

A propos de plastiques "une petite reine" :

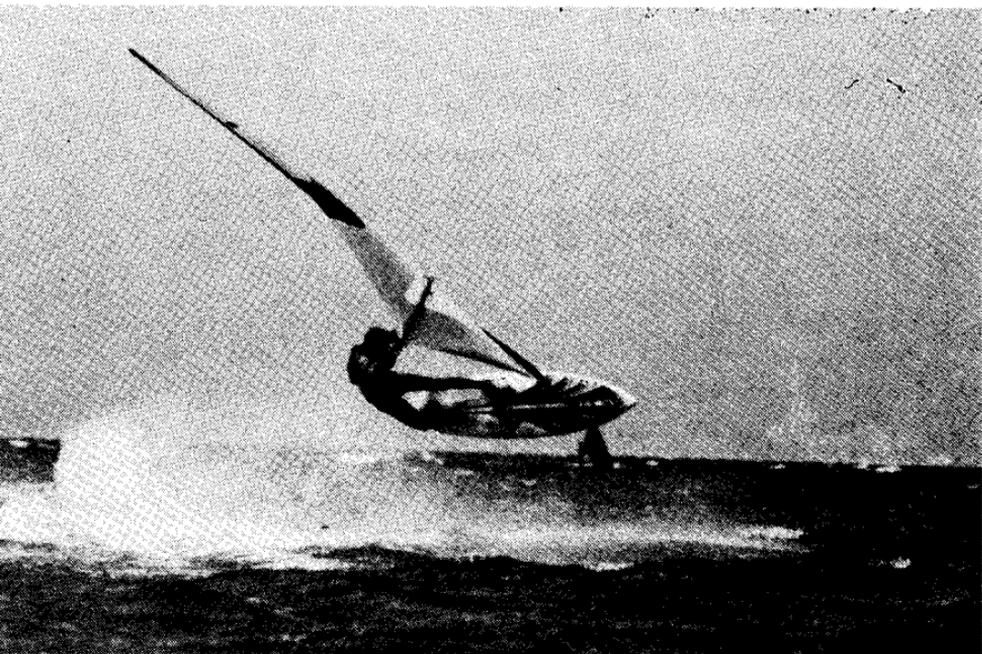
LA PLANCHE A VOILE

par Yves LEROUX,

Formation des Maîtres

(Université P.-et-M.-Curie, Paris VI).

Ce document a été réalisé à la suite de l'introduction des nouveaux programmes dans les classes de 3^e des collèges. Il existe déjà une documentation de base du C.N.D.P. concernant les matières plastiques (1). L'étude de la planche à voile permet en effet d'illustrer toute la famille des matières plastiques. Ce document a été construit à partir d'éléments obtenus auprès de divers fabricants de planches à voile, de Sociétés de l'Industrie Chimique et de périodiques spécialisés.



POURQUOI S'INTERESSER A LA PLANCHE A VOILE ?

En 1983, tout le monde connaît la planche à voile. Elle a énormément de succès auprès des jeunes. C'est un engin qui fait fureur en France et nos plages ne sont plus ce qu'elles étaient. On s'y promène en bottines et combinaison de caoutchouc.

Les Français ont acheté 80 000 planches à voile en 1981. Le parc national représente environ 350 000 planches (année 1981). En 1981, la production française s'est élevée à plus de 114 700 planches dont près de la moitié, 48 000 exactement, a été exportée (2). Le nombre des pratiquants grimpe de façon vertigineuse. La Fédération des Industries Nautiques prévoit le jour où plusieurs millions de Français sauront se tenir sur une planche. La planche à voile est depuis peu une discipline olympique et c'est sur une planche WINDGLIDER (*) (Société BIC) que se dérouleront les épreuves des Jeux de 1984 à Los Angeles.

Peut-être est-ce le premier objet navigant ne faisant appel pour chacun de ces constituants à aucun matériau d'origine naturelle. La planche à voile illustre le règne du plastique et annonce l'ère nouvelle des matériaux composites (3).

Trois millions de Français déclarent s'intéresser à la planche à voile. 24 % des pratiquants sont des professions libérales et cadres supérieurs, 18 % des patrons de l'industrie et du commerce, 15 % des cadres moyens, 15 % des autres catégories dont les étudiants, 13 % d'employés, 10 % des ouvriers et personnel de service, 5 % des agriculteurs.

Quels sont donc ces matériaux intervenant dans une planche à voile ? Afin d'être didactique, nous allons présenter les différents matériaux polymères utilisés suivant leurs procédés de synthèse (polymérisation et polycondensation). Une fois ces matériaux connus, nous décrirons les divers composants d'une planche à voile modèle. Ensuite nous répondrons à la question « comment sont-elles faites ? » Enfin dans la conclusion seront présentées les diverses tendances de la planche à voile du futur.

UN PETIT PEU D'HISTOIRE.

Cocorico ! La planche à voile est le fruit de l'imagination d'un jeune homme français de bonne famille, Martin d'ESTREAU, mort le 13 mai 1915, lors des offensives de l'Artois (4). C'est en août 1913 que cette folle invention vit le jour. On a retrouvé le « vélivole », comme l'avait baptisé Martin d'ESTREAU, intact en bel acajou de Cuba dans l'appentis d'une demeure bourgeoise

(*) Dans tout cet article, l'astérisque indique un nom commercial.



de la région de Sète. Ceci explique peut-être pourquoi les Français ont manifesté très vite une affinité particulière pour cet engin.

C'est pourtant un Américain Hoyle SCHWEITZER qui inventa véritablement la planche à voile vers 1960 sur les côtes de Californie car c'est lui qui a déposé les brevets et qui reçoit les royalties.

LES MATERIAUX.

Pratiquement tous les matériaux intervenant dans une planche à voile font appel à la famille des matières plastiques, et plus spécialement à des matériaux utilisant pour une large part des substances macromoléculaires synthétiques, par opposition aux substances macromoléculaires naturelles (cellulose, amidon, protéines, etc.), ou aux substances macromoléculaires naturelles modifiées par traitement chimique (nitrocellulose, acétate de cellulose, cuir, etc.).

Les méthodes de préparations des substances macromoléculaires synthétiques peuvent se classer en deux groupes :

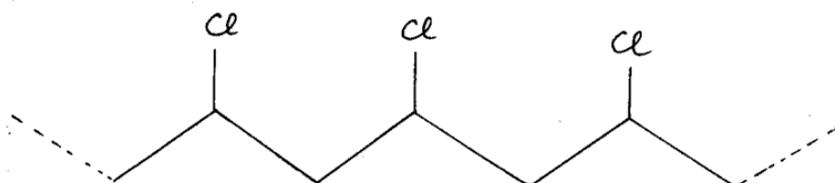
- A) Réactions de polymérisation et de copolymérisation,
- B) Réactions de polycondensation.

A) Réactions de polymérisation et de copolymérisation.

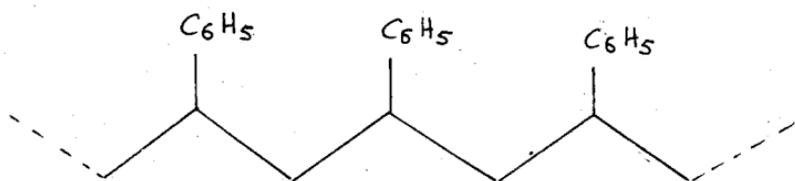
Les « micromolécules » élémentaires (appelées « monomères ») identiques ou différentes s'additionnent successivement les unes sur les autres par ouverture d'une liaison double ou d'un cycle.

C'est une réaction en chaîne et il n'y a pas élimination d'un produit de réaction.

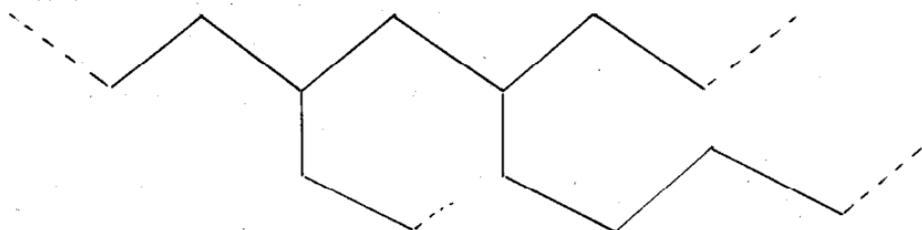
Nous ne nous intéressons ni aux mécanismes de polymérisation, ni aux techniques industrielles de polymérisation (masse, solution, suspension, émulsion) mais aux matériaux obtenus.



— *Polychlorure de vinyle* (PVC). Il se nomme Rhovyl* lorsqu'il est filé.



— *Polystyrène expansé* dans la planche à voile.



— *Polyéthylène basse densité* (PEbd) $d = 0,91$ à $0,93$ obtenu par polymérisation sous haute pression (2 500 bars) à $150-300^{\circ}\text{C}$.

Ce sont les Polythène*, Alkathène*, Lupolène*, etc.

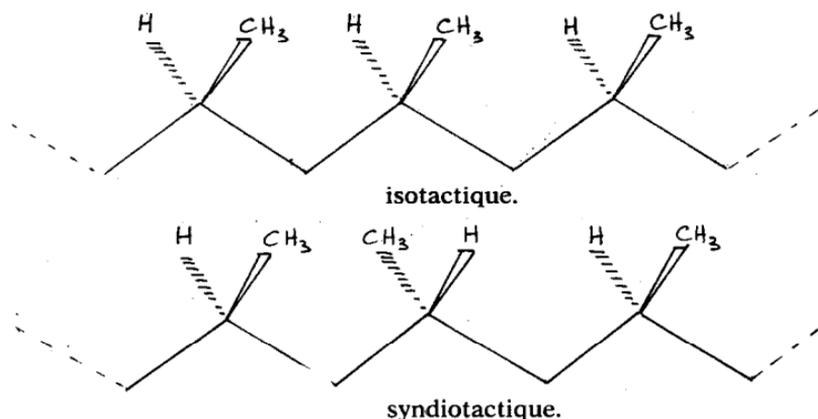


— *Polyéthylène haute densité* (PEhd) $d = 0,94$ à $0,96$ obtenu par polymérisation ZIEGLER-NATTA industrielle, c'est-à-dire sous basse pression [1 à 40 bars (**)] à $50-100^{\circ}\text{C}$.

(**) 1 bar = 10^5 pascal \simeq 1 atmosphère.

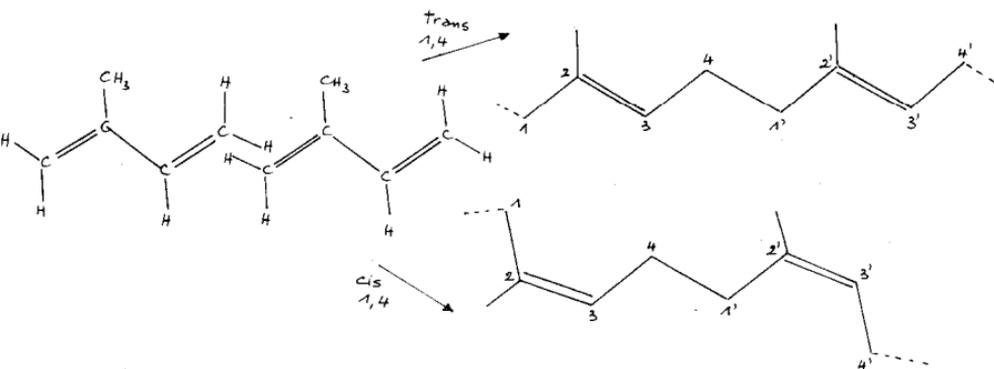
- *Polypropylène isotactique* selon ZIEGLER-NATTA. Les groupes méthyles (CH_3) du polypropylène se trouvent tous d'un même côté du plan de la chaîne. Si la distribution des CH_3 était régulièrement alternée le polymère serait syndiotactique. La distribution aléatoire des CH_3 correspond au polymère atactique. Les conséquences sur les propriétés physiques et mécaniques sont très importantes.

Le polypropylène isotactique peut être employé comme matière plastique (Moplen*) ou filé comme fibre textile (Méraklon*).



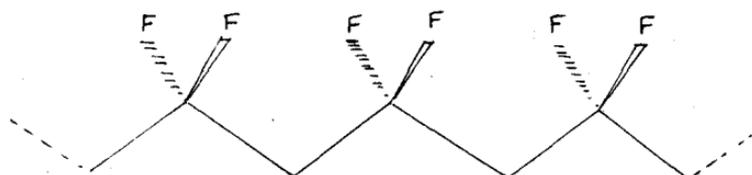
- *Polybutadiène* }
 — *Polyisoprène* } selon ZIEGLER-NATTA.

On obtient des structures cis 1-4 qui correspondent exactement dans le cas du polyisoprène cis 1-4 à la structure du caoutchouc naturel.



- *Polychloroprène* (chloro-2 butadiène). 100 % trans 1,4 c'est le néoprène*.

— *Polytetrafluoroéthylène* ou Teflon*, Fluon*.



Extraordinairement résistant à tous les agents chimiques et bon lubrifiant.

— *Copolymères*. A partir des monomères A et B, on peut prévoir différents arrangements. La copolymérisation peut être :

— statistique Ex : AAABBABBBBAA-----

— séquencée Ex : A----AB-----BA-----AB-----

— alternée Ex : ABABABAB---

— greffante Ex : A-----A

B

B

— *Copolymère Acrylonitrile-Butadiène-Styrène* ou ABS :



Il existe différentes manières de préparer ces polymères.

Chez BAYER par exemple, il existe 20 types d'ABS commercialisés sous le nom Novadur*. On peut distinguer deux grands types d'ABS :

1) On parle d'un type ABS « copolymère » lorsqu'on enrobe une phase élasto-caoutchouteuse (par exemple un copolymère de butadiène et d'acrylonitrile) en l'incorporant dans une phase cohérente (par exemple dans un copolymère de styrène et d'acrylonitrile).

2) On parle d'un type ABS « greffé » lorsqu'il y a copolymérisation de polybutadiène par greffage avec du styrène et de l'acrylonitrile monomères. Ce polymère ABS « greffé » est constitué par une phase élasto-caoutchouteuse (le polybutadiène greffé) et une phase résineuse cohérente (le copolymère de styrène et d'acrylonitrile).

— *Copolymère ASA*. On prépare d'abord un *copolymère SAN* (styrène-acrylonitrile) puis ce copolymère SAN est modifié par des esters acryliques. Le matériau obtenu présente des tenues aux chocs bien supérieures à celles des ABS et surtout leurs tenues à la lumière et au vieillissement sont remarquables.

Commercialement, ces copolymères ABS, SAN et ASA sont connus sous les noms de Gedex*, Hostyren*, Luran*, Lustran*, Novadur*, Sicoflex*, Ugikrol*, Nabutène*, etc.

— Copolymère fluorure de vinylidène $\text{CH}_2 = \text{CF}_2$ et hexafluoropropylène $\text{CF}_2 = \text{CF} - \text{CF}_3$, c'est le Viton* élastomère très résistant à l'oxydation et aux agents chimiques.

B) Réactions de polycondensation.

Dans la polycondensation, les éléments réactifs s'assemblent, que la réaction s'accompagne ou non de l'élimination d'un résidu généralement simple tel que l'eau, l'ammoniac, le gaz carbonique, l'acide chlorhydrique. Quand il n'y a pas élimination d'un tiers corps on dit aussi qu'il y a *polyaddition*.

On peut prévoir deux cas :

1) Polycondensation entre molécules bifonctionnelles

du type a) :

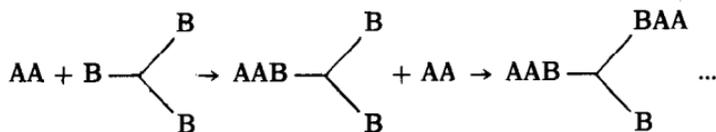


ou du type b) :



Les polycondensats obtenus dans l'un ou l'autre cas sont linéaires et thermoplastiques.

2) Polycondensation entre molécules de fonctionnalité supérieure à 2 du type :

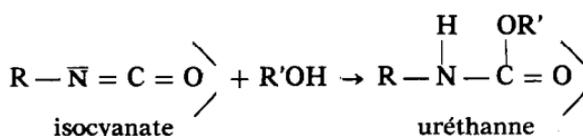


On obtient alors un réseau tridimensionnel, le polycondensat obtenu est thermodurcissable.

POLY (URETHANNES).

Ce sont des polymères contenant sur la chaîne des groupes

uréthannes $-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\overset{\text{H}}{\text{N}}-$ (ce groupe fonctionnel s'appelle aussi carbamate mais cette appellation est plutôt réservée aux petites molécules). Un uréthanne s'obtient très facilement par réaction d'un isocyanate et d'un alcool, une catalyse basique (amine tertiaire R_3N) est quelquefois nécessaire.

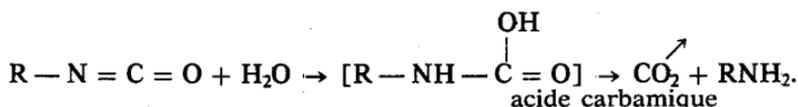


- Un Disocyanate + un diol → polymère linéaire.
- Un Disocyanate + un triol → polymère tridimensionnel.

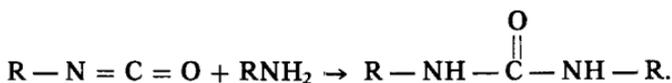
Remarque.

Un isocyanate peut être considéré comme un anhydride interne de l'acide carbamique (acide hypothétique instable du même genre que l'acide carbonique, H_2CO_3).

La présence d'eau provoque l'hydrolyse de l'isocyanate :

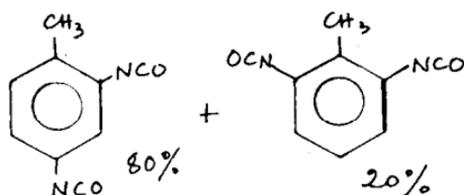


L'amine formée réagit comme le fait l'alcool sur la fonction isocyanate : il se forme une urée substituée :



Le gaz carbonique formé expande le polymère, on obtient une « mousse » de polyuréthane. Afin d'aider l'expansion, on ajoute avant la réaction du Fréon 11 (c'est Cl_3CF P^r Ebullition = $23,7^\circ\text{C}$) car l'exothermicité de la réaction provoque la vaporisation du Fréon.

La mousse est rigide si le triol est de faible masse moléculaire. La mousse est souple si le triol est de forte masse moléculaire. Industriellement, on utilise couramment le TDI ou toluène diisocyanate (mélange constitué de) :



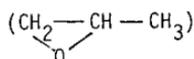
2-4 toluène diisocyanate. 2-6 toluène diisocyanate.

Etant donné les possibilités énormes de variation de leur composition, il est possible d'obtenir des polymères très différents les uns des autres tels que fibres élastiques (Lycra*), ma-

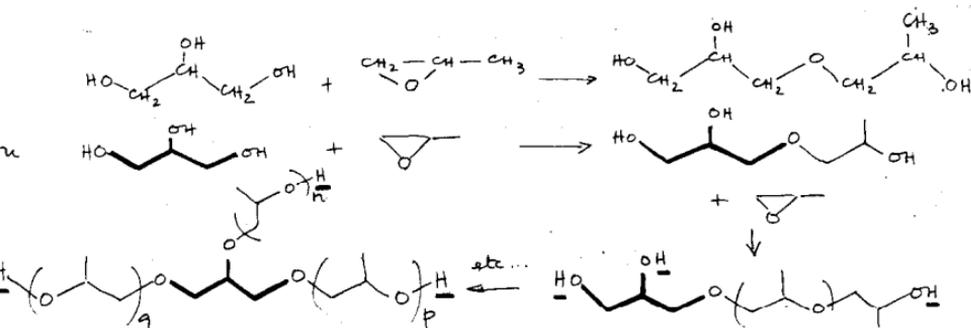
tières plastiques dures ou molles, parfois élastiques ou par contre fortement réticulées, tels que des mousses rigides ou souples de revêtements, des peintures, etc. qui trouvent des emplois multiples dans de nombreuses industries.

Exemple de mousse souple.

Les mousses souples sont actuellement obtenues à partir de polyéthers triols de haut poids moléculaire ($M \approx 4500$). Il s'agit généralement de polyoxypropylène triols obtenus par condensation basique de l'oxyde de propylène :



sur un triol de bas poids moléculaire comme le glycérol :
(HOCH₂—CHOH—CH₂OH).



polyoxypropylène triol.

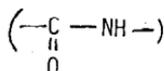
C'est ce type de composé qui a donné son nom aux mousses souples appelées « mousses de polyéther » utilisées dans l'ameublement (matelas, coussins, fauteuils), l'automobile, etc.

Exemple de mousse rigide.

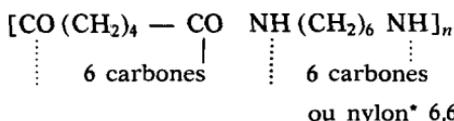
Le principe de la formule reste le même que pour les mousses souples, mais le polyol utilisé est un polyéther de bas poids moléculaire ($M \approx 600$), obtenu comme précédemment par condensation de l'oxyde de propylène sur un alcool polyfonctionnel comme le glycérol, le pentaérythrithol ($C(CH_2OH)_4$), etc. Les noms commerciaux de ces polyuréthanes sont : Desmocoll*, Desmodur*, Ugipol*, Voranol*, Luvipren*, Lupranat*, etc.

POLYAMIDES.

Ce sont des polymères du type AABB ou ABAB contenant sur la chaîne des groupes fonctionnels amide :



poly (hexaméthylène adipamide) :



— poly (hexaméthylène sebaçamide) ou nylon* 6,10,

— poly (amino 6 caproïque) :

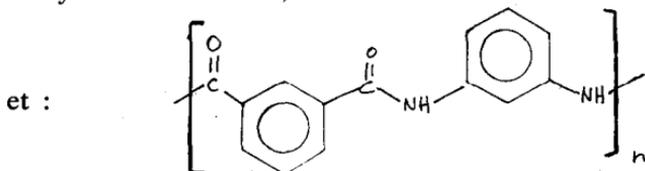


ou nylon* 6, akulon*, perlon*, technyl*...

— poly (amino 11 undécanoïque) :



ou nylon* 11 ou rilsan*,

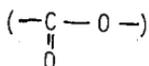


ou Kevlar* (fibre aramide).

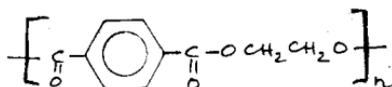
Ces polyamides sont aussi commercialisés sous les noms suivants : Zytel*, Maranyl*, Technyl*, Durethan*, Euredur*...

POLYESTERS.

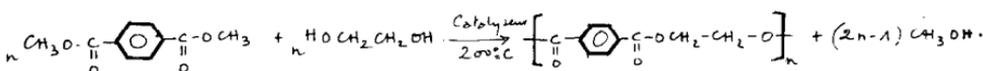
Ce sont des polymères contenant sur la chaîne des groupes fonctionnels ester :



— polytéréphtalate d'éthylène glycol :



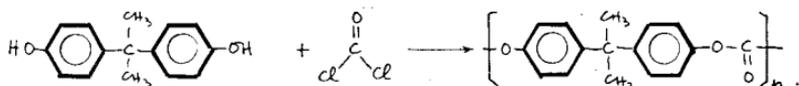
obtenu par transestérification du téréphtalate de méthyle par l'éthylène glycol (HO—CH₂—CH₂—OH) (et non par estérification directe).



On obtient le Tergal*, Dacron*, Diolen*, Terylène*, Myla*, Trevira*, Cronar*, Terital*.

Chimiquement très voisin du Dacron*, ou du Mylar*, il existe également des polymères thermoplastiques qui associent dans un matériau unique plusieurs des propriétés les plus intéressantes des élastomères et des thermoplastiques aux performances élevées, ce sont des élastomères polyesters comme l'Hytrell* ;

— polycarbonate de « bisphénol A » (ou (4 hydroxyphényl-1)2-2 propane) obtenu par réaction entre le « bisphénol » et le phosgène (COCl₂) ou par transestérification avec le carbonate de phényle :

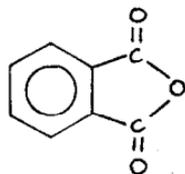


« Bisphénol A »

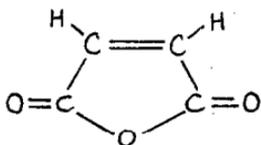
C'est le Lexan*, Merlon*, Makrolon*, Sunglass*...

« Résines polyesters ».

On prépare ces résines polyesters par pontage de polyesters insaturés « Polyène esters ». Ceux-ci sont obtenus par condensation entre divers polyacides utilisés sous forme d'anhydride, principalement l'anhydride phtalique :



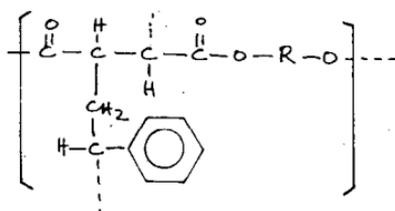
et l'anhydride maléique :



et des alcools (éthylène, propylène, diéthylène glycol, etc.).

Les produits de condensation se présentant sous forme d'une masse visqueuse sont dilués dans un monomère non saturé : le styrène (C₆H₅—CH = CH₂), susceptible de se combiner avec les doubles liaisons de la résine provoquant ultérieurement la réticulation.

Cette réticulation se produira lorsque l'utilisateur introduira dans la résine un peroxyde catalysant l'ouverture des doubles liaisons de la chaîne et du monomère. On peut esquisser la structure chimique d'une telle résine, par exemple sous la forme suivante :



R = Radical organique du diol

Ces résines s'appellent Stratyl*, Roskydal*, Toralithe*, Uka-pont*, Vestopol*, Leguval*, GFK*, etc.

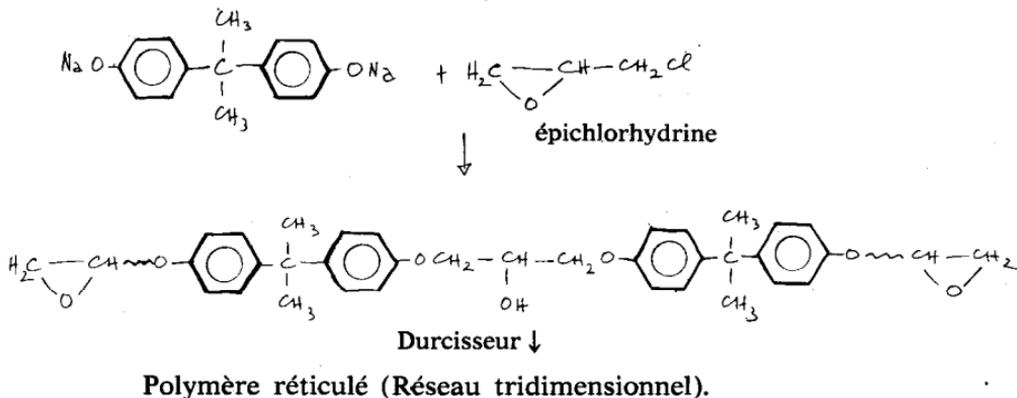
Résines « époxy ».

En premier lieu, on prépare un polymère linéaire de faible masse moléculaire, qui présente des groupes époxydes très réactifs à ses extrémités en faisant généralement réagir de l'épichlorhydrine sur un diphenol : (le bisphénol A).

Au cours du second stade, sous l'action de réactifs appelés « durcisseurs » tels que l'anhydride phtalique, des polyamines (comme la diéthylène triamine :



des diisocyanates ou des diacides, il se produit une réaction de pontage qui transforme le polymère linéaire soluble en un polymère macromoléculaire tridimensionnel insoluble. Ce sont l'Araldite*, l'Epikote*, l'Epoxin*, le Lopox*. La résine obtenue présente d'excellentes qualités adhésives.



ADJUVANTS ASSOCIES AUX POLYMERES.

Tous les matériaux précités ne sont jamais seuls lors de la mise en œuvre. On peut distinguer très rapidement deux types d'adjuvants :

a) ceux qui modifient le comportement mécanique. Les plastifiants abaissent la température de transition vitreuse.

Les charges sont des composés inertes qui peuvent représenter 50 % du matériau polymère. (Ex. : CaCO_3 , noir de C, silice, kaolin,...) ;

b) ceux qui modifient le comportement chimique (les anti-oxydants, les produits anti UV, les stabilisants, les ignifugeants).

QUELS SONT LES ELEMENTS D'UNE PLANCHE A VOILE ?

Le flotteur.

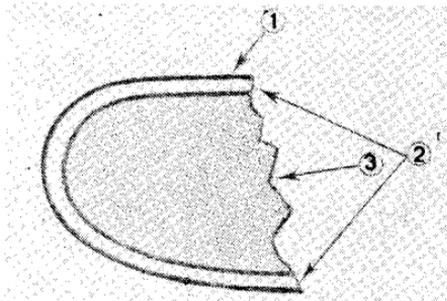
On peut arbitrairement distinguer deux types de carènes :

a) LES CARÈNES RONDES plutôt destinées à la régata et à la vitesse au près et dont la stabilité est précaire ;

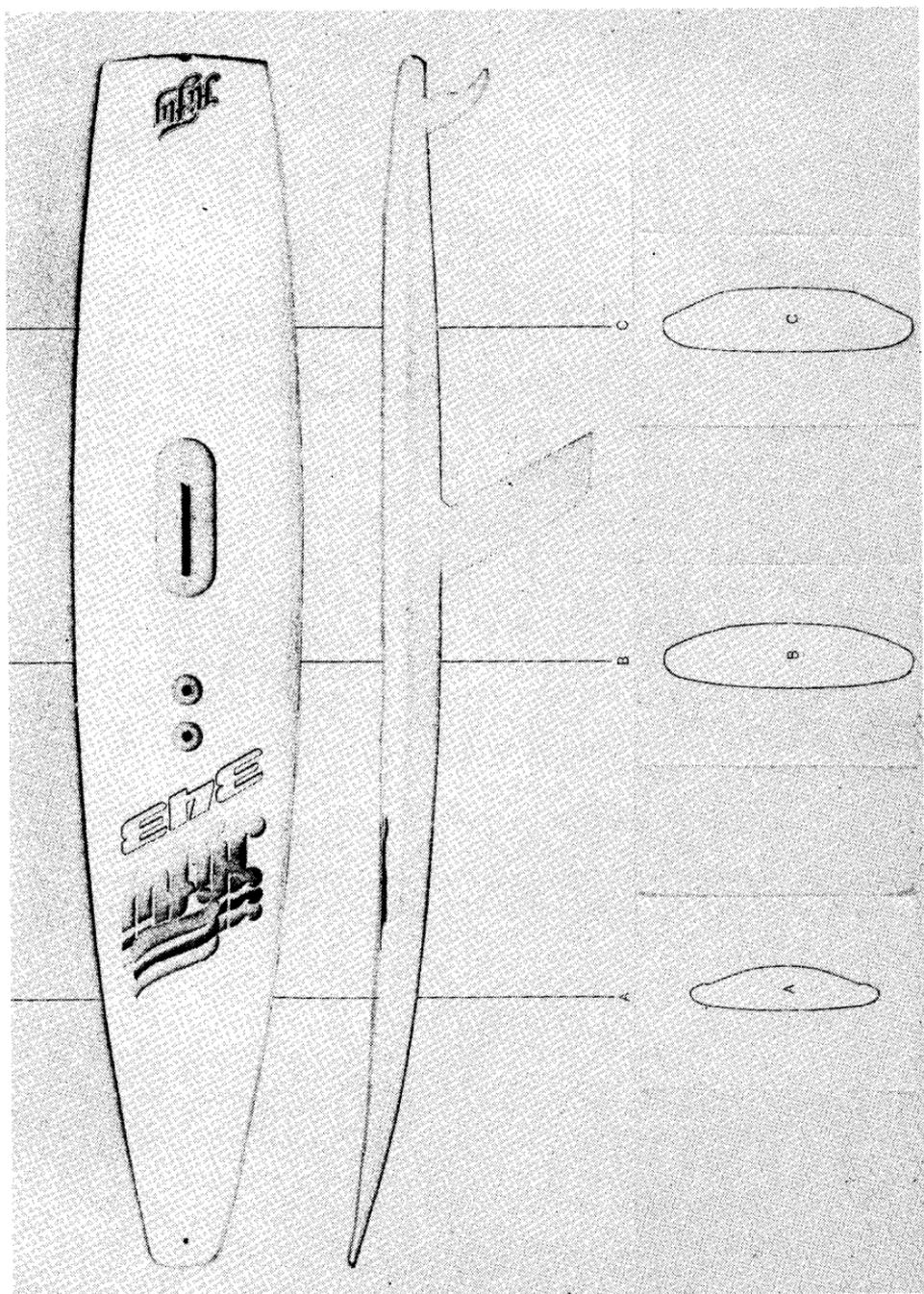
b) LES CARÈNES PLATES sont plus stables mais ne remontent pas très bien au vent et tapent dans le clapot (fig. page suivante).

C'est pourquoi les architectes se tournent maintenant vers des formes de carènes différentes : plus volumineuses à l'avant puis aplaties au centre de la planche jusqu'à l'arrière ; ceci permettant d'avoir une carène plus performante au près, tout en restant facile et évolutive.

Quel que soit le matériau utilisé pour fabriquer l'enveloppe externe du flotteur celui-ci est rendu insubmersible par un remplissage en mousse polyuréthane à cellules fermées (haute densité en surface et noyau central à faible densité).



- 1) Peau polyester mat, roving.
- 2) Mousse polyuréthane dure haute densité.
- 3) Mousse polyuréthane légère.



Matériaux utilisés pour le flotteur.— *Stratifié de « polyester » ou de résine « époxy ».*

Ce sont des structures en plastique armé de fibres (5). La résine (polyester ou époxy) imprègne un support (fibre de verre, fibre de carbone, fibre de kevlar*) pour constituer un stratifié. C'est ce qu'on appelle commercialement le « polyester » ou l' « époxy ». Le GFK* entre dans cette catégorie.

— *ABS*.*

L'ABS a un peu l'aspect du polyester mais sa réparation est plus délicate. Il vieillit mal car il résiste mal aux UV, c'est pourquoi les fabricants utilisent de plus en plus des matériaux du type ABS stables aux UV tels que les ASA*, l'Hostyren* XS, le Nabutène*, etc...

— *Polyéthylène quelquefois appelé Lupolène*.*

Il donne des planches un peu lourdes et d'un aspect mat mais c'est sans nul doute un des matériaux les plus résistants.

La planche étalon « Windsurfer standard » dont il existe plus de 300 000 unités dans le monde est en polyéthylène.

— *Polypropylène.*

Il possède plus de qualités que le polyéthylène. Il est probable que c'est un des matériaux de l'avenir, du moins en ce qui concerne la planche polyvalente (initiation, loisirs).

— *Polycarbonate.*

C'est une nouveauté dans le domaine des flotteurs.

— *Aluminium.*

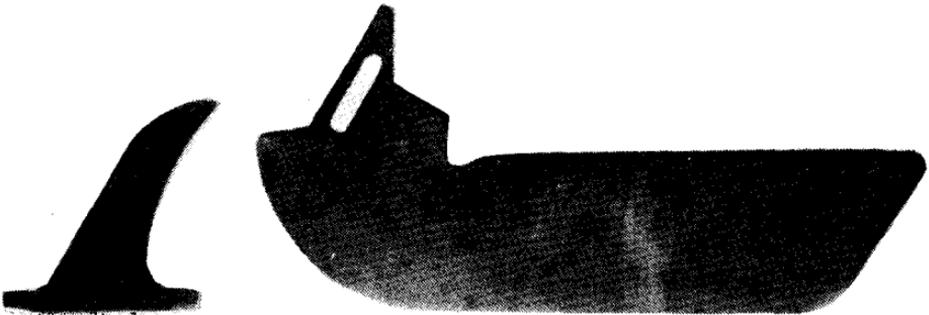
Une infime minorité utilise ce matériau. Dans le domaine de la compétition, la course après le poids est effrénée. Ainsi, dans le championnat du monde « open », la planche du vainqueur (en catégorie « légers ») cette année est une CRITD₂* dont le flotteur est fabriqué en plaques d'aluminium profilé en nid d'abeilles pris en sandwich entre de la fibre de verre imprégnée de résine époxy. Cette planche pèse 15 kg et est lestée à 18 kg.

Une conclusion partielle à propos des matériaux constituant le flotteur nous amène à comparer les 3 matériaux principaux utilisés actuellement :

Matériaux	Points forts	Points faibles
Polyéthylène.	Résistance aux chocs. Coque monobloc.	Esthétique. Réparation.
Polyester.	Esthétique. Facilité de réparation. Rigidité.	Résistance aux chocs. Coût à la production.
ABS.	Esthétique. Solidité. Facilité d'entretien.	Sensibilité à la chaleur. Liaison des demi-coques.

La dérive et les ailerons.

La rigidité s'impose pour ces accessoires, aussi trouve-t-on la plupart des dérivés en polypropylène, en polycarbonate (Lexan*) en GFK*, en polyamide (Zytel*), en polyéthylène rigide, en bois ultra léger (type balsa) avec les bords d'attaque et de fuite renforcés (tissu de verre) ou en bois avec une âme en fibre et résine.



Aileron type
Enduro
Windsurfer.

Dérive pivotante polypro.

Pour ce qui est des ailerons, on retrouve les mêmes composants que pour les dérives. Un aileron très rigide sera souvent en polycarbonate ou en polyester (+ fibres).

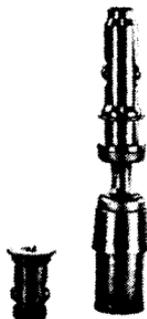
Les pieds de mâts.

Sur les planches des « Windsurfer » le pied de mât est de type sabre avec une rotation à cardan en acier inoxydable mais c'est maintenant, sur la plupart des autres planches, une articulation souple en élastomère appelée « diabol ». Les princi-

paux matériaux utilisés sont le nylon (souvent avec des fibres), le polypropylène et l'Hytrel*, rondelles en Teflon*, Viton*.

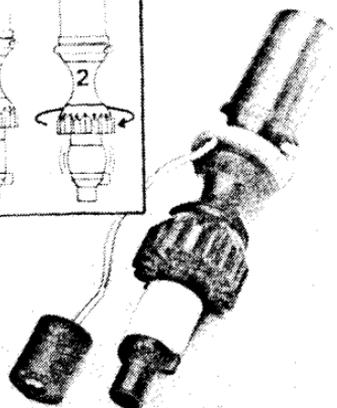
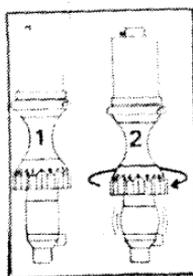
LE PIED DE MAT AUTOBLOQUANT.

Par bille rétractable
en polypropylène injecté.

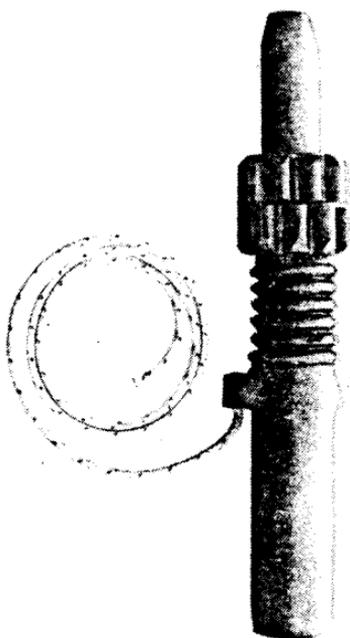


LE PIED DE MAT A CLIPS.

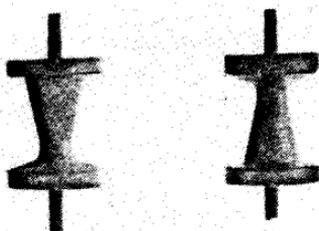
En polypropylène injecté
avec blocage par clips assurant
également la sécurité.



Pied complet à dureté réglable.



Pied de mât complet.



Nouveau Diabolo de pied de mât
asymétrique, permet d'abaisser
ou de réhausser le centre de
gravité suivant le sens de mon-
tage choisi.

Il existe essentiellement trois types :

Le premier est le pied de mât équipé de joints toriques, que l'on enfonce en force dans l'emplanture. Sa tenue est bonne. En rajoutant ou en retirant les joints toriques, on règle la force nécessaire pour arracher le mât. Le deuxième système est le clips réglable. Il s'agit d'un clips qui est fixé sur l'emplanture de mât. Le réglage de dureté s'effectue cette fois en serrant ou desserrant le « clips » métallique (à l'aide d'une pince). Ce système offre de nombreuses possibilités de réglage et son mécanisme est fiable. Enfin, il existe le système du joint que l'on comprime. On enfonce la partie inférieure du pied de mât dans l'emplanture, puis l'on tourne une molette qui gonfle plus ou moins le joint selon la dureté désirée. Ce type de pied de mât a une excellente tenue et permet de modifier le réglage à tout moment, et ceci sans outillage, mais l'inconvénient est que comme tout système à vis, il supporte mal le sable et le sel : il s'usera donc plus rapidement.

Les mâts.

Ils peuvent être souples, raides ou médium et sont fabriqués en fibre de verre incluse dans de la résine (polyester mais le plus souvent époxy). Depuis peu, et surtout cette année au vu des résultats obtenus dans les compétitions, les mâts métalliques (à base d'aluminium) prennent un nouveau départ.

Le wishbone (voir figure page suivante).

Sur les premières planches, il était en teck lamellé-collé. Actuellement, il est en alliage léger et pour que les mains ne glissent pas, ce tube est recouvert d'un revêtement antidérapant. Cet antidérapant peut être soit du PVC (polychlorure de vinyle), soit du néoprène* (soft grip), soit du TBS* (résine + poudre de polyuréthane).

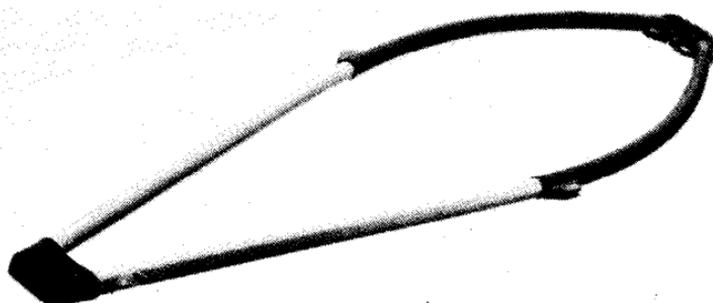
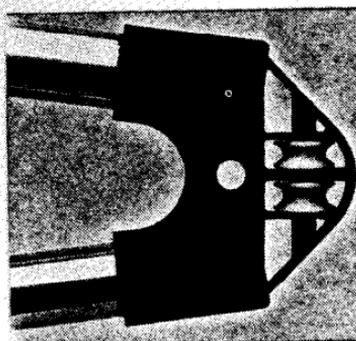
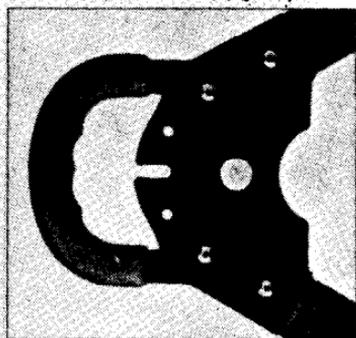
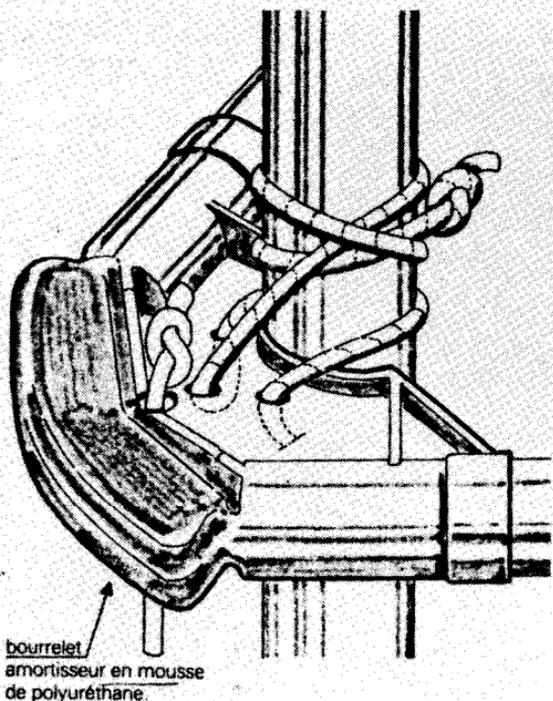
Les accessoires du flotteur.

— Puits de dérive en ABS*.

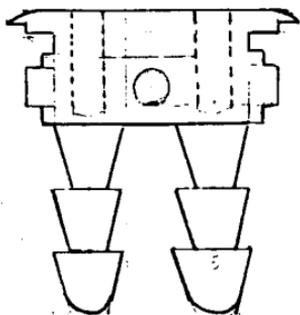


Puits de dérive

— L'anneau de remorquage en ABS*.

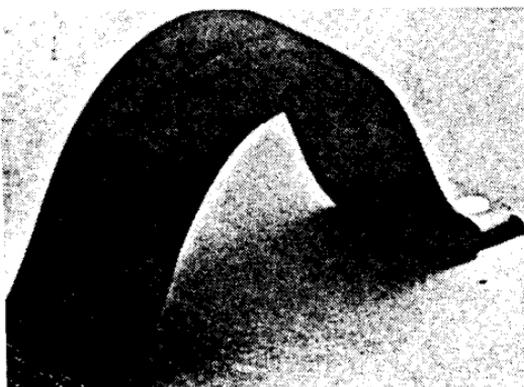
embout avant

— L' « insert » (emplanture de mât) plastique double en polyéthylène permet la fixation du pied de mât.



Insert plastique double
(PE)

— « Foot-strap » ou cale-pied en néoprène*.



Foot-strap
néoprène

— Revêtements antidérapants :

- soit une association de résine et de poudrette de polyuréthane (TBS* en rouleaux à coller),
- soit un antidérapant à base de microbilles de Rilsan* piégées par un vernis polyuréthane sur toute la surface du flotteur.

Les voiles.

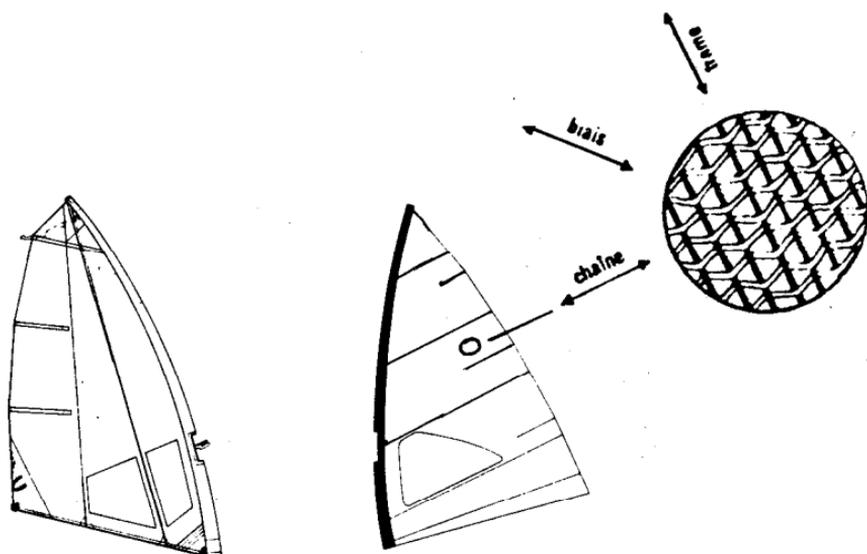
Leurs surfaces varient selon les besoins de 3,5 m² à 9 m². Une voile sur deux dans le monde est en « sailtiss » c'est-à-dire en Dacron* ou Tergal* (165 g/m² en moyenne). Parmi les nouveautés, outre le polyéthylène, le Mylar* qui est un film polyester accolé à un textile lui-même polyester. On obtient un tissu pratiquement indéformable (élongation inférieure à 1 %).

Un tissu se déforme peu dans le droit-fil (chaîne et trame), beaucoup plus dans le biais. On s'efforce d'assembler les bandes de tissu (les laizes) de façon à faire travailler surtout le droit-fil. Ainsi la chute des voiles doit être taillée dans le droit-fil du tissu. Les voiles de planches ont deux bords libres (comme les focs) qui doivent être tous deux dans le droit-fil.

Cette année, un nouveau type de voiles apparaît. Il correspond à une recherche concernant la coupe des voiles permettant à la chute de voile de ne pas subir des déformations importantes (voiles tête radiale, « fathead »).

Cette nouvelle disposition des laizes offre des avantages,

- absence de coutures sur la chute où les efforts sont les plus importants (en revanche coutures sur la bordure),
- construction en tissu différent, tenace sur la chute (210 g/m² plus fort en chaîne) plus souple sur l'avant (170 g/m² taillé dans le biais pour faciliter l'étarquage vertical).



Voile tête radiale.

Voile classique.

Autres accessoires.

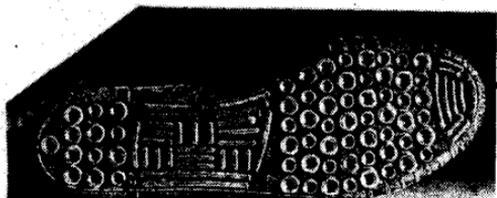
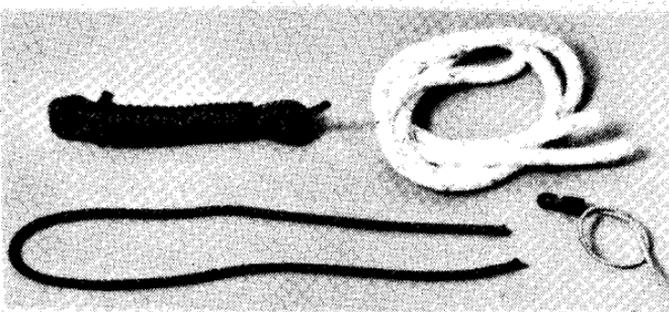
- Brassière de trapèze ou harnais en Tergal* avec des boucleries en nylon* armé de fibre de verre.
- Des sangles de fixation 100 % nylon*.
- Des housses de mâts en PVC.
- Botillons en jersey de néoprène*.
- Tire-veille hawaïen (permet de remonter l'ensemble mât + voile + wishbone). Gaine tissu en polypropylène enrobant une âme élastique.
- Set de bout de wishbone et cordages du bord. Le hale haut, le hale bas et l'étarqueur ont un diamètre de 4 à 6 mm et sont en polyester tressé et souvent préétiré (force de rupture : 240 à 470 kg).
Pour la ligne du harnais, on préfère le Kevlar* de 3 mm (force de rupture : 320 kg).
- Brassière de sauvetage en nylon*.
- Combinaison pour planche à voile : le matériau le plus courant est du caoutchouc néoprène* doublé nylon*. On voit des mousses de polyuréthane*.



**Brassière pour
planche à voile**



**Jeu de sangles
pour fixation**



Il apparaît sur le marché des combinaisons dites sèches qui sont en néoprène* normal double enduction, soit en tissu polyamide, soit en Avilastic* (polyuréthane semi perméable). Dans les deux cas, les systèmes d'étanchéité consistent en des manchettes de caoutchouc très fines s'appliquant étroitement au cou et aux articulations de manière à empêcher toute pénétration d'humidité.

- Sous-vêtements : le tissu Lifa* en polypropylène permet, par son tissage, d'avoir une structure ouverte pouvant laisser passer l'humidité de la transpiration (le corps reste chaud et sec) et une composition élastique qui épouse les formes du corps.

COMMENT SONT-ELLES FAITES ?

Le stratifié de polyester.

Le flotteur se compose d'une coque et d'un pont, fabriqués séparément puis collés. Les deux pièces sont réalisées dans un moule creux (photo 1) qui vient recevoir d'abord la « peinture » du flotteur — (photo 2) le gel-coat — puis plusieurs couches de



Photo 1.

tissus de verre — mâts et roving — (photo 3). Ce principe simple en apparence est celui utilisé depuis plus de quinze ans pour les bateaux, mais son adaptation à la planche à voile a posé quelques problèmes. On passe la couche de gel-coat au fond du moule-pont. C'est beau, un moule : un véritable miroir de résine au fini parfait ; le moindre défaut d'aspect se retrouverait en

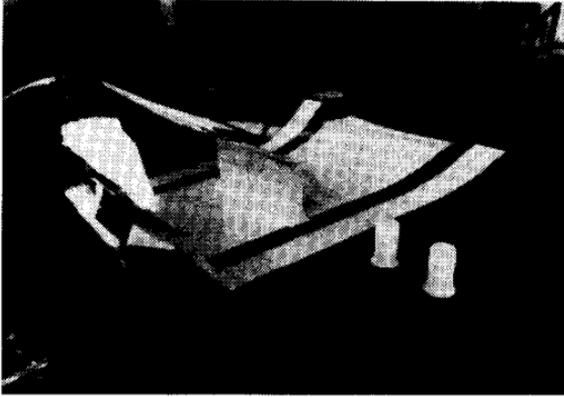


Photo 2.

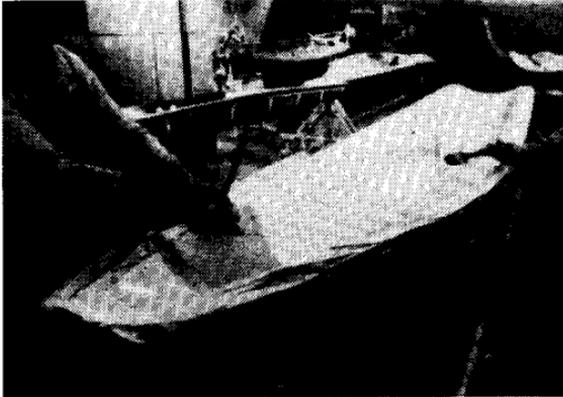
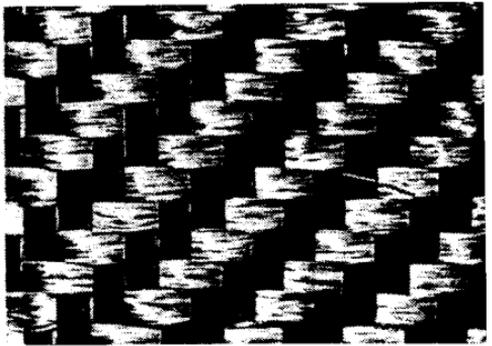


Photo 3.

Mâts de verre

Croisé roving



effet sur la coque terminée. Le moule porte en relief les emplacements des puits de dérive et de mât, ainsi que le boîtier d'aileron. Au pistolet s'impriment les bandes de décoration puis le blanc du pont et de la coque. Après séchage, on s'attaque à la stratification. Le poids de résine nécessaire à la fabrication de la coque et du pont a été déterminé avec précision. Les bandes de tissus sont prédécoupées ; il faut répartir le tout uniformément, ce qui demande une certaine expérience.

On applique ainsi au pinceau et au rouleau une première couche de résine dans laquelle on noie les feuilles de « mât » (fibre de verre non tissée, comme du feutre) puis de « roving » (fibre tissée plus épaisse). Certaines zones, comme le puits de dérive ou l'étrave, reçoivent des surépaisseurs, et en haut des moules une dernière bande de « roving » vient se replier à angle droit pour former la lèvre qui permet le collage. Le tout durcit en une demi-heure.

Au bout de ce temps, on lève au palan le moule-pont, et on l'applique sur le moule-coque pour collage. On n'utilise pas de résine pour le collage, mais plutôt un matériau souple, mélange de fibre et d'agent liant. Le tout est maintenu sous presse pendant une nouvelle demi-heure, puis on démoule. Le flotteur apparaît (photo 4). Il est alors tout mou : c'est la mousse injectée sous pression qui lui donnera sa raideur.

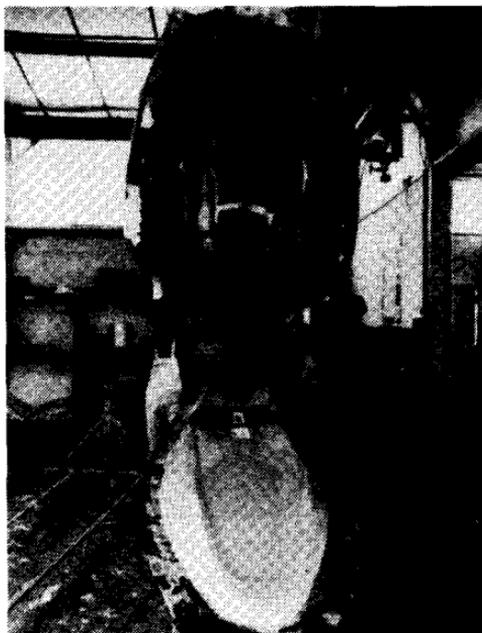


Photo 4.

Pour remplir le flotteur de mousse, on introduit celui-ci dans un conformateur, véritable coffre-fort portant l'empreinte exacte de la planche. Sous pression, on injecte le polyuréthane en inclinant le conformateur pour une répartition parfaite du liquide, qui se transforme instantanément en mousse, gonflant comme une pâte à gâteau. Après vérification du poids, le flotteur revient à l'atelier pour recevoir son accastillage (puits de dérive et de mât, boîtier d'aileron...) et subir les dernières finitions.

Les planches « époxy » sont fabriquées de la même façon que les « polyesters ».

Le polyéthylène par rotomoulage.

Comme à l'époque des premières Windsurfers, celles-ci sont fabriquées en polyéthylène par rotomoulage, mais la technique a évolué, puisque les flotteurs qui sortent du moulage ont le même aspect brillant et net que le polyester. Si l'on sait que l'on a toujours reproché au polyéthylène son aspect pas toujours flatteur, on peut parler d'une réelle évolution du procédé.

Le rotomoulage consiste à déposer dans un moule de la poudre de polyéthylène (photos 1 et 2). Ce moule est introduit



Photo 1.



Photo 2.

dans un four, et subit pendant la chauffe à la fois un mouvement rotatif — exactement comme un poulet à la broche — et un mouvement de bascule (photos 3 et 4). Le principe est simple :

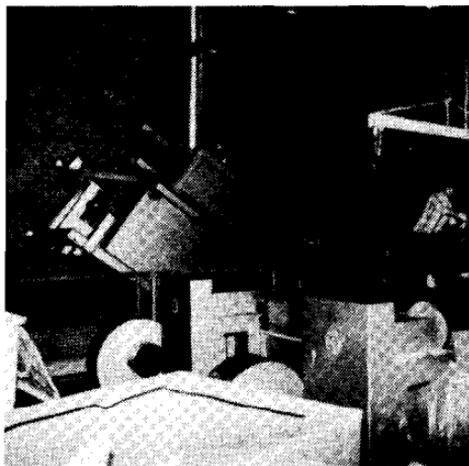


Photo 3.

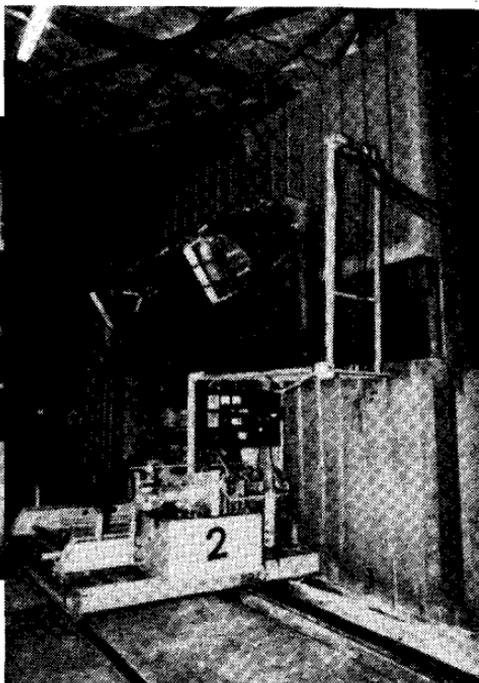


Photo 4.

il s'agit de répartir uniformément le polyéthylène en fusion contre les parois du moule. La pratique s'avère plus complexe, et seul l'empirisme a permis de déterminer la température, le temps de chauffe et la vitesse de rotation idéales.



Photo 5.

Pendant l'opération de refroidissement, les moules continuent leur rotation, devant des rampes d'air froid. Les moules sont alors ouverts et les flotteurs apparaissent encore tout mous, reluisants (photo 5). Les flotteurs sont ensuite ébarbés, dotés de leurs puits de dérive et de mâts avant d'entrer en conformateur pour moussage (photo 6).



Photo 6.

Le polyéthylène par extrusion soufflage.

Qu'il s'agisse de rotomoulage ou d'*extrusion-soufflage*, la matière première reste la même : le polyéthylène sous forme de poudre. Le granulé est conduit depuis le silo à une sorte de four qui le chauffe à 200°, pour en faire une masse de matière en fusion ; celle-ci est alors poussée dans la machine : un énorme bloc de fonte et de ferraille, qui pèse plusieurs dizaines de tonnes, et mesure une dizaine de mètres de haut. Au milieu de ce bâti se dressent verticales, les deux mâchoires du moule, portant en creux l'empreinte du flotteur, et au-dessus du moule, une espèce de robinet géant, la buse, d'où va sortir la matière en fusion.

Le polyéthylène commence à sortir de la buse (photo 1), s'allonge doucement et arrive à la hauteur du bas du moule, où il s'engage sur deux lances à air (photo 2). Les deux parties du moule se rapprochent alors et mordent dans la matière : c'est l'extrusion. Un chuintement : l'air entre en force et plaque la matière contre les parois du moule : c'est le soufflage. Lentement, les mâchoires s'écartent laissant apparaître un flotteur entouré de sa « barbe » (photo 3).

Le reste des opérations prend plus de temps : avant d'être moussé, le flotteur est d'abord chauffé intérieurement, à l'aide d'un chalumeau (photo 4), afin de supprimer un pelliculage rési-

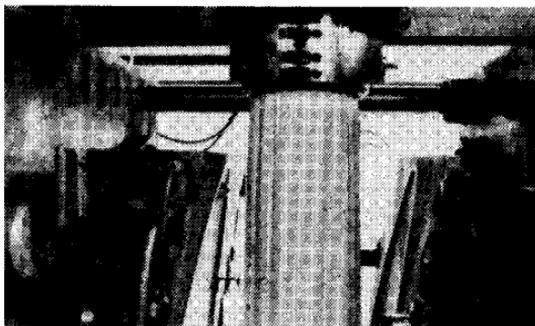


Photo 1.

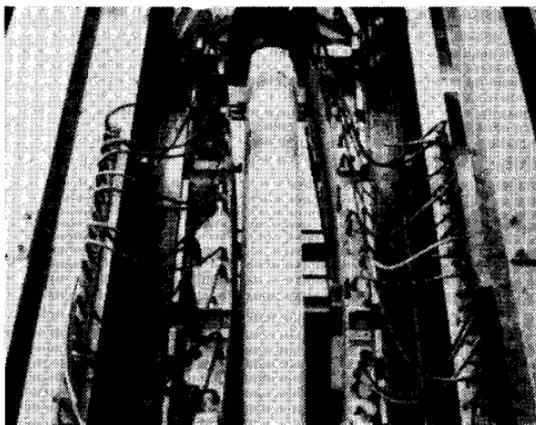


Photo 2.

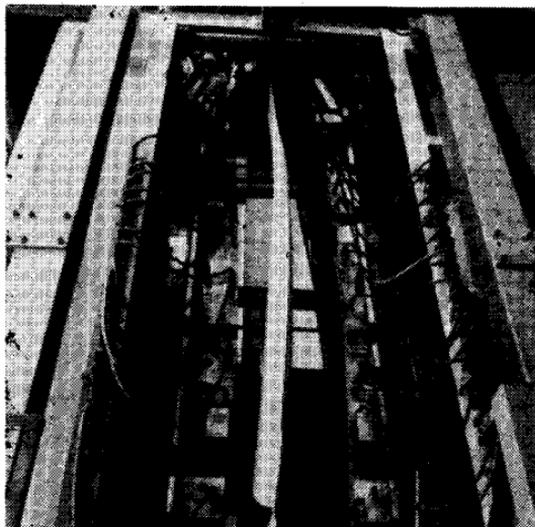


Photo 3.

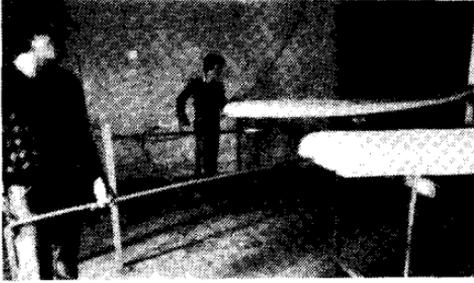


Photo 4.



Photo 5.

duel venant du moulage, et d'amener ses parois à une température idéale. Ensuite, c'est l'extérieur du flotteur qui est chauffé sous une rampe. Après quoi le flotteur est enfermé dans un conformateur (photo 5) pour moussage.

L'A.B.S. par thermoformage.

A l'origine, l'A.B.S. se présente sous forme d'un granulé fondu puis laminé (photo 1), pour obtenir les plaques destinées au thermoformage (photo 2). Cette opération consiste à chauffer la



Photo 1.

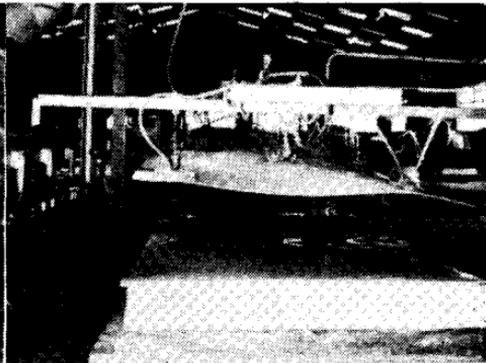


Photo 2.

plaque — à l'aide de rampes à infrarouge — et à l'appliquer contre deux matrices représentant en relief l'une la coque, et l'autre le pont du flotteur (photo 3). Le moulage dure quelques minutes. La plaque formée à l'empreinte des deux éléments de la coque (photos 4 et 5) est alors découpée, et les chutes retraitées (photo 6). On réunit alors la coque et le pont à l'aide d'un

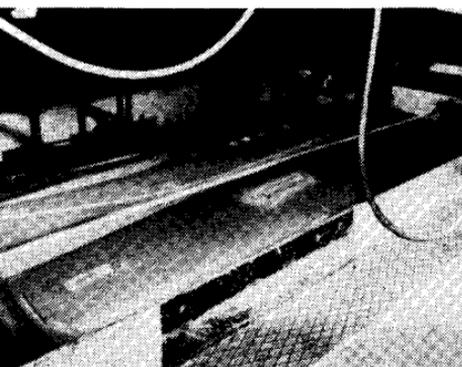


Photo 3.



Photo 4.



Photo 5.

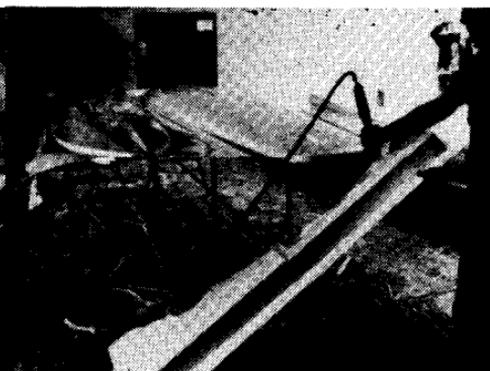


Photo 6.

joint en H, collé à chaud. Le flotteur est enfermé dans un moule conformateur pour le moussage et il ne reste plus alors qu'à monter l'accastillage, et poser l'antidérapant par projection d'un vernis spécial.

LA PLANCHE « CUSTOM MADE ».

C'est le « shapage » artisanal, la planche à voile en « construction amateur ».

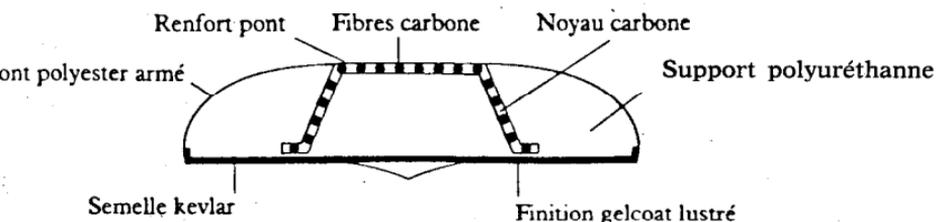
Autrement dit, à partir d'un pain de mousse polyuréthane ou polystyrène expansé, on réalise une planche à voile selon ses

propres desiderata : saut, vitesse, compétition, « freestyle » ou « fun ».

C'est la planche à voile en kit.

Certains pains sont spécialisés tel celui de surfmachine* (en vue d'une planche de saut).

Les matériaux sont : soit pain polystyrène (haute densité) et résine époxy plus fibres, soit pain polyuréthane (clarkfoam*) et résine polyester plus fibres (Kevlar*, carbone, verre, etc.).



On taille le pain de mousse suivant le gabarit choisi, puis on enduit le pain sur les deux faces avec les fibres « mâât et roving » plus résine. Une fois la stratification effectuée, il reste la finition avec un gel coat (vernis résinifié) puis l'antidérapant et la pose des accessoires (emplanture du mâât, ailerons, puits de dérive, « footstrap » (cale-pieds), etc.).

En guise de conclusion, je dirais que la planche à voile n'a pas encore fini de nous étonner, que l'on se place du côté des matériaux ou des performances réalisées. Nous venons d'examiner les matériaux, voyons très brièvement les performances.

Possibilités étonnantes de vitesse pure.

Il suffit pour le constater de comparer des records du monde de vitesse à la voile :

Classe open : voilure de plus de 27,8 m² : 36 nœuds,

Classe C : voilure de 21,84 à 27,8 m² : 24,4 nœuds,

Classe B : voilure de 13,94 à 21,84 m² : 24,4 nœuds,

Classe A : voilure de 10 à 13,94 m² : 23 nœuds,

Classe 10 m² : voilure de 0 à 10 m² : 27,82 nœuds (51,52 km/h).

Ce dernier record vient d'être réalisé par le Français Pascal MAKA par 35 à 40 nœuds de vent sur une planche « pintail » (2,50 m de longueur, 0,52 m de largeur (au maximum), poids de 8 kg) portant une voile de 6,10 m² sur la base de Weymouth (G.-B.). Le précédent record datait de septembre 1982 avec 26,53 nœuds sur la base de vitesse de Brest.

Possibilités étonnantes de maniabilité.

Evolution et saut de vagues de plusieurs mètres (jusqu'à 5 à 6 m de hauteur) avec des planches qui ressemblent à celles du surf.

Dans l'avenir, on peut prévoir une diversification importante. Le salon nautique de 1983 permet déjà de constater cette tendance. On peut distinguer globalement trois catégories de planches :

Loisirs : Pour la planche à voile standard (modèle polyvalent, initiation, loisirs) destinée au grand public, l'expérience a montré qu'une planche de volume inférieur à 240 l n'était pas recommandée à partir de 75 kg (encore que rien ne soit définitif dans ce domaine).

« *Fun* » : Les planches de saut (arrière « round bottom », de vitesse (arrière « pintail ») ou d'évolution dans les vagues ont souvent des volumes réduits (120 l environ). A l'arrêt, le planchiste coule sur sa planche. Seule, l'action du vent sur la voile permet au planchiste de sortir de l'eau. Ce sont des planches « water-start ».

Compétition : Les planches de compétition (régate) présentent des volumes classiques (250 l environ) mais avec un arrière « pintail ».

Enfin, avec les planches en construction amateur, toutes les audaces sont permises.

COMPLEMENTS D'INFORMATION

(1) Fiches documentaires C.N.D.P. Sciences physiques. Classe de troisième. « Les matières plastiques ».

(2) Origine : Fédération des Industries Nautiques, Port de La Bourdonnais, 75007 Paris.

(3) « Puisque les matériaux composites ont déjà été cités ailleurs, notons ici leur utilisation pour l'off-shore pétrolier : la S.N.I.A.S. fabrique des tubes d'injection d'eau et de boue en époxy-verre ou époxy-carbone, et des jonctions souples (rotules) en structures lamellaires métaux/caoutchouc synthétique présentant des caractéristiques d'élasticité excellentes.

De même, la Société Nationale des Poudres et des Explosifs (S.N.P.E.) fabrique des flotteurs de risers, domaine important pour l'off-shore : le matériau utilisé est un plastique renforcé par des billes creuses (de verre ou d'autres matériaux), et possède des qualités de robustesse, légèreté, solidité et résistance à la corrosion, remarquables.

Ouvrons d'ailleurs une parenthèse pour dire que, en raison même de ces qualités, les matériaux composites ont et auront de nombreuses applications dans les matériels marins : coques de bateau et même planches à voile pour les sportifs ; peut-être verra-t-on bientôt également apparaître un engin de ramassage des nodules en matériaux composites (S.N.I.A.S./C.N.E.X.O.) ».

Extrait du texte de la conférence présentée par M.-B. DELAPALME (Directeur Recherche, Développement et Innovation, S.N.E.A.) au Symposium franco-japonais sur les techniques de pointe organisé à Tokyo, les 16 et 17 avril 1982, à l'occasion du premier voyage au Japon d'un chef d'Etat français : M. F. Mitterrand.

(4) La jolie invention de Martin d'ESTREAUX présentée par Daniel ALLISY, Edition Voiles-Gallimard.

(5) *Structures en plastique armé de fibres.*

Les plastiques armés de fibres ont maintenant conquis leur place parmi les matériaux de construction. La question primordiale n'est pas l'adoption accrue des plastiques armés de fibres, mais le type de fibres à utiliser en fonction de la structure à concevoir. Ce problème est souvent compliqué par l'adoption du générique « composites » (6) pour décrire la combinaison d'une ou plusieurs fibres de renfort avec une résine thermodurcissable. En parlant de composite, les spécialistes évitent de dévoiler la fibre de renfort utilisée. Il est difficile de saisir la grande différence de performance en matière de poids et de coût d'un composite à l'autre. En fait, on peut imaginer que le domaine des composites deviendra aussi complexe que les métallurgies. A titre indicatif, voici une comparaison des propriétés mécaniques et des coûts de quelques fibres de renfort.

Matériau	Résistance à la rupture R 10^7 N. m^{-2} ou kgf/mm^2	Densité relative ρ	Rapport R/ ρ	Coût relatif par unité de	
				poids	volume
terre	241	2,54	95	1	1
arbone	276	1,75	157	30	20,7
ibre aram : de Kevlar* .	340	1,44	236	17	9,6
orde à piano (acier)	200	7,9	25,3	2	6,2
il d'aluminium (Dural) .	19	2,8	6,7	3	3,3
ylon étiré	100	1,15	87	—	—

(Un fil de nylon de 1 mm^2 de section peut supporter le poids d'un homme de 80 kg).

$1 \text{ kgf/mm}^2 = 9,81 \text{ N/mm}^2 \dots$

$$\dots \simeq \frac{10 \text{ N}}{10^{-6} \text{ m}^2} = 10^7 \text{ N. m}^{-2} = 10^7 \text{ Pascals} = 10 \text{ MPa.}$$

(6) Le mot « composite » décrit bien les nouveaux matériaux car il signifie : constitué d'éléments divers, mais il prête à confusion car les alliages sont aussi des composites puisqu'ils combinent divers métaux.