

Guide de réalisation d'une coque en Kevlar sous vide : L'exemple d'Athéna 2

Julien Valteau

Mai 2006

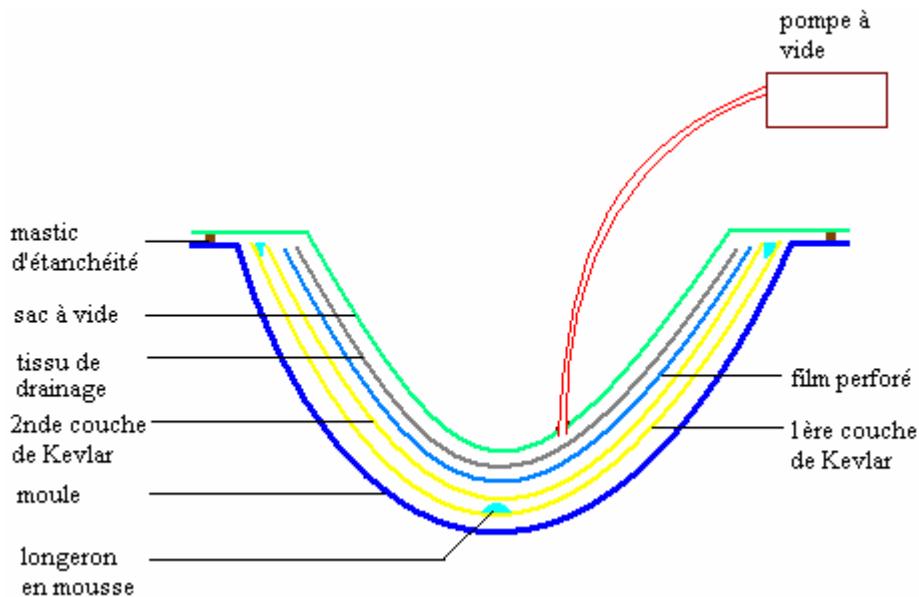
PLAN

I) PRINCIPE DE LA REALISATION SOUS VIDE	3
II) TRAVAIL DE PREPARATION (3 SEMAINES).....	4
III) REALISATION (4 HEURES).....	16
IV) FINITION (2 SEMAINES).....	24
V) LISTE DU MATERIEL NECESSAIRE A LA REALISATION.....	30

Les améliorations à apporter sur la coque 2006 sont notés en rouge

I) Principe de la réalisation sous vide

Schéma de présentation de la technique de réalisation sous vide



- on place de l'agent de démoulage dans le moule,
- on met successivement les couches de Kevlar en les imprégnant à chaque fois de résine,
- on place du film perforé,
- on place du tissu de drainage,
- puis on met le sac à vide par-dessus en assurant l'étanchéité à l'aide de mastic,
- enfin on branche une pompe à vide au sac.

Le sac en appuyant vient plaquer uniformément le Kevlar sur le moule et chasse les bulles. L'excès de résine sort par les trous perforés et est absorbé par le tissu de drainage. Cette technique rend ainsi la coque plus solide (pas de défauts de compactage) et moins lourde (moins de résine utilisée au final).

En revanche, la réalisation d'une coque sous vide est une opération délicate nécessitant une longue préparation (3 semaines environ). En effet, pour être efficace, il faut que tous les éléments de la coque soient imprégnés de résine moins de trois-quatre heures après le début des opérations afin que celle-ci soit encore suffisamment fluide pour s'évacuer à travers le film perforé.

La réalisation elle-même ne prend qu'une demi-journée (de toute façon après 6 heures d'imprégnation, c'est trop tard ! La résine est trop sèche).

De plus, il faut prévoir des moyens pour fixer les éléments (lisso, arceaux) afin qu'ils ne bougent pas lors de la mise sous vide, ce qui augmente la difficulté de mise en œuvre.

II) Travail de préparation (3 semaines)

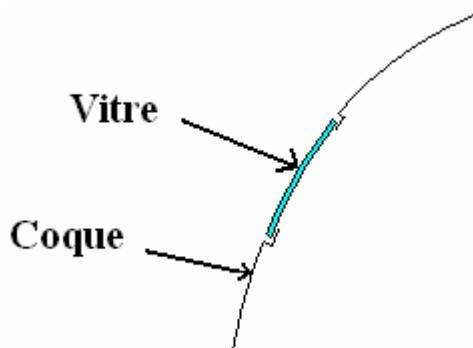
- Vérifier l'état de surface du moule : retirer les poussières et poncer (au 220 ou 400) les restes d'agents de démoulage.
- Préparer la mise en place des vitres :
 - tailler les vitres à la taille voulue aux ciseaux. **Il vaut mieux tailler un peu trop court pour la vitre avant de façon à ne prendre que la portion qui était en contact avec le moule, sans quoi on a des défauts de courbure, nuisant à l'ajustement à la coque.**
 - faire des marques du contour sur le moule avec un feutre délébile à nettoyer avant l'imprégnation de résine (le feutre indélébile ne résiste pas à la résine : cf photo)

Traces laissées par le marqueur indélébile incrustées dans la fibre



- scotcher ensuite au double face blanc des chutes de PETG (largeur 1,5 cm min) pour imiter le contour de la vitre afin de déformer le Kevlar pour qu'elle puisse s'encastrer naturellement par la suite dans la coque (cf. photos plus loin).

Schéma du principe de l'encastrement des vitres dans la coque.



Vu les difficultés rencontrées pour tailler des bouts de PETG à la bonne taille (sans quoi de la résine s'insère entre les morceaux lors de la réalisation), **on peut aussi mettre directement une vitre complète au fond du moule**. Toutefois celle-ci ne sera pas réutilisable : la résine formant un dépôt blanchâtre en surface.

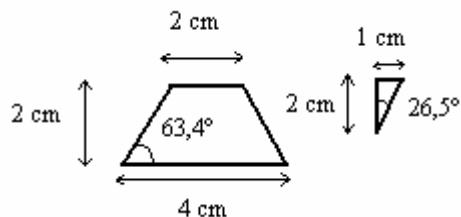
Ne pas oublier les vitres pour voir le réservoir.

- Préparer les longerons en mousse :

- Tailler les longerons à la forme voulue,

La taille des longerons triangulaires est déterminée par la largeur de la base contre-plaquée du châssis et par la hauteur des vitres sur la coque.

Taille des longerons vus de coupe



Les longerons servant de lisse s'arrêtent où commence le moule supérieur. Ceux-ci ne doivent pas être coupés au niveau de l'arceau principal (ou maître couple). Il s'agira tout simplement de poncer le maître couple afin que le tout s'adapte (prévoir l'extincteur).

En revanche, ceux-ci s'arrêtent au niveau de l'arceau arrière.

- Les courber à l'aide d'un décapeur (disponible au labo composite).

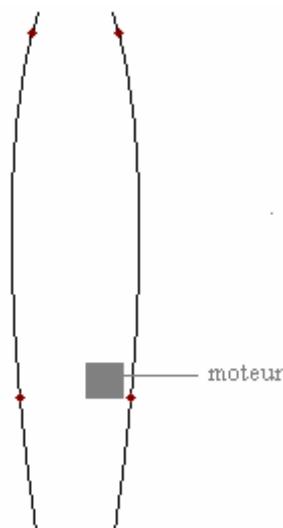
Attention à ne pas trop chauffer, sinon la mousse se détériore, elle se creuse, voire même fond en cramant. C'est assez difficile et il faut être patient. On peut soit les chauffer directement dans le moule, soit les chauffer en utilisant les gabarits. Dans tous les cas, il est assez délicat d'obtenir la bonne courbure. Un petit défaut est acceptable puisque le vide assurera ensuite la forme exacte de la coque.

- Tailler l'arceau arrière au fil chaud en scotchant les gabarits de chaque côté.

- Poncer ensuite l'ensemble pour obtenir un état de surface correct (du côté chauffé au décapeur notamment qui risque de s'être creuser un peu) et arrondir les longerons pour faciliter l'application du Kevlar.

Les lisses ont été entrecoupées par de l'uréole (bois reconstitué) collé à l'époxy pour solidifier la zone de mise en place des tétons. **Ces morceaux ne sont actuellement pas idéalement placés. Le tuyau d'échappement et le système de pression touchant la paroi arrière droite de la coque, il serait préférable de placer les tétons comme explicité ci-après :**

Emplacement conseillé des tétons



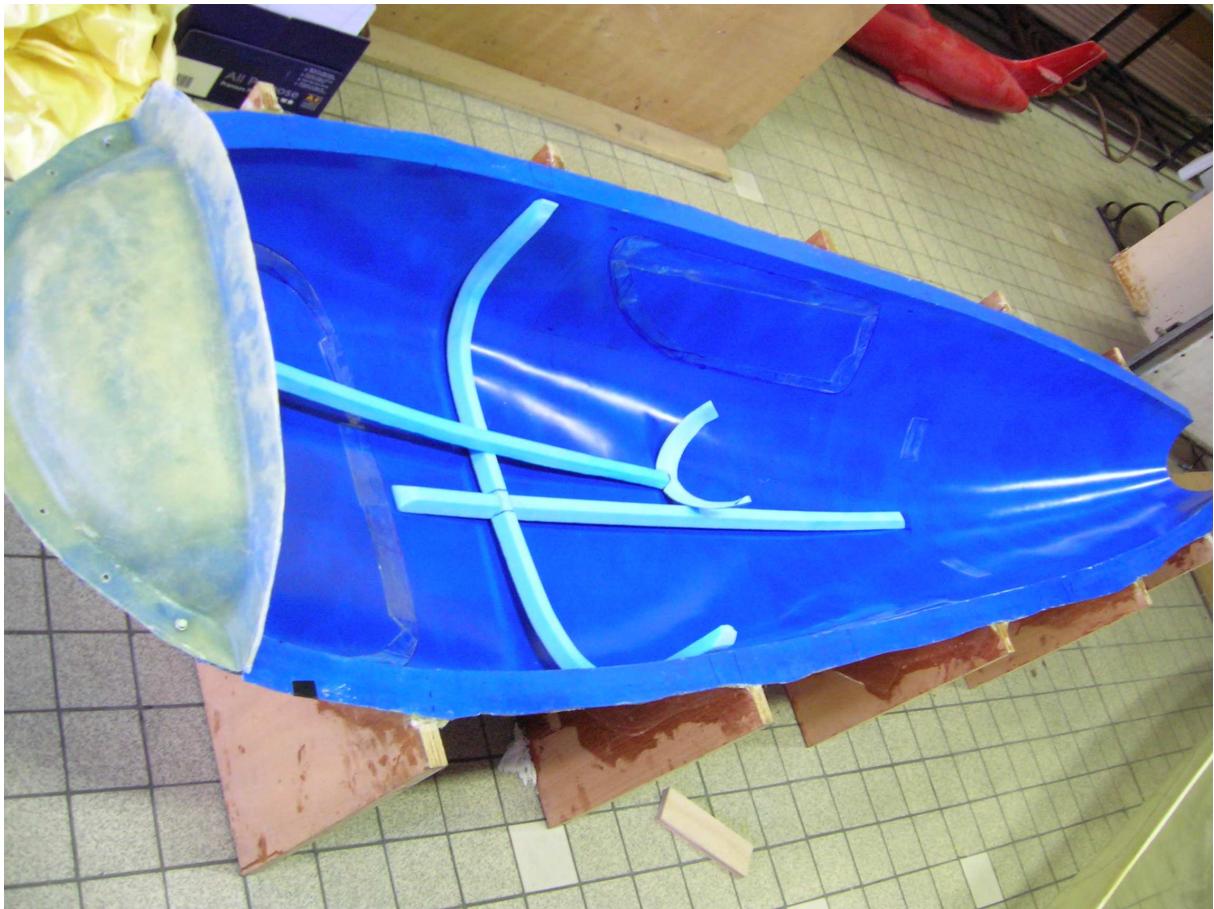
En effet au milieu la rigidité est assurée par l'action conjointe de la bande d'unidirectionnel (UD) de Kevlar au niveau du maître couple et les crochets de fixation au niveau du pilote.

Tout à l'arrière, c'est l'arceau qui assure la rigidité.

Il faut penser en outre au passage du dossier du pilote au milieu de la lisse de soutien centrale. Cette lisse est prédécoupée à la largeur du siège au préalable et une cale en bois (contre plaqué de 4 cm de largeur et de 0,5 cm de hauteur maximale) est taillée pour remplacer ce trou, afin d'éviter un déplacement des lisses lors de la mise sous vide.

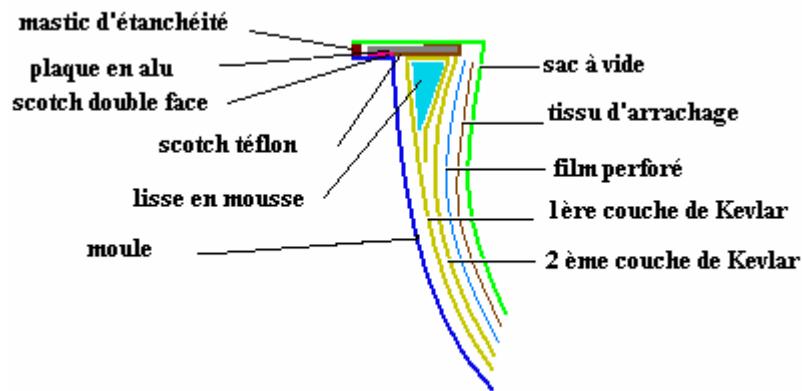
Les bouts de lisse sont collés entre eux à l'époxy de façon à ne pas bouger lors de l'imprégnation.

Formes des longerons obtenues



- Préparer des bandes en alu pour retenir les lisses lors de la mise sous vide.

Détail de la fabrication du support de la base de la coque



Celle-ci était initialement en bois mais sur une telle longueur le bois est bien souvent vrillé ce qui rend difficile l'application lors du montage (même si le vide les plaque sans problème par la suite). L'aluminium de 2 mm d'épaisseur devrait suffire, néanmoins 5 mm seraient souhaitables si on veut créer une jupe. Bien penser à l'ébavurer pour éviter qu'il perce le sac à vide. Il faut y mettre du scotch en téflon pour éviter que la résine ne prenne sur ces bandes.

Il ne faut pas les mettre tout de suite sur le bord du moule car elles gêneraient.

- Découper les tissus techniques :

- Découper les couches de Kevlar. On utilise pour cela des ciseaux en céramique.

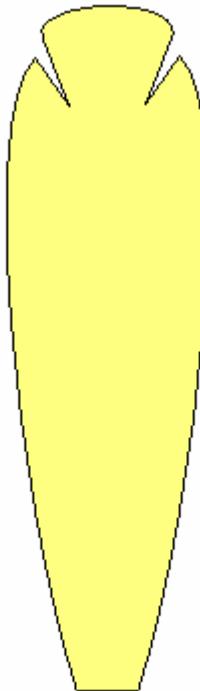
- Pour la première couche, il suffit de dérouler du tissu de Kevlar au fond du moule et de mettre la coque en fibre de verre par-dessus afin de bien le plaquer.

Il est important de dérouler le Kevlar parallèlement à la voiture afin que les principales contraintes soient reprises dans l'axe des fibres et non pas de biais (surtout pas à 45° par exemple !)

On utilise ensuite une cale (minimum 6 cm) pour déterminer la marge que l'on garde. **Il vaut mieux avoir trop de marge que pas assez** : la coque en fibre de verre laisse toujours des replis qui font que l'on est finalement plus court que prévu.

Pour découper l'avant, on se contentera des deux principales découpes permettant de conserver la symétrie du Kevlar.

Forme finale de la couche de Kevlar découpée



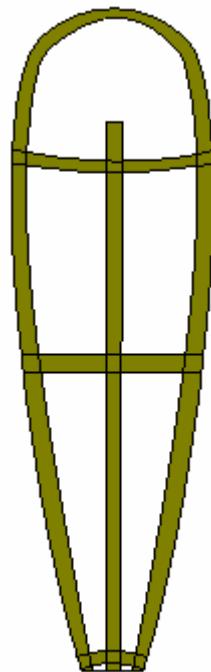
- Pour la deuxième couche de Kevlar, on peut penser qu'il faut prévoir moins de marge et de la place pour l'arceau principal : c'est une erreur. Il est très important que le Kevlar dépasse plutôt qu'il vienne à manquer. Il faut découper de la même façon que précédemment en prévoyant davantage de marge en longueur et la même marge en largeur.

Attention le Kevlar pour être correctement utilisable ne doit pas être plié et ne doit pas subir de contraintes sans quoi il se déforme et la découpe ne correspond plus à rien. Il faut donc le stocker en rouleaux.

- Découper les bandes d'unidirectionnelles de Kevlar

Mieux vaut les découper un peu trop longues, quitte à les recouper lors de la pose. Ce sont elles qui assureront la rigidité de la coque, c'est pourquoi, il faut les faire chevaucher totalement.

Forme des bandes d'unidirectionnelle de Kevlar à découper



La bande d'UD centrale n'est pas présente sur la coque 2006. Elle permet de rigidifier la zone située au niveau du siège du pilote qui est une zone risquant de vibrer sous l'effet du vent.

- Découper le film perforé

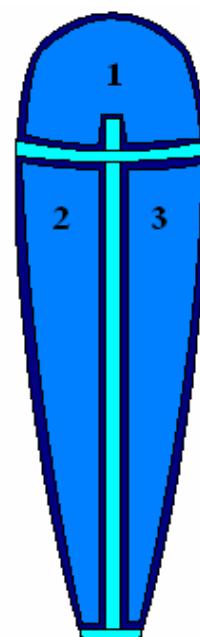
Découpe du film perforé



On en découpe d'abord un morceau de la même façon que précédemment, en utilisant la coque en fibre de verre.

Attention, il ne se comprime que très peu, c'est pourquoi, il faudra le découper suivant les lisses en mousse, pour obtenir ainsi 3 morceaux :

Forme des morceaux



- Découper toujours avec la même méthode le tissu de drainage. Celui-ci est compressible, on pourra donc le garder d'un seul bout même s'il fait des plis lors de la pose.

Découpe du tissu de drainage



- Découper le sac à vide. Celui-ci devra être bien plus large et plus long que la voiture afin de ne jamais être tendu. Il n'est pas nécessaire de s'aider du moule pour le découper, un morceau rectangulaire de 4 m sur 2 m fera l'affaire.
- Découper les morceaux de tissu d'arrachage (rouleau rose visible sur la photo précédente) à mettre dans les zones devant subir un collage par la suite (morceau de mousse à l'avant, fixation sur les côtés).
- Nettoyer le moule en passant un chiffon antistatique. On sort les impuretés par le bout du moule, laissé ouvert pour le moment.

- Appliquer de l'agent démouleur avec un chiffon adapté (morceau de tissu de drainage) sur le moule et le polir avec ce même type de chiffon. Il ne faut pas hésiter à en mettre beaucoup, pour faciliter le décollement du moule par la suite. On en mettra beaucoup sur les morceaux de PETG notamment.

En revanche, on évitera d'en mettre sur le bord plat du moule afin de permettre la pose de scotch.

Agent de démoulage durant le séchage



On laisse sécher 20 minutes. Puis on repasse le chiffon, ce qui a pour effet de polir le moule, lui donnant un aspect luisant. La présence d'agent de démoulage est difficilement repérable.

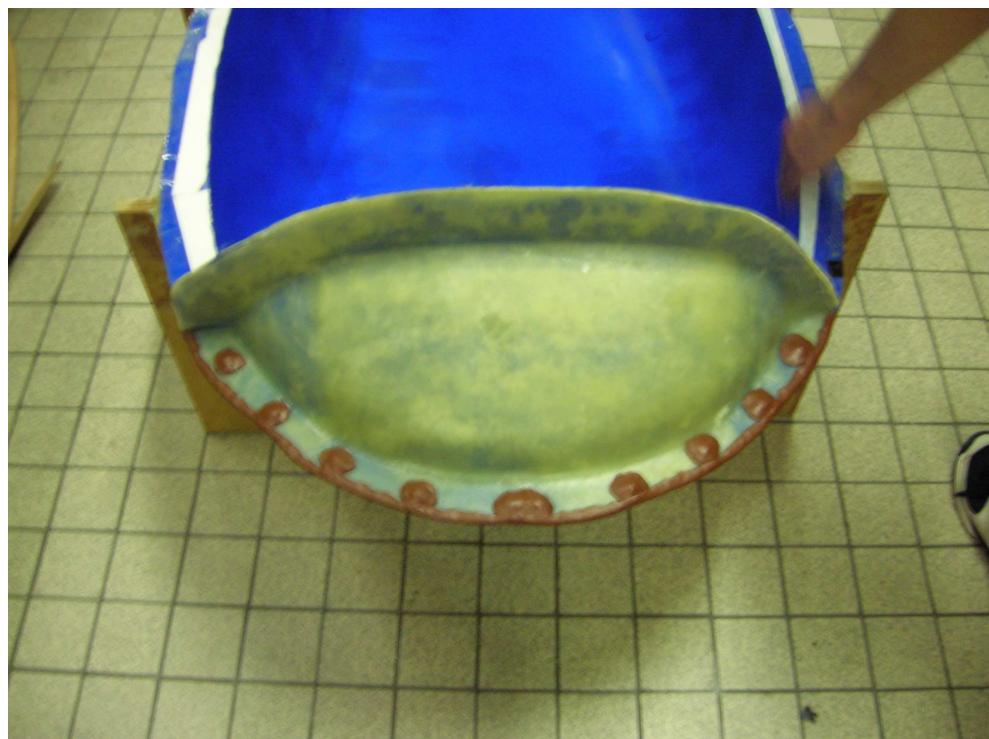
Moule lustré



- Visser au bout du moule la plaque en alu prévu à cet effet. Bien l"enduire d'agent de démoulage également.

- Assurer l'étanchéité au niveau des vis à l'avant et à l'arrière à l'aide de mastic :

Détail du masticage à l'avant



Détail du masticage à l'arrière



- Mettre sur le bord du moule une moitié de scotch double face pour permettre la pose des bandes d'alu et une moitié de scotch transparent simple face évitant d'enduire la zone de résine pour permettre la pose du mastic. Les deux scotchs ne devront surtout pas se superposer puisque l'on retirera le scotch transparent au moment de la pose du mastic.
- Mettre les couches de Kevlar à l'étuve à 60° pendant 2h. Attention à bien le mettre en rouleau, avec ou sans le carton. Cette étape améliorera l'imprégnation du Kevlar par la suite.
- On pourra ajouter du gel coat sur le démoulant afin de préparer la surface à être peinte par la suite. Sans ce gel coat, la surface ne pourra pas être peinte après la polymérisation de la résine car le Kevlar est poreux. Il faudrait donc ajouter une couche de mastic, puis la poncer pour pouvoir peindre, ce qui représenterait une perte en poids considérable.

III) Réalisation (4 heures)

La réalisation est très stressante et nécessite une équipe de trois personnes au minimum (un préparateur de mélange et deux personnes qui imprègnent), présente en permanence pendant 2 à 4 h si tout se passe correctement. Comme souligné dans l'introduction, la réalisation d'une coque sous vide n'est efficace que si la résine n'est pas encore trop visqueuse. Au bout de 6 heures, c'est trop tard.

Les étapes décrites ci-après doivent être minutieusement suivies, il n'est plus question d'hésiter lorsque le Kevlar a commencé à être enduit du mélange résine durcisseur. C'est pourquoi, il faut également bien surveiller que toutes les étapes précédentes ont été accomplies.

- Mettre deux largeurs de papier kraft sous la zone de travail
- Dérouler la première épaisseur de Kevlar au fond du moule
- Préparer le mélange résine-durcisseur par blot de 50 g de résine dans des verres en plastique. Les proportions exactes du mélange sont de 38 g de durcisseur pour 100 g de résine. Il y aura donc ici 50 g de résine pour 19 g de durcisseur, à mesurer à la balance électronique. Il sera nécessaire de refaire des mélanges à peu près toutes les 10 minutes.

Attention à ne pas intervertir, les pots de résine et de durcisseur ou leurs bouchons en mettant un nom au feutre sur chacun de ces éléments. Un échange des bouchons empêche l'ouverture des pots par la suite.

Attention également à bien mélanger la résine et le durcisseur pendant au moins 30 secondes sinon le mélange n'est daucun effet.

- Commencer à appliquer la résine au pinceau sur l'épaisseur de Kevlar.

Le but est d'imprégnier l'ensemble du tissu de résine et de durcisseur, absolument de retirer toutes les bulles. Retirer toutes les bulles prendrait trop de temps et sont de toutes façons supprimer par le vide bien mieux qu'avec le pinceau.

C'est pourquoi, on procèdera en 2 étapes pour chaque couche :

- On enduit l'ensemble de Kevlar de résine. Le tissu va devenir plus collant et ainsi plus facilement applicable. Il ne faut pas hésiter à en mettre beaucoup : le vide permettra d'en éliminer l'excès.
- On s'assure du bon placement de la feuille au fond du moule. Si on a prévu suffisamment de marge, cette opération ne devrait pas poser de problèmes.

Il sera toutefois un peu plus difficile d'ajuster la découpe du Kevlar de façon à ce qu'il épouse la forme du moule qui est malheureusement non développable.

Cette opération sera faite à l'aide des ciseaux en céramique, que l'on n'oubliera pas de nettoyer à l'acétone toutes les heures afin d'éviter qu'ils ne

deviennent collants. Attention l'acétone dissout les verres en plastique. Le mieux est d'en imbiber un chiffon pour nettoyer les ciseaux.

Imprégnation de la première couche



On remarque sur la photo la présence du papier Kraft sous le moule ainsi que l'utilisation de blouse et de gants. La résine est, en effet très salissante et certaines précautions s'imposent.

Pour le moment les lisses d'aluminium n'avaient pas été collées pour éviter de gêner le travail. Mais le scotch double face s'avère tout aussi gênant en s'accrochant aux morceaux de Kevlar. **C'est pourquoi, il peut être préférable de mettre la lisse en alu dès maintenant en la taillant moins large afin qu'elle gêne moins.**

Sur cette photo, très peu de bulles sont présentes, cela pourrait être bien mais cela dénote en fait d'une mauvaise stratégie de travail : trop de temps a été perdu à retirer toutes ces bulles.

- Appliquer les bandes d'UD de Kevlar en les imprégnant de la même façon. Attention au préalable à bien repérer leur placement.

- Imprégnier le longeron du fond et les couples et les mettre au fond du moule en veillant à bien repérer le centre et leur position.
- Dérouler la deuxième couche de Kevlar

Pose de la deuxième couche



- On procède à présent de la même façon que précédemment en imbibant un maximum la couche, puis en s'assurant de son placement correct. Il faudra veiller toutefois en plus, à ne pas faire trop de bulles au niveau des longerons. On découpera en dernier l'avant et l'arrière aux ciseaux en céramique.

- Imbibier les lisses de côté avec de la résine tout du long et les insérer sur les côtés

Imprégnation des lisses



On veillera à les mettre dans le bon sens. Là par exemple c'est le mauvais, c'est pourquoi il sera impossible de coller ensuite proprement la lisse contre la plaque d'alu, l'hypoténuse du triangle rectangle formé par la lisse étant à la place de son côté adjacent. Néanmoins le vide appuyant, du Kevlar et du tissu de drainage s'insèreront dans le vide laissé entre la lisse et la plaque d'alu donnant un aspect de surface suffisamment lisse de ce côté-ci de la coque 2006 : c'est le miracle du travail sous vide.

- Imbibir ensuite le bord des tissus de Kevlar pour enfermer la lisse comme décrit dans [le schéma précédent](#).

Imprégnation du Kevlar entourant la lisse



On pourra créer à l'aide de résine un léger retour de la deuxième couche sur la bande d'alu permettant d'assurer un meilleur contact entre le châssis et la coque en créant une petite jupe. On pourrait pour cela plutôt prendre une plaque d'alu de 5 mm, afin d'avoir un retour significatif.

- Mettre la cale en bois (abréger les coins pour éviter de percer le sac à vide) servant à mimer la place du siège.
- Appliquer le tissu d'arrachage dans les zones voulues en l'imbibant de résine.
- Placer ensuite le film perforé qui doit faire peu de plis et le tissu de drainage même s'il fait des plis.
- Retirer le scotch simple face présent sur les bords du moule
- Mettre du mastic tout autour

- Mettre le sac à vide et assurer l'étanchéité avec le mastic. C'est assez difficile à réaliser car la forme est non développable mais c'est important. Si le vide n'est pas réalisé correctement, il y aura plein de bulles.

Mise en place du sac à vide



- Faire le vide en reliant la pompe à vide au sac par un joint étanche de mastic (pression par rapport à la pression atmosphérique : - 0,8 bars).

Masticage assurant l'étanchéité du sac



Colmater les fuites éventuelles avec du mastic d'étanchéité. Le sac à vide fait des replis : ce n'est pas grave, ils ne marqueront que l'intérieur.

On doit voir normalement les gouttes de résine qui traverse le film perforé et imbibent le tissu de drainage.

Goutte de résine imbibant le tissu de drainage



- Faire marcher la pompe à vide pendant les 6 heures qui suivent en surveillant qu'il n'y a pas de fuites, puis l'éteindre.
- Nettoyer les pinceaux à l'acétone ainsi que toute la zone de travail (opération qui peut être réalisée simultanément aux précédentes si l'équipe est assez nombreuse)

IV) Finition (2 semaines)

- Laisser reposer la coque une journée et demi.
- Retirer ensuite le sac à vide, le tissu de drainage et le sac à vide, dévisser le moule avant, la plaque arrière et retirer les morceaux de scotch sur le bord du moule.
- Démouler la coque
L'opération de démoulage est assez compliquée car il faut éviter d'abîmer la coque au cours du démoulage. On utilise pour cela un pistolet à air comprimé que l'on insère entre la coque et le moule. Si c'est encore trop difficile à démouler, on pourra utiliser une baguette de bois taillée en biseau.

Démoulage de la coque



- Découper les morceaux qui dépassent soit à la Dremel du club aéromodélisme (pour les zones droites), soit aux ciseaux (normaux mais âgés pour éviter d'abîmer des ciseaux neufs).

Attention dans le cas d'utilisation de la Dremel, si elle se bloque dans le Kevlar, la main est emportée vers l'avant. Il vaut mieux mettre sa main près du bout et aller très doucement pour être moins emporté.

Découpage à la Dremel des excédents



Le Kevlar ne se ponce pas. Il prend lorsqu'on le ponce un aspect plucheux des plus détestable pour l'aérodynamique.

- Découper la place pour les vitres avec la même méthode que précédemment. On laissera 1,5 cm de marge pour les coller.

Découpage de l'encastrement pour les vitres



- Ajuster les vitres en les recoupant progressivement aux ciseaux à courbe, mais ne pas les coller tout de suite (les trous pratiqués seront pratique pour manipuler la coque et l'usage de résine par la suite risquerait de les tâcher). Cette opération est longue (2 à 3 h) et minutieuse mais est nécessaire pour un bon ajustement des vitres.
- Percer ensuite les trous pour passer les tétons en vérifiant leur ajustement exact aux trous dans le châssis. On utilisera une mèche en carbure de 6 mm de diamètre, disponibles au local composite.
- Mettre en place le bloc à l'avant :
 - Découper le bloc de mousse de 6 cm d'épaisseur (polyuréthane 28 g/cm³) à l'aide d'un fil chaud disponible au local composite en utilisant les gabarits de la voiture.
Serrer le dispositif à fil chaud avec un sert-joint et faire tourner le bloc de mousse.
Cette opération est lente car la mousse utilisée est très difficile à couper, même à bonne température. Cette température se trouve en regardant le dépôt présent sur le fil : s'il y en a trop, c'est que la température utilisée est trop

faible. Malheureusement la température adéquate découpe aussi les gabarits en contre-plaqué.

Le mieux est de se placer loin du gabarit et de reponcer ensuite au mieux. Attention à ne pas plier le fil en appuyant sans quoi il finit par se casser, il faut laisser fondre la mousse. Il vaut mieux utiliser un masque pour réaliser cette opération ainsi que les opérations de ponçage car cette mousse produit beaucoup de poussière.

Découpe au fil chaud du bloc avant



- Retirer le tissu d'arrachage :

Retirement du tissu d'arrachage



- Coller le bloc de mousse en appliquant au pinceau un mélange résine-durcisseur en marquant la zone de pose sur la coque au préalable.
- Appliquer au pinceau une feuille de Kevlar avec le même mélange.

Collage et fixation à l'aide d'une feuille de Kevlar



- Préparer les fixations sur les côtés
 - Retirer le tissu d'arrachage
 - Bien repérer la position des trous à percer dans la coque en la plaçant sur le châssis.
 - Percer en utilisant une mèche en carbure adaptée au Kevlar (avec 3 pointes)
 - Tailler les renforts contre-plaqués (épaisseur 2 mm)
 - Les coller à l'époxy
 - Bien visser les fixations. Cette étape est essentielle : il ne faut pas que les crochets ballottent. Sans cette précaution, un jour de vent, les crochets risquent de sortir tous seuls de leur encastrement et le vent pourra s'engouffrer soulevant brutalement la coque (ce qui est arrivé en 2006).

Dispositif de fixation de la coque au châssis



- Mettre les vitres avec du scotch double face transparent très résistant, qui ne se désagrège pas.
- On pourra mastiquer l'intervalle entre les vitres et la coque (mastic blanc)
- Enfin, elle pourra être peinte à la peinture aéronautique, en mettant des protections sur les vitres.

V) Liste du matériel nécessaire à la réalisation

- 7 m de rouleau de Kevlar (épaisseur 2 dixième de millimètre, poids 64 g par m²) de largeur 1,30 m même si 1,20 m peuvent convenir mais laisse certaines zones non recouvertes (coque de 2006), à acheter chez **Gâches Chimie**.
- 10 m d'unidirectionnel de Kevlar, à commander sur **Internet**.
- 1 kg de résine, à acheter chez **Gâches Chimie**.
- 1 kg de durcisseur, à acheter chez **Gâches Chimie**.
- 3 m de longeron trapézoïdal, 6 m de longerons triangulaires (dimension explicitée dans le rapport) en mousse haute densité (bleue), disponibles au local composite.
- un longeron d'uréole triangulaire de 30 cm de longueur, disponible au local composite.
- un bloc de mousse en polyuréthane (28 g par cm³) de 5 cm d'épaisseur pour l'avant (6 cm dans les faits parce que nous n'avons pas de gabarits de l'avant de la voiture espacés de 5 cm, ce qui compliquait la découpe), disponible dans un entrepôt du local composite
- du scotch double face type : gala (bande large jaune, scotch blanc à toute épreuve) à acheter chez **Leroy Merlin**
- du scotch double face transparent solide (qui ne se désagrège pas quand on le retire) disponible au local composite
- des chutes de PETG, à acheter chez **Vinc**
- deux plaques en alu à la forme du bord du moule soit de 2 mm, soit de 5 mm si on veut réaliser une jupe(elles étaient en bois cette année), disponible à l'atelier.
- du scotch en téflon (qui résiste à la résine), disponible au local composite.
- 50 cm² de tissu d'arrachage, disponible au local composite.
- de l'agent de démolage en pâte (pour éviter de patauger dedans), disponible au local composite.
- 3 m de film perforé, disponible au local composite.
- 3 m de tissus de drainage, disponible au local composite.
- 4 m de sac à vide, disponible au local composite
- du mastic à étanchéité marron, disponible au local composite.
- une plaque d'alu pour fermer l'arrière (2 mm), disponible à l'atelier.