur de ces motifs, font l'objet de plans d'expériences afin d'optimiser la performance en glisse des microrugosités obtenues.

### 2.3. Le traitement de la surface de glisse

Le matériau polyéthylène est déjà un matériau hydrophobe à faible tension interfaciale (au sujet de la tension interfaciale, voir le [Chapitre de P. Letellier](#)) et les microrugosités augmentent elles aussi la capillarité (effet « lotus ») de la semelle. Les farts ont pour objectif d'entretenir et d'augmenter le caractère hydrophobe de la semelle dans toutes les conditions de neige. Ces produits d'entretien et de traitement de surface de la semelle sont des bases de paraffine : on trouve principalement des hydrocarbures et quelques fluorocarbures, car le fluor améliore le caractère hydrophobe. Ces caractéristiques peuvent être mises en évidence grâce à un test de mouillabilité dynamique. La [Figure 18](#) représente une goutte d'eau qui glisse sur un plan incliné. Cette goutte est déposée sur la semelle, dans un premier temps à plat, on attend l'établissement de l'équilibre puis la semelle est progressivement inclinée afin d'observer et de mesurer l'angle critique de décrochage, l'angle au retrait et l'angle à l'avancée. La différence entre l'angle à l'avancée et l'angle au retrait constitue le « hystérésis de mouillabilité<sup>68</sup> », qui

caractérise l'hydrophobie des semelles. Malheureusement, pour l'ensemble des raisons évoquées plus haut, le phénomène de glisse reste extrêmement complexe, et les performances de glisse d'un ski mesurées sur neige ne sont pas directement corrélées aux résultats obtenus dans les travaux précédemment cités. C'est la raison pour laquelle aucun fabricant aujourd'hui ne dispose d'une machine ou simulateur permettant de reproduire la glisse d'un ski en laboratoire, et que nous ne pouvons pas nous passer de l'expérience sur le terrain.

Ces tests de glisse suivent un protocole très précis. Tous les skieurs (anciens compétiteurs) sont munis d'une combinaison de compétition normalisée et doivent adopter et reproduire la même position sur l'ensemble des prototypes testés afin de bloquer l'influence des paramètres tels que la perméabilité à l'air du textile, l'aérodynamisme du skieur, etc. Des plans d'expérience de semelles sont alors réalisés dans divers lieux (différents paramètres matériaux, structures, farts) afin d'identifier les meilleures paires de skis, et établir par la suite, les plans de production des skis à fournir aux athlètes.

pare-brises des automobiles. Une fois que l'eau a mouillé le verre, il est difficile de l'essuyer. En revanche, si le pare-brise a reçu un traitement spécifique, l'eau de pluie sera essuyée avec succès. Les angles à l'avancée et au retrait sont les deux valeurs caractérisant l'hystérésis de mouillage d'une surface.

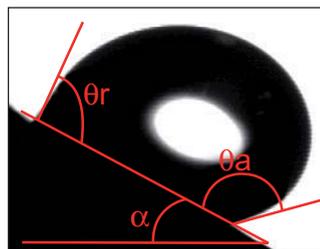


Figure 18

Au cours du test de mouillabilité dynamique, on mesure trois angles : l'angle d'avancée  $\theta_a$ , l'angle au retrait  $\theta_r$  et l'angle critique de décrochement  $\alpha$ .

68. Un exemple typique d'hystérésis de mouillabilité est donné par le fonctionnement des essuie-glaces qui laissent un film d'eau très fin sur les

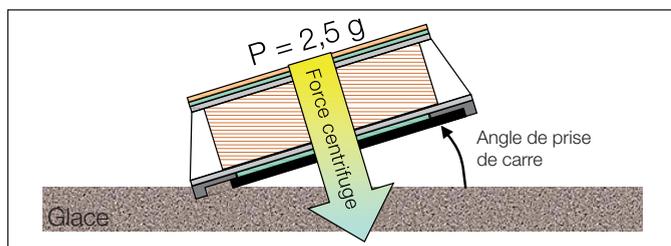
## 2.4. La glisse et l'abrasion des semelles

### 2.4.1. Conditions de glisse

Dans la discipline de descente sur le circuit de la Coupe du monde, les skieurs évoluent depuis plusieurs années sur un mélange de neige et de glace (neige glacée après injection d'eau). Pour le grand public, c'est donc une situation de « patinoire » inclinée... mais cette préparation de piste est préconisée par les règlements de la Fédération Internationale de Ski afin de préserver l'équité des chances pour tous les participants. Du premier au dernier dossard, l'organisation de la course doit en effet s'assurer que le support de la piste reste le plus dur possible pour ne pas se dégrader au fur et à mesure des passages des différents concurrents. Les conséquences en sont très concrètes sur le matériel, les semelles étaient jusqu'à présent mises au point pour glisser sur la neige, elles doivent désormais résister aussi à l'abrasion de la glace.

Figure 19

*Il est important de tester la résistance des skis à l'abrasion afin de s'assurer qu'ils supporteront les fortes pressions exercées par le skieur sur les carres et la semelle, notamment du fait de grandes vitesses et de nombreux virages, et surtout s'il se trouve sur une piste en neige artificielle injectée d'eau. De récents travaux sur les poids moléculaires et les additifs du polyéthylène ont permis d'augmenter cette résistance à l'abrasion.*



### 2.4.2. Résistance à l'abrasion

Le schéma de la **Figure 19** représente la prise de carre du ski : lorsque le coureur entre en virage et qu'il se déplace à une vitesse de l'ordre de 25 m/s (soit 100 km/h), la force centrifuge peut alors atteindre 2,5 grammes (2,5 fois l'accélération de la gravité terrestre) dans la courbe. Prenons l'exemple d'un descendeur qui pèse 100 kg : 250 kg de pression verticale seront directement appliqués sur le ski, sur une surface extrêmement réduite (la carre ne pose pas de problème car elle est extrêmement dure et résiste à l'abrasion). En revanche, les quelques millimètres de largeur de polyéthylène au contact de la neige sont fortement soumis à l'abrasion par la glace. Le skieur génère donc une usure de la semelle, notamment sous le pied où les pressions sont maximales. Il se forme progressivement une cavité longitudinale, la planéité du ski est dégradée et le skieur se retrouve dans une situation délicate car son ski devient plus difficile à contrôler (effet de « rail »). Des plans d'expériences ont été menés et des matériaux qui résistent à ces fortes abrasions ont ainsi pu être mis au point. Ils sont toujours à base de polyéthylène, mais associent des astuces d'élaboration et de composition afin d'obtenir le matériau adéquat.

## Conclusion

Nous venons d'illustrer à quel point la chimie est présente dans un ski : les molécules qui interviennent dans sa fabrication sont diverses et variées, comme en témoigne la **Figure 20** qui complète la **Figure 2**.

L'évolution importante qu'ont connue les skis ces dernières décennies est donc très fortement liée aux apports de la chimie et de la physico-chimie des matériaux et des surfaces. Les nouvelles planches de glisse, la quête permanente de la meilleure performance, posent toujours de nouveaux défis dans lesquels les chimistes auront encore un grand rôle à tenir, pour que plaisir, sécurité et performance puissent être harmonieusement associés.

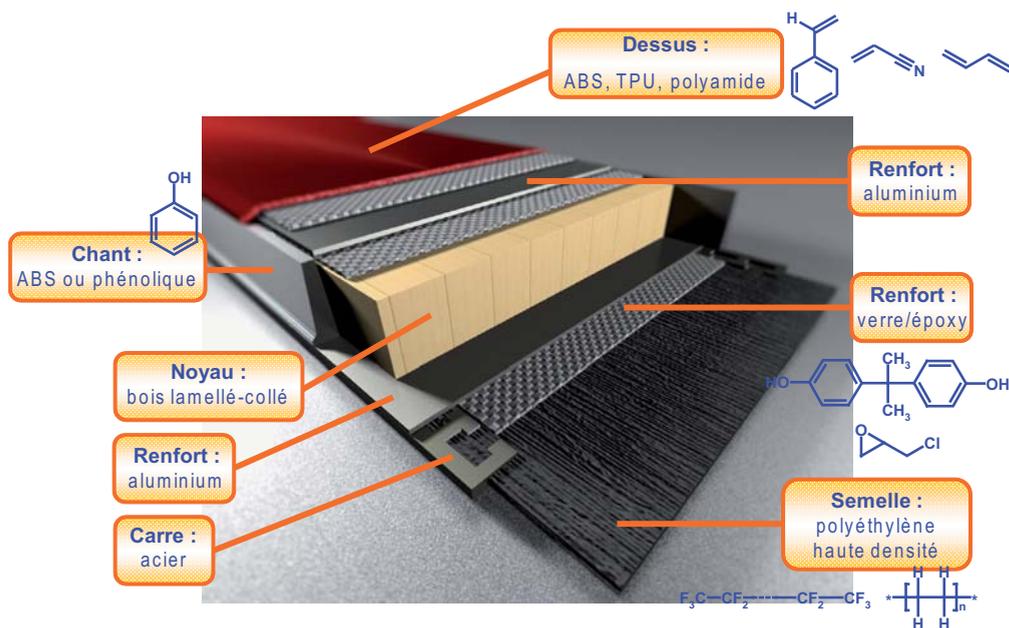


Figure 20

Résumé des couches qui constituent un ski. De manière discrète pour le grand public, mais d'une grande efficacité pour l'industrie : l'évolution technique des skis ces dernières décennies est fortement liée aux nombreux apports de la chimie dans la science des matériaux.

# Crédits photographiques

Fig.1:AgenceZOOMskieurs :A) Marie-Laure Brunet (France), B) Martin Fourcade (France), C) Jean-Baptiste Grange (France), D) Julien Lizeroux (France), E) Didier Defago (Suisse), D) Ted Ligety (États-Unis), E) Vincent Vittoz (France).

Fig. 4 : Licence CC-NY-SA. NoiseD@de.wikipedia.

Fig. 5 : Larousse.

Fig. 13A : Agence ZOOMskieurs : A) Yannick Bertrand, B) Ted Ligety.

Fig. 14 : Skis Rossignol.