



PROJET DE FIN D'ETUDES

Conception d'un Monocoque
Carbone



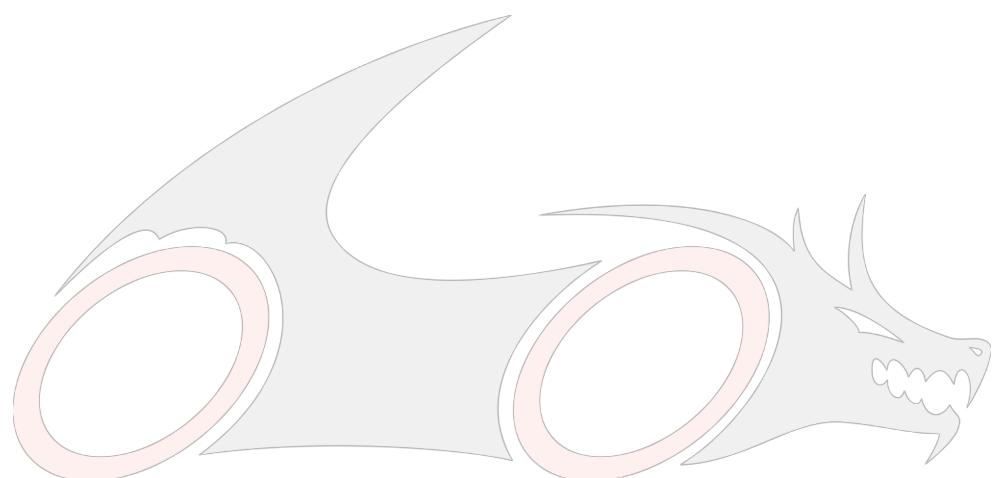
Ingénieurs : KOCH Morgan
BIZET Romuald



Altair

Sommaire

Présentation.....	3
I. Etat de l'Art.....	4
a) Types de Fabrications.....	4
b) Caractéristiques des Moules.....	9
c) Aspect économique des différents procédés.....	10
d) Choix pour la réalisation du monocoque carbone.....	11
e) Théorie du Composite.....	12
f) Contraintes de Conception à Prendre en Compte Durant la Réalisation.....	16
II. Budget.....	23
III. Conception du monocoque	24
IV. Simulation du monocoque	26
a) Préparation du modèle	26
b) Processus d'optimisation d'un matériau composite dans Hyperworks.....	35
c) Résultat de l'optimisation.....	46
V. Conclusion	48
a) Résultats obtenus.....	48
b) Travaux restant à effectuer	48
c) Conclusion générale.....	49
VI. Annexes	50
VII. Références	55





Présentation

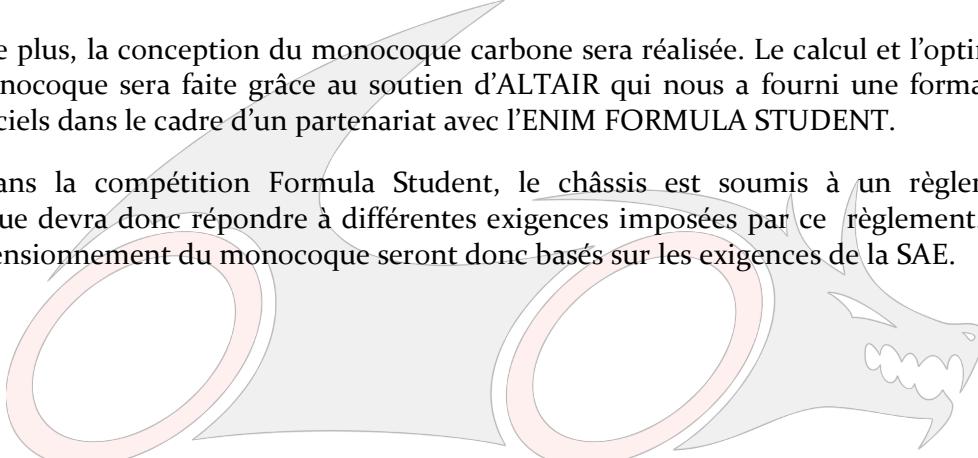
Dans le cadre de la compétition internationale *Formula Student* organisée par la *SAE* (Society of Automotive Engineers), l'équipe de *l'ENIM FORMULA STUDENT*, composée de la plupart des élèves de l'option *CMAO Sports Mécaniques*, nécessite de concevoir une monoplace de course afin de démontrer les capacités de notre école à former des ingénieurs en mécanique compétitifs et possédant un esprit d'équipe hors pair.

Afin d'anticiper les évolutions entre chaque *Formula Student* produite à l'école et dans le but d'améliorer la compétitivité, l'équipe 2012-2013 a proposé à l'*ENIM* un sujet de Projet de Fin d'Etudes qui servira aux futures équipes de l'option *CMAO Sports Mécaniques* et à tous les types de projets nécessitant l'étude préliminaire de la conception d'un monocoque carbone.

L'objectif principal de ce projet est d'effectuer la conception d'un monocoque carbone afin que les prochaines monoplaces puissent remplacer le châssis tubulaire par un monocoque carbone. L'étude à commencer par le choix du procédé qui nous indiquera si le monocoque peut être réalisé à l'*ENIM* ou bien sous-traiter. En fonction des choix un chiffrage du coût du monocoque sera réalisé.

De plus, la conception du monocoque carbone sera réalisée. Le calcul et l'optimisation de ce monocoque sera faite grâce au soutien d'*ALTAIR* qui nous a fourni une formation sur leurs logiciels dans le cadre d'un partenariat avec *l'ENIM FORMULA STUDENT*.

Dans la compétition *Formula Student*, le châssis est soumis à un règlement, le monocoque devra donc répondre à différentes exigences imposées par ce règlement. L'étude et le dimensionnement du monocoque seront donc basés sur les exigences de la *SAE*.



I. Etat de l'Art

a) Types de Fabrications

1. Le procédé d'infusion

Le procédé d'infusion est l'injection sous vide d'une résine basse viscosité dans un stratifié. Les couches de renforts sont appliquées à sec dans un moule, ce moule est ensuite mis sous vide. Le vide créé permet de compacter le stratifié et de vérifier qu'il n'y a aucune fuite d'air. La résine pré-mixée est ensuite introduite et migre à travers le stratifié jusqu'à ce que la pièce soit totalement imprégnée.

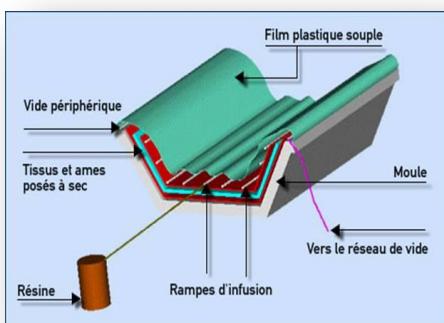


Figure 1 : Schéma de principe de l'infusion

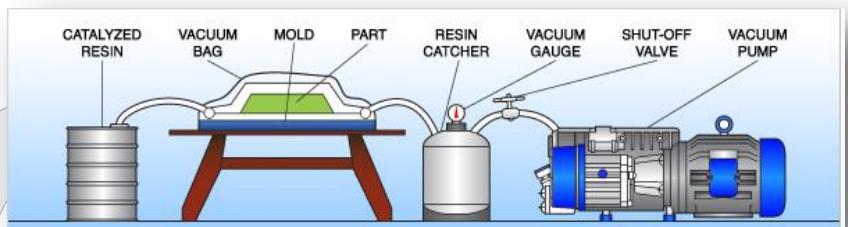


Figure 2 : Schéma de principe de l'infusion

Avantages de l'infusion :

L'infusion est un procédé économique : le stockage et le transport sont faciles (pas de congélation), le coût de l'outillage est réduit (pas de moules haute température).

- L'infusion nécessite peu de matériels supplémentaires, pompe à vide, filtre à résine, conduits de résine et de vide, connecteurs de vide, mélangeur de résine (le mélange peut également être réalisé manuellement).

Inconvénients de l'infusion :

- L'infusion est basée sur deux principes physiques: la perméabilité et la différence de pression. Il n'y aurait pas de migration de la résine si les renforts n'étaient pas poreux ou si la pression était constante. Ces paramètres sont difficiles à évaluer sans perte de temps, de matière et d'argent.



- Une simulation est nécessaire pour visualiser le parcours de la résine dans le moule. Il faut que la résine s'infuse correctement dans tout le moule. Des modules existent dans les logiciels de conception, il existe également différents logiciels développés par les entreprises dans le milieu du composite.
- Il est difficile de contrôler le pourcentage de fibre et de résine sur tout le moule.
- De plus, trois infusions seront nécessaires, donc trois manipulations, une pour la première couche de carbone, la deuxième pour les renforts et une autre pour la couche finale de carbone.

2. Le carbone

Le procédé de fabrication :

Le procédé de fabrication des fibres passe par plusieurs étapes :

- La matière première : l'Acrylonitrile (un sous-produit du pétrole) subit une dissolution par un solvant, puis une polymérisation, un filage et des traitements spécifiques pour obtenir le PolyAcryloNitrile (PAN) que l'on nomme aussi précurseur.
- Le PAN passe ensuite par une phase de stabilisation et de réticulation par injection d'oxygène à 200-300°C (le PAN devient alors infusible), puis par une phase de carbonisation en atmosphère inerte entre 1200 et 1500°C (la fibre acquiert sa résistance). Cette phase de carbonisation ne dure que quelques minutes.
- Deux possibilités à ce stade :
 - Fibres de carbone standard (Fibre Haute Résistance et Module Intermédiaire) : traitement de surface par électrolyse pour permettre l'accrochage des résines (ensimage), puis gainage par résine époxy avant bobinage.
 - Fibres de carbone haute résistance (Fibres Haut Module) : graphitisation (cristallisation) à environ 2000°C, puis traitement de surface, gainage et bobinage.

La matière première qui vaut de l'ordre de 2 Euros/Kg donne naissance à des produits dont le montant s'élève de 200 à 1000 Euros/kg



Les procédés de transformation :

Plusieurs procédés de transformation sont utilisés suivant les produits fabriqués:

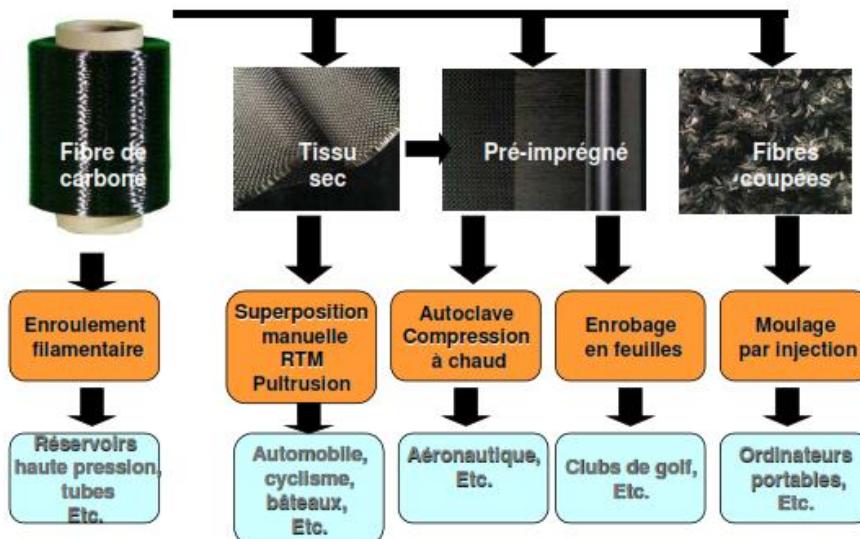


Figure 3 : Procédés de transformation

Les fibres de carbone peuvent être utilisées suivant différents agencements en fonction de la destination des produits :

- Enroulement filamentaire : pour la fabrication des tubes et des réservoirs haute pression en particulier,
- Produits pultrudés :
 - les joncs standards (section ronde de 2 à 12 mm de diamètre) : dans le cas où de fortes contraintes sont en jeu : offshore en grande profondeur, en génie civil pour des ouvrages haubanés,
 - les joncs à haute tenue thermique : utilisés comme armature de renfort ayant une excellente résistance à la fatigue et ne subissant pas d'oxydation dans le temps,
 - les plats (section rectangulaire) : principalement pour le génie civil, ces produits ayant une faible densité et de très bonnes propriétés mécaniques, d'où un gain de poids.
- Moulage par injection : avec des fibres en morceaux (de quelques dixièmes de mm de longueur) enrobées dans un résine, de façon à obtenir des produits ayant des caractéristiques identiques dans plusieurs directions, par exemple les capots de voitures et les caissons d'ordinateurs.

- Produits tissés et mats : il y a deux types de tissus, le tissu sec et le pré-imprégné, chacun peuvent avoir différents tissages.

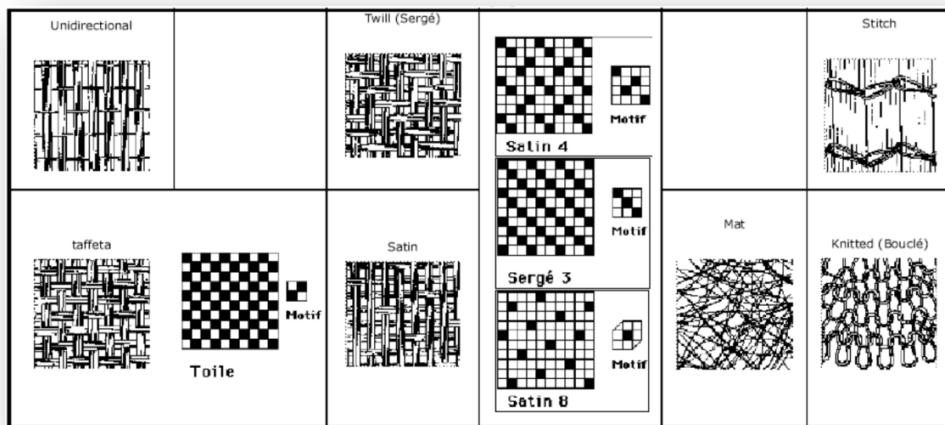


Figure 4 : Types de tissages

- Tissus secs : maillage de fibres ; pour l'automobile, les bateaux...
- Pré-imprégnés : Les «prepregs» ou «pré-imprégnés» sont des demi-produits, de faibles épaisseurs, dont les fibres sont parallèles et jointives avec un enrobage de résine, prêts à l'emploi pour l'utilisation en fabrication. Ce composite fortement chargé est destiné au moulage à chaud sous pression pour fabriquer un produit fini, produit surtout destiné aux industries automobiles et aéronautiques. Le cycle standard de cuisson est de 8 heures à 75°C (167°F), avec une pression située entre 0.8 and 3 bar. D'autres cycles de caisson peuvent être utilisés :
 - 65°C (149°F) 16 heures
 - 90°C (194°F) 90 minutes
 - 120°C (250°F) 40 minutes

Avantages des pré-imprégnés :

- L'avantage par rapport à l'injection d'une résine dans un renfort sec est une meilleure tenue à l'impact grâce à la présence de thermoplastique dans la résine.
- Un autre avantage est que le pré-imprégné colle sur lui-même ou sur un moule, ce qui permet une mise en position plus facile.
- Le pourcentage de fibre et de résine est connu.
- Faible pression de moulage, de 0,8 à 3 bar



Inconvénient des pré-imprégnés :

- Les pré-imprégnés se conservent à basse température (-18°).

La transformation des pré-imprégnés :

Lors de la polymérisation, une pression doit être appliquée sur le stratifié, différents moyens sont utilisés :

- Sous vide dans une membrane et chauffé dans une étuve (figure 5). Une étuve est un dispositif qui permet de réaliser des pièces de grandes dimensions. Le système de chauffage installé doit permettre de monter au-delà de 250°C. L'investissement pour une étuve est relativement élevé; cependant, cela permet de mouler tous types de pièces et surtout de travailler dans un environnement propre.
- Sous vide dans une membrane et passage dans un four autoclave (figure 6) avec une pression de 2 à 15 bars. L'autoclave est similaire à une étuve excepté le fait qu'une pression est appliquée sur la pièce dans l'enceinte chauffée. Ce dispositif par rapport à une étuve permet la fabrication de structures composites de grande qualité avec un contrôle de l'épaisseur et un minimum de taux de vide. Naturellement, l'investissement sera plus important et les temps de cycles plus longs. Cette technique garantit la fabrication de pièces composites de très haute qualité.



Figure 5 : Etuve



Figure 6 : Autoclave

b) Caractéristiques des Moules

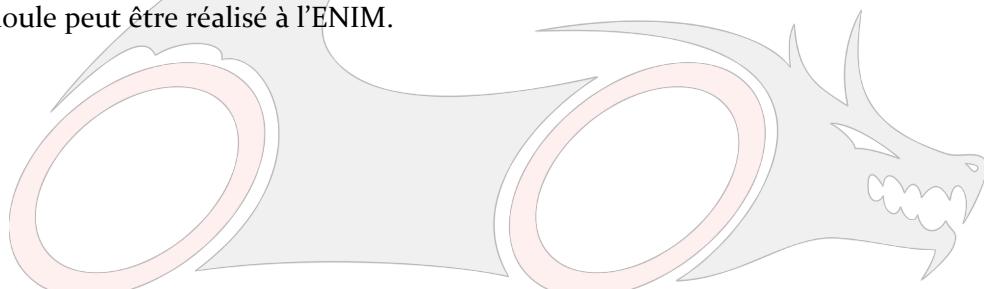
Il existe différents types de moules, selon leur tenue à la température on choisira une étuve ou un autoclave.

Les moules qui peuvent être utilisés à basse température sont :

- En mousse PU : Ils peuvent être réalisés de deux manières différentes, soit découpés en tranche et reconstitués, ou bien en usinage d'un bloc. La première méthode a l'avantage de pouvoir être réalisée en interne. La mousse PU peut résister jusqu'à 120°C. L'utilisation des pré-imprégnés basse température, ayant besoin d'une cuisson à 70 ° maxi est possible dans ce cas.
- En bois, ils sont réalisés en usinage.

Les moules hautes températures ($>150^\circ$) sont :

- En aluminium poli, réalisés en usinage et en externe par rapport à la dimension du moule.
- En fibre de verre avec une résine polyamide ou BMI. Un prototypage du monocoque sera réalisé en mousse, la fibre de verre sera déposée sur ce prototype. Ce type de moule peut être réalisé à l'ENIM.





c) Aspect économique des différents procédés

Nous allons voir l'aspect économique des procédés mentionnés dans les paragraphes précédents. Le comparatif de prix entre la méthode d'infusion et les pré-imprégnés orientera notre choix sur le procédé à utiliser pour la réalisation du monocoque carbone. Sachant que si le prix est sensiblement identique, nous optons pour le pré-imprégné car il a de nombreux avantages par rapport au tissu sec.

Ce tableau est estimatif car certaines valeurs sont pour le moment inconnues, comme la quantité de carbone et de résine, qui résulte de la surface finale du monocoque carbone. Il a fallu choisir le type de renfort, le type de carbone, le type de moule ainsi que le passage au four. Pour le pré-imprégné, nous avons choisi d'utiliser des pré-imprégnés basse température (70°C) ce qui nous permet d'utiliser un moule classique de type PU (120°C).

Tableau comparatif du coût des procédés :

Coûts	Infusion	Pré-imprégnés
Carbone (75m^2)	45 €/m ² soit 3375€	56 €/m ² soit 4200€
Résine, durcisseur	500 €	
Total	3875€	4200€

Uniquement, le carbone et la résine ont été pris en compte, dans le cas de l'infusion car l'écart de prix se fait essentiellement ici, le reste du procédé étant sensiblement identique. Il faut garder à l'esprit que l'infusion demande une simulation, impose des contraintes supplémentaires et est plus longue et difficile à mettre en œuvre que du carbone pré-imprégné. L'écart de prix entre ces procédés étant très faible, il apparaît plus logique et raisonnable de s'orienter vers le pré-imprégné.

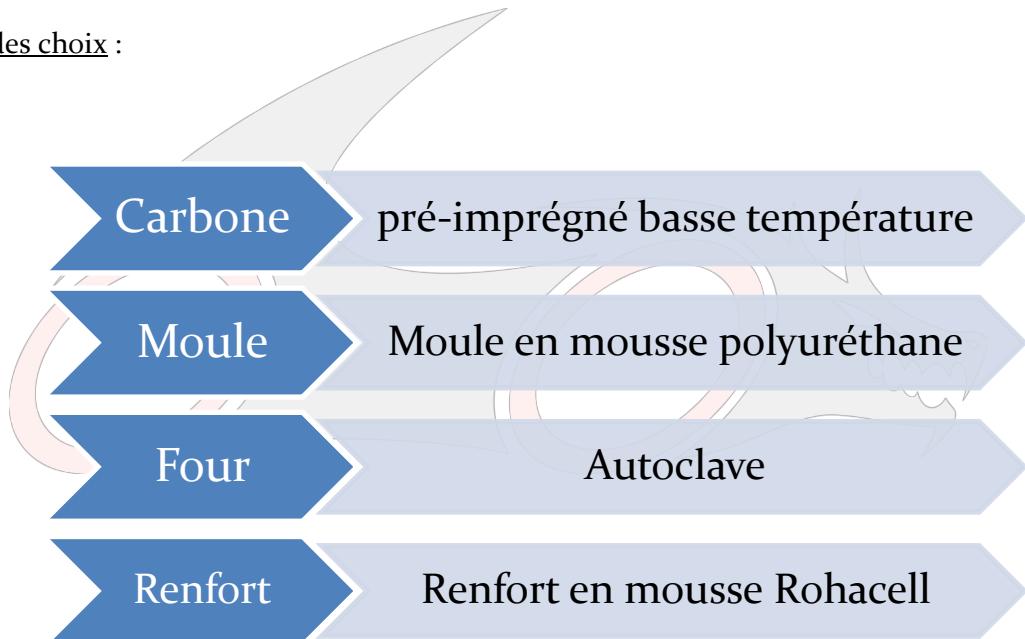
d) Choix pour la réalisation du monocoque carbone

De par la faible différence de prix entre le carbone « sec » et le pré-imprégné et la grande différence de qualité et de mise en œuvre, nous choisirons un monocoque en pré-imprégné. Au coût du carbone, il faudra rajouter le coût du matériel de mise sous vide, le coût du moule et le coût de passage au four.

Le moule en mousse polyuréthane associé au pré-imprégné basse température nous paraît être comme une solution moins coûteuse pour une qualité sensiblement égale.

Le passage du monocoque en autoclave a deux fonctions : un compactage optimum par mise sous pression couches et une cuisson permettant à la résine de polymériser. La qualité en autoclave est meilleure qu'en étuve, cependant il est très difficile de trouver un autoclave de grandes dimensions. L'étuve reste une solution de repli.

Résumé des choix :



1. Caractéristiques du stratifié

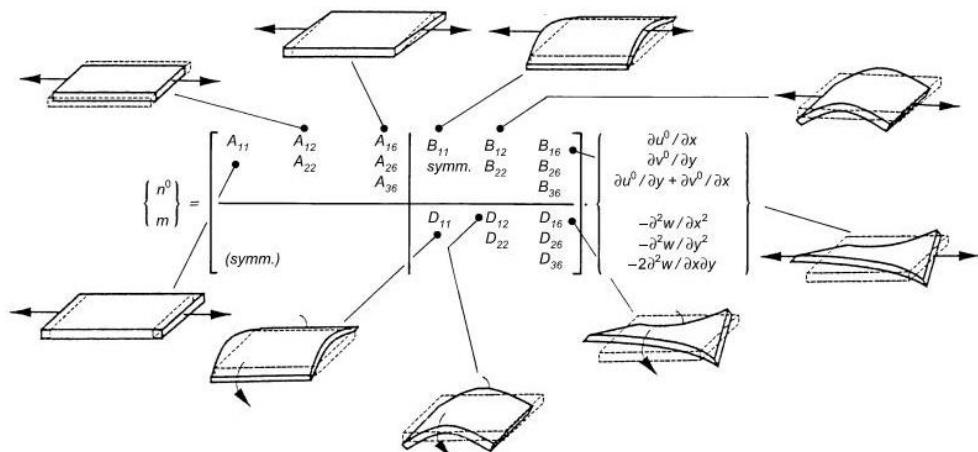
Les caractéristiques générales du stratifié sont calculées et données sous la forme du matrice.

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_{12} \\ M_1 \\ M_2 \\ M_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \\ \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_{12} \end{bmatrix}$$

shear-extension coupling bending-extension coupling contracted form
 ↓ ↓ ↓
 bending-extension coupling bend-twist coupling

La matrice ABB_D regroupe les propriétés globales du multicouche :

- Shear-extension coupling: couplage cisaillement avec la traction, il peut être réduit en équilibrant les plis par rapport à la fibre neutre
 - Bending-extension coupling : couplage flexion avec la traction, il est annulé en symétrisant le stratifié par rapport à la fibre neutre.
 - Bend-twist coupling : couplage torsion avec la flexion, il est annulé en symétrisant les $+45^\circ$.



general laminate unbalanced unsymmetrical $\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	balanced unsymmetrical $\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	unbalanced symmetrical $\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & & \\ & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$
balanced symmetrical $\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & & \\ & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	cross-ply unsymmetrical $\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}$	cross-ply symmetrical $\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & & \\ & D_{11} & D_{12} & 0 \\ & D_{12} & D_{22} & 0 \\ & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}$

Pour déterminer la matrice ABBD, Il faut connaître:

- Les caractéristiques du carbone (E₁, E₂, NU₁₂, G₁₂, G_{1Z}, Rho, Xt, Xc, Yc, Yt et S)

E₁, E₂ : Module d'Young dans le sens axe des fibres et dans le orthogonal ;

G₁₂, G_{1Z}: Module de cisaillement;

NU₁₂ : Coefficient de Poisson ;

Rho : Masse volumique ;

Xt : Contrainte limite de traction en direction x₁;

Xc : Contrainte limite de compression en direction x₁;

Yt : Contrainte limite de traction en direction x₂;

Yc : Contrainte limite de compression en direction x₂;

S : Contrainte limite à cisaillement ;

- Les caractéristiques du matériau d'âme (mousse rohacell dans notre cas) (E, NU, Rho, ST, SC et SS)

E : Module d'Young dans le sens axe des fibres et dans le orthogonal ;

NU: Coefficient de Poisson ;

Rho : Masse volumique ;

ST : Contrainte limite de traction;

SC : Contrainte limite de compression;

SS : Contrainte limite à cisaillement ;

- L'épaisseur et l'empilement des couches.



Procédure pour obtenir la matrice ABB :

Dans Hyperlamine, on crée les matériaux avec leurs caractéristiques, puis on crée le stratifié en rentrant chaque pli.

Pour chaque pli, il faut indiquer :

- Le matériau (carbone ou rohacell) ;
- L'épaisseur du pli ;
- Et l'orientation ;

Total number of plies:	10	Ply	Material	Thickness T1	Orientation Degrees
Total thickness:	21.6				
		■	1	carbone	0.2
			2	carbone	0.2
		■	3	carbone	0.2
		■	4	carbone	0.2
		■	5	rohacell	10
		■	6	rohacell	10
		■	7	carbone	0.2
		■	8	carbone	0.2
			9	carbone	0.2
		■	10	carbone	0.2

Une fois toutes les couches renseignées, on lance le calcul et on obtient la matrice ABB suivante :

Classical Lamination Theory Stiffness Matrices

*A Matrix - Membrane

```
9.429204e+005  3.551410e+005  0.000000e+000
3.551410e+005  9.429204e+005  0.000000e+000
0.000000e+000  0.000000e+000  2.938897e+005
```

*B Matrix - Coupling

```
-4.132744e-009 -9.922587e-010 -2.328306e-010
-9.922587e-010 -3.972673e-009 -2.328306e-010
-2.328306e-010 -2.328306e-010 -7.203198e-010
```

*D Matrix - Bending

```
3.906331e+007  1.406121e+007  5.355833e+004
1.406121e+007  3.842061e+007  5.355833e+004
5.355833e+004  5.355833e+004  1.233840e+007
```

On peut voir, par la matrice A, que cet empilement ne provoque pas de couplage cisaillement/traction.

Les faibles valeurs de la matrice B indiquent que le couplage flexion/traction, est quasi nul.



2. Critères de rupture

Il y a plusieurs critères : Critère de contrainte maximale / Critère de déformation maximale / Critère de Hill / Critères de Tsai-Hill / Critère Hoffman.

Parmi tous ces critères de rupture, on utilisera celui de Hoffman : Ce critère généralise le critère de Hill dans le cas tridimensionnel. Il est utilisé pour définir le domaine d'élasticité d'un matériau orthotrope en tenant compte des limites en compression :

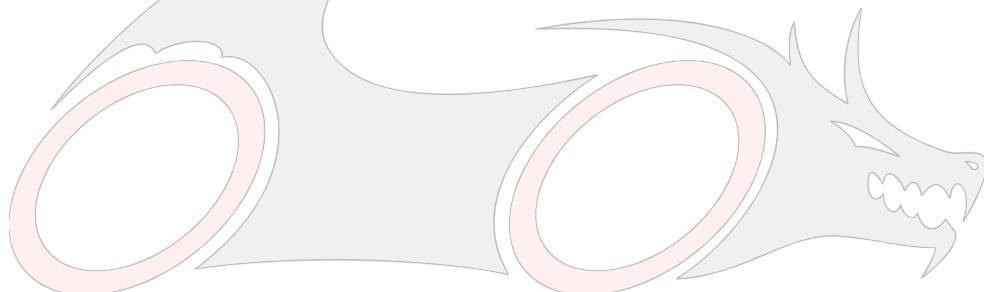
$$F = \left(\frac{1}{Xt} - \frac{1}{Xc} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Yt} - \frac{1}{Yc} \right) \sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{XtXc} + \frac{\sigma_2^2}{YtYc} - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{XtXc} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2} \leq 1$$

Critère de déclaminage :

Le critère de déclaminage est un ratio entre la contrainte maximum entre deux couches et la contrainte admissible. Il est donné par la formule :

$$FB = \frac{\max(|\tau_{1z}|, |\tau_{2z}|)}{SB}$$

Il y a déclaminage lorsque $FB \geq 1$.





f) *Contraintes de Conception à Prendre en Compte Durant la Réalisation*

1. *Contraintes du règlement FSAE*

Le règlement de la compétition est composé de plus de 150 pages, parmi lequel se trouve une partie sur le monocoque carbone. Cette partie, faisant 5 pages, nous donne déjà un bon aperçu sur les contraintes à prendre en compte. Nous allons donc énumérer les différentes contraintes inhérentes à ce règlement.

Contrainte du règlement FSAE	
T3.8 : Composite materials	<p>L'équipe doit fournir :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Les documents sur le type de matériaux et ses propriétés ○ Les détails sur la technique et le matériel utilisé ○ Soumettre une feuille de calcul prouvant l'équivalence des matériaux utilisés par rapport aux matériaux de la FSAE. <p>Les matériaux composites sont interdits dans le Main et le Front Hoop.</p>
T3.27 : Composite Space Frame	<p>L'équipe doit effectuer des essais sur les articulations utilisées dans le châssis. Ces tests doivent inclure des essais de résistance statique sur des configurations représentatives et une évaluation de la capacité des joints à traiter une charge cyclique.</p>
T3.28 : Monocoque General Requirements	<p>Tous les calculs effectués sur le monocoque doivent prouver l'équivalence par rapport à l'acier de grade SAE / AISI 1010.</p> <p>La construction d'un monocoque nécessite une feuille de calcul d'équivalence structurelle, conformément à la section T3.9. Le formulaire doit démontrer que la conception est équivalente à un cadre soudé en terme de dissipation d'énergie, de rendement, de résistance à la flexion, flambement et de tension. La feuille doit inclure: le type de matériel (s), le poids de tissu, le type de résine, l'orientation des fibres, le nombre de couches, le matériau de base, et la technique de lay-up utilisée.</p>
T3.29 : Monocoque inspections	<p>Il n'est pas toujours possible d'inspecter tous les aspects d'un monocoque lors du contrôle technique. Pour les points qui ne peuvent être vérifiés par un inspecteur, il est de la responsabilité de l'équipe de fournir des documents, à la fois visuels et / ou écrits, montrant que les exigences ont été respectées.</p>
T3.30 : Monocoque Buckling Modulus – Equivalent Flat Panel Calculation	<p>Lorsque cela est spécifié dans les règles, l'EI** du monocoque doit être calculé comme l'EI d'un plan avec la même composition que le monocoque autour de l'axe neutre du stratifié. La courbure du panneau et la section géométrique du monocoque doit être ignoré pour ces calculs.</p>





T3.31 : Monocoque Laminate Testing	<p>Les équipes doivent construire une section représentative de la zone d'impact latérale du monocoque (figure 7) comme une plaque et effectuer un test de flexion en 3 points sur ce panneau. Ils doivent prouver par un test physique qu'une section de 200 mm (7,9 pouces) x 500 mm (19,7 pouces) a au moins les mêmes propriétés que l'acier de base d'un tube de choc latéral (* : voir «Matériaux T3.4.1 acier de référence») pour la rigidité en flexion et deux tubes de choc latéral pour le rendement et la résistance ultime.</p> <p>les résultats des tests seront utilisés dans les feuilles de calcul pour tous les panneaux stratifiés. L'éprouvette doit être présentée au contrôle technique. Si l'échantillon ne satisfait pas à ces exigences, alors la zone d'impact latérale du monocoque doit être renforcée d'une manière appropriée.</p> <p>Les équipes sont priées de faire un test équivalent avec des tubes d'acier pour que la conformité du banc d'essai soit prise en compte.</p>
T3.32 : Monocoque Front Bulkhead	<p>Toute cloison avant qui supporte la plaque de l'Impact Attenuator doit avoir une résistance au cisaillement équivalent à une plaque d'acier de 1,5 mm d'épaisseur.</p>
T3.33 : Monocoque Front Bulkhead Support	<p>Le monocoque doit avoir l'EI équivalent à la somme des EI de six tubes d'acier de base qui la remplacent.</p> <p>L'EI de la structure du côté vertical de la cloison avant doit être au moins équivalente à l'EI d'un tube en acier de référence qui le remplace lorsqu'il est calculé conformément à la règle.</p> <p>La résistance au cisaillement du périmètre du stratifié monocoque dans la structure de la cloison avant doit être d'au moins 4 kN (880 livres) pour une section d'un diamètre de 25 mm (1 pouce). Ce doit être prouvée par un test physique en mesurant la force nécessaire pour tirer ou pousser un objet de diamètre 25 mm (1 pouce) à travers un échantillon de stratifié et les résultats sont dans la feuille de calcul</p>
T3.34 Monocoque Side Impact	<p>Le côté du monocoque doit avoir un EI égal à la somme de l'EI de trois (3) des tubes en acier de référence qui le remplacent.</p> <p>Le côté du monocoque entre la surface supérieure du plancher et 350 mm (13,8 pouces) au-dessus du sol (zone d'impact latéral) doit avoir un EI d'au moins 50% de la somme de l'EI des trois tubes d'acier de référence qui le remplace.</p> <p>La résistance au cisaillement du périmètre du monocoque doit être d'au moins 7,5 kN (livres 1700) pour une section d'un diamètre de 25 mm (1 pouce). Ce doit être prouvé par un test physique en mesurant la force nécessaire pour tirer ou pousser un objet de 25 mm (1 pouce) de diamètre à travers un échantillon.</p>



T3.35 Monocoque Main Hoop	<p>L'arceau principal doit être fait d'un seul morceau non coupé, en continu, d'un tube profilé en acier fermé et va jusque vers le bas de la structure monocoque.</p> <p>L'arceau principal doit être fixé mécaniquement à la partie supérieure et inférieure de la structure monocoque et en des points intermédiaires en fonction des besoins pour obtenir l'équivalence.</p> <p>Les plaques de montage soudées à l'arceau doivent être d'au moins 2,0 mm (0,080 pouce) d'épaisseur en acier.</p>
T3.36 Monocoque Front Hoop	Les matériaux composites ne sont pas autorisés pour l'arceau avant. Voir la règle T3.28 pour les exigences générales qui s'appliquent à tous les aspects du monocoque.
T3.40 Monocoque Attachments	<p>Chaque point de fixation entre le monocoque et de l'autre structure primaire doit être capable de supporter une charge de 30 kN, dans tous les sens.</p> <p>Chaque point de fixation nécessite des plaques de support en acier d'une épaisseur minimale de 2 mm. D'autres matériaux peuvent être utilisés si l'équivalence est montrée</p> <p>Le Main Hoop doit être attaché au monocoque (c'est à dire non soudé à un cadre de l'espace à l'arrière) et est toujours considéré comme "fixé mécaniquement".</p>
T3.41 Monocoque Driver's Harness Attachment Points	<p>Les points de fixations au monocoque pour les bretelles et sous-abdominale doivent supporter une charge de 13 kN (~ 3000 livres) avant la casse.</p> <p>Les points de fixations au monocoque pour les ceintures « antsubmarine » doivent supporter une charge de 6,5 kN (~ 1500 livres) avant la casse.</p>

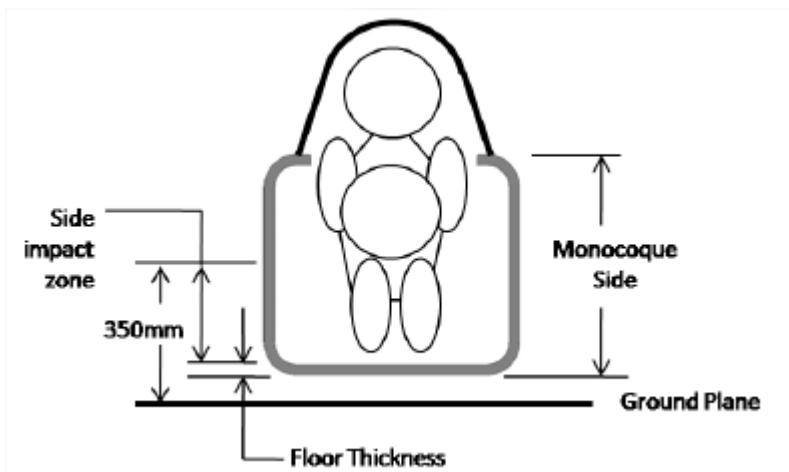


Figure 7 : Description de la zone d'impact latérale



Caractéristiques de l'acier de référence de la FSAE (*) :

Flexion et résistance à la déformation :

- Le module de Young (E) = 200 GPa (29.000 ksi)
- Limite d'élasticité (S_y) = 305 MPa (44,2 ksi)
- Résistance à la rupture (S_u) = 365 MPa (52,9 ksi)

Points de fixations soudés au monocoque ou des calculs de tubes soudés:

- Limite élastique (S_y) = 180 MPa (26ksi)
- Résistance à la rupture (S_u) = 300 MPa (43,5 ksi)

Définition de l'EI (**):

Le module de flambage (Buckling modulus) est défini comme l'EI, où E = module d'élasticité, et I = moment d'inertie sur l'axe le plus faible.

2. Contraintes de conception

En plus du règlement de la FSAE, la conception du monocoque va nous apporter d'autres contraintes :

- Le monocoque doit pouvoir s'adapter facilement à l'évolution des véhicules dans le temps (changeement moteur, changements coordonnés des attaches des trains roulants..).

Il faudra de plus tenir compte des contraintes de conception inhérente à toutes les pièces composites :

Empilement du stratifié :

Une symétrie miroir de l'empilement permet une symétrie des contraintes et évite le voilement et le gauchissement lors de la polymérisation.

Minimum technologique :

Minimum de plis de 5 à 10% suivant chaque direction à 0° , $+45^\circ$, 90° , -45° .



Respect de l'agencement suivant :

- Plis à 90° placés en surface puis plis à $+45^\circ$ ou -45° quand flux d'effort prépondérant parallèle à 0° .
- Pas plus de 4 plis consécutifs dans une même direction.

Angle de dépouille

Il faut, pour un moule monobloc, un angle de dépouille de 5 à 70 pour le moulage au contact, à moins de disposer d'un moule comportant des parties mobiles.

Épaisseur

Il n'y a pas d'épaisseur maximale, la limite inférieure est de l'ordre du millimètre ; pour le moulage au contact, il est conseillé qu'elle soit supérieure à 1,5 mm. Il faut aussi éviter les variations brutales d'épaisseur (**figure 8**) pour plusieurs raisons :

- De telles variations sont nuisibles à une bonne répartition du renfort ;
- Pour les fortes épaisseurs, en résines thermodurcissables, l'exothermicité de la polymérisation peut avoir un effet néfaste sur les faibles épaisseurs voisines (variation de température induisant des contraintes locales) ;
- Selon l'utilisation ultérieure de la pièce, il peut être préférable d'éviter des concentrations locales de contraintes mécaniques.

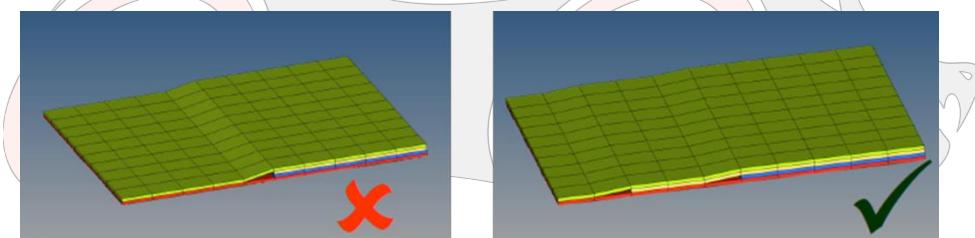


Figure 8 : Variation d'épaisseur

Ces variations brutales d'épaisseur ne concernent pas les nervures, bossages ou autres variations de formes que l'on peut utiliser avantageusement en moulage.

Rayon de courbure

Le tissu ne renfort ne peut pas épouser correctement un angle vif et des rayons inférieurs à 5 mm ce qui constituerait des zones de résine pure, donc fragiles. Les procédés utilisant des renforts sous forme de mat ou de tissu nécessitent de concevoir des pièces avec des rayons de courbure de 5 à 7 mm.



Rigidité

On peut augmenter la rigidité des matériaux composites par différents moyens :

- Augmentation du taux de renfort ;
- Orientation des renforts dans le sens où l'on veut améliorer la rigidité ;
- Disposition de nervures lors de la conception de la pièce (**figure 9**) ;
- Augmentation, partielle ou totale, de l'épaisseur ; cette augmentation d'épaisseur peut se faire, avec certains procédés, par incorporation d'un matériau sandwich qui permet d'améliorer la rigidité en augmentant très faiblement la masse de la pièce.

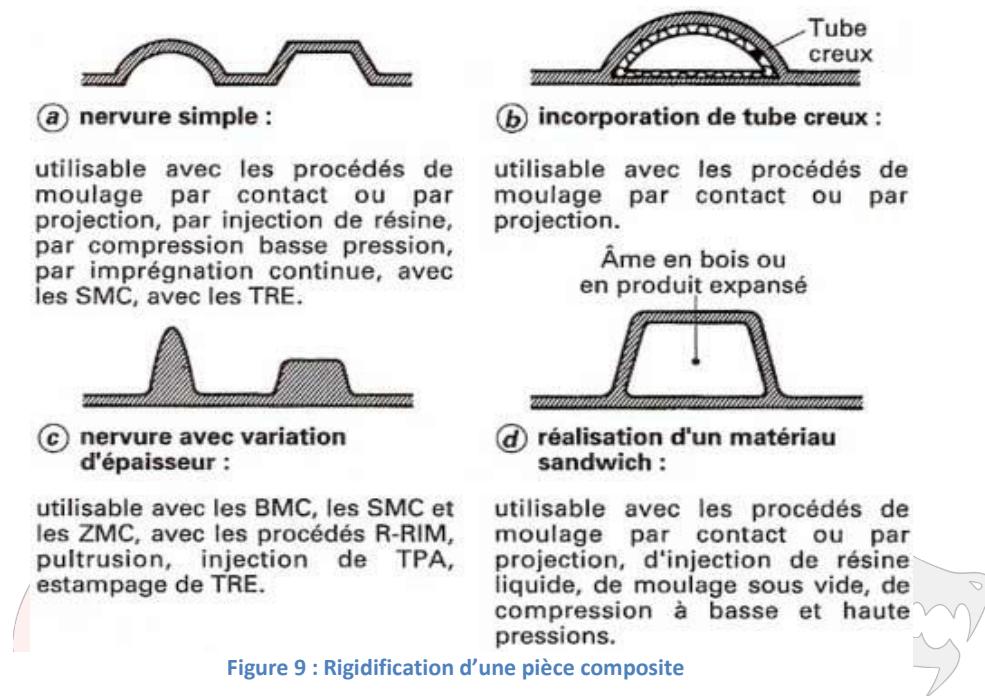


Figure 9 : Rigidification d'une pièce composite

Matériau sandwich

Il peut être obtenu directement par les procédés de moulage au contact. Il est constitué de deux parements réalisés avec une résine thermodurcissable renforcée et d'une âme de faible masse volumique (quelques kilogrammes par mètre cube). L'âme pourra être :

- Du bois de balsa ;
- Une mousse rigide de polyuréthane, de PVC, de polystyrène ou une mousse formophénolique ;
- Un nid-d'abeilles en papier imprégné de résine formophénolique, en aluminium, en matière thermoplastique ou en composite (carbone ou verre imprégné de résine époxyde).





Tolérances

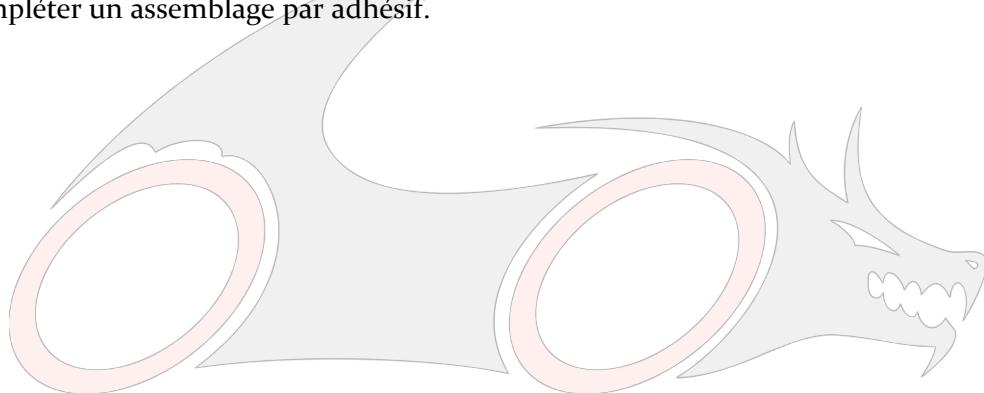
Il n'est pas possible de donner des valeurs pour les tolérances obtenues car celles-ci sont essentiellement fonction :

- De la nature de la résine utilisée ;
- Du taux de renfort moyen de la pièce moulée ;
- De la conception et de la nature du moule. Il est important de se rappeler, lors d'une conception de pièce en matériau composite, que le retrait s'effectue sur toutes les dimensions de la pièce : longueur, largeur et épaisseur.

L'orientation d'un renfort a donc une influence sur la façon dont s'effectuera le retrait, et, par conséquent, sur les tolérances dimensionnelles. Les taux de retrait, selon les matrices, sont indiqués par les fabricants.

Assemblage

L'assemblage s'effectue le plus souvent par collage, après ponçage des parties à assembler. Les adhésifs sont à base de polyuréthane, de résines acryliques ou époxydes. Dans certains cas, on réalise également des assemblages mécaniques qui peuvent éventuellement venir compléter un assemblage par adhésif.





II. **Budget**

Ci-dessous l'estimation du coût total du monocoque carbone.

Elément	Prix unitaire	quantité	Coût total
Tissus carbone	56,00 €	75	4 200,00 €
gel coat	15,00 €	1	15,00 €
Mousse (2000*1000*720)	500,00 €	1	500,00 €
Usinage	3 000,00 €	1	3 000,00 €
Tissus de démoulage	3,90 €	10	39,00 €
Matériaux d'âme (61mm x 122mm)	65,00 €	5	325,00 €
Cire (400g)	27,81 €	2	55,62 €
Mastic d'étanchéité(15m)	7,80 €	1	7,80 €
		Total	8 142,42 €

On atteint donc un total de 8142,42€ pour la réalisation d'un monocoque. Le prix du carbone affiché est celui du catalogue, mais il y a possibilité d'avoir une remise de 15%, ce qui ferait un total de 3500€. Ce qui reviendrait à 7442,42€.

A comparer au prix du châssis tubulaire, qui comprend 1040€ de tube avec le gabarit de soudure, coût estimé de 3000€ de soudure, 500€ de peinture et 2500€ de carrosserie. Soit environ 7000€.

On peut donc dire que le coût du monocoque carbone sera compétitif. Cependant il faudra négocier des partenariats pour atteindre un prix raisonnable. En effet, la soudure et la peinture nous sont offertes sur le châssis de cette année dans le cadre d'un partenariat, il faudra donc en faire de même pour le monocoque carbone.



III. *Conception du monocoque*

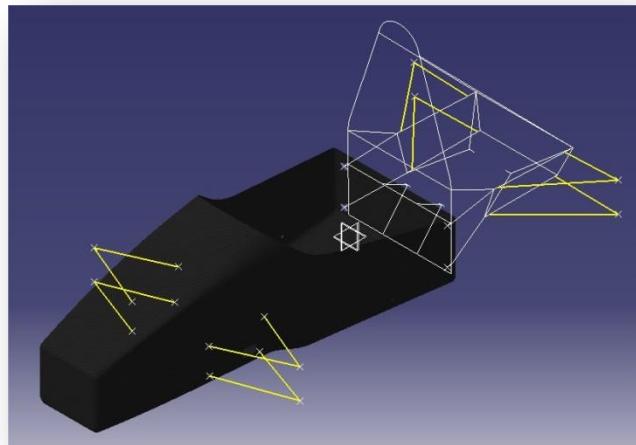


Figure 10 : Vue iso de l'assemblage

Après un état de l'art sur les monocoques en formula student, notre décision s'est portée sur un monocoque carbone pour le cockpit, assemblé à un châssis tubulaire à l'arrière afin de s'adapter facilement à l'évolution des véhicules dans le temps (changement moteur, changement coordonné des attaches des trains roulants..) sans devoir refaire un moule complet. La partie arrière n'est pas calculée, elle permet juste d'avoir les points d'applications des efforts pour le calcul de la partie carbone.



Figure 11 : Vue de face

Les points de fixations des triangles et ceux du harnais de serrage à l'entre-jambes et ventrale sont ceux de l'EFS oo6. Symbolisé par des trous, ils seront réalisés par des inserts.

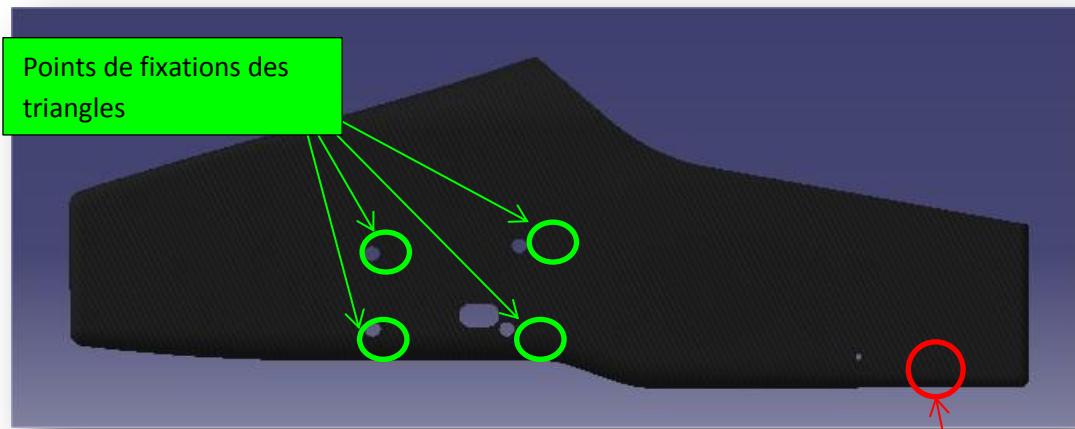


Figure 12 : Vue de côté

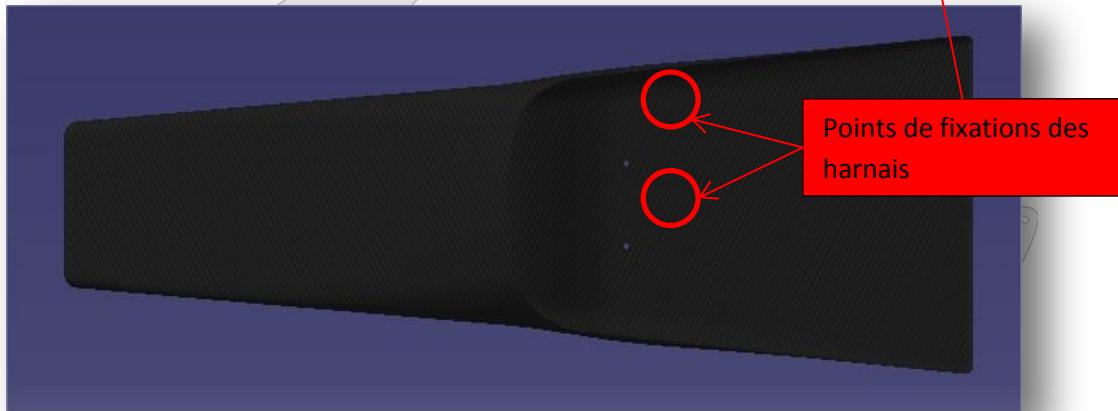


Figure 13 : Vue de dessus

La conception du monocoque s'est faite en partant des points de fixations des triangles de cette année, tout en répondant aux règles de conception. Les rayons de courbures sont élevés de façon à faciliter la mise en position des plis lors de la fabrication.



IV. *Simulation du monocoque*

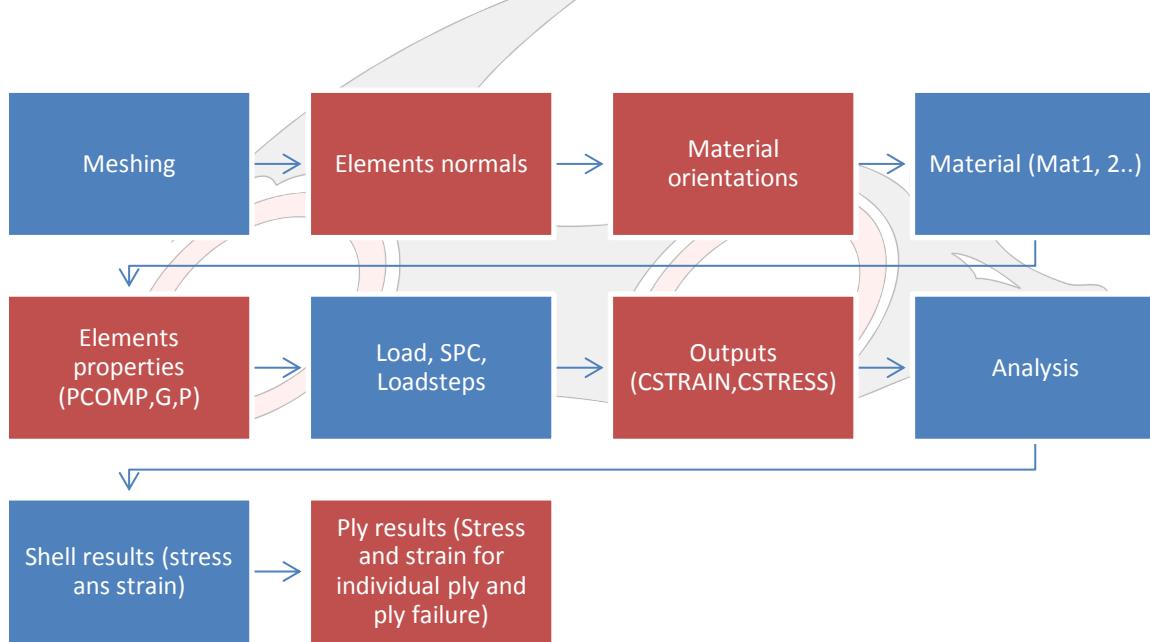
a) *Préparation du modèle*

La simulation a été faite avec la version 11.0 de la suite HyperWorks. Le pré-traitement a été exécuté avec HyperMesh, le post-traitement avec HyperView et comme solveur OptiStruct a été utilisé.

Brève description du modèle :

Il s'agit d'un monocoque avec les supports de suspension avant et arrière. Les matériaux et les propriétés de ces supports ont été créés. Des éléments poutres CBEAM ont été créés et assignés au châssis arrière ainsi qu'au triangle de suspension. La connexion entre le monocoque, la partie arrière et les suspensions ont été réalisés avec des éléments RBE2.

Les étapes à réaliser pour préparer le modèle sous hypermesh sont les suivantes :



Les étapes en bleu dans le processus sont des étapes conventionnelles pour toutes pièces dans HyperWorks alors que les étapes en rouge sont des étapes additionnelles pour les matériaux composites.

1. Crédation des éléments poutres

Des éléments poutres CBEAM ont été créés sur le châssis secondaire et sur les triangles. Ces tubes sont en acier 20CD4S comme le demande le règlement de la compétition.

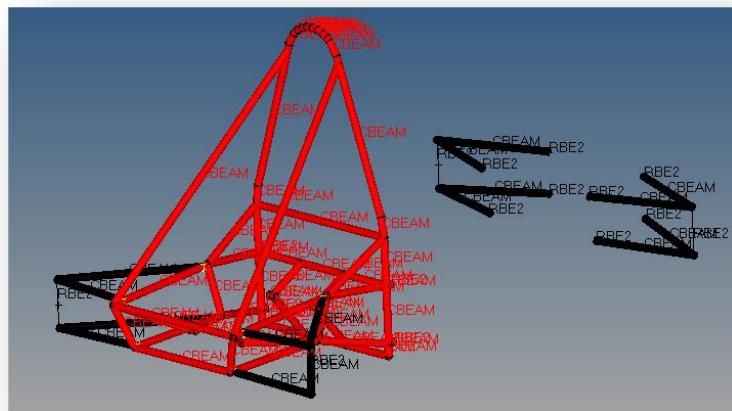


Figure 14 : Eléments CBEAM

2. Crédation des éléments rigides

Pour fixer le châssis et les triangles au monocoque, nous avons créé des éléments rigides RBE2. Ces éléments permettent d'assembler les trois composants de notre modèle.

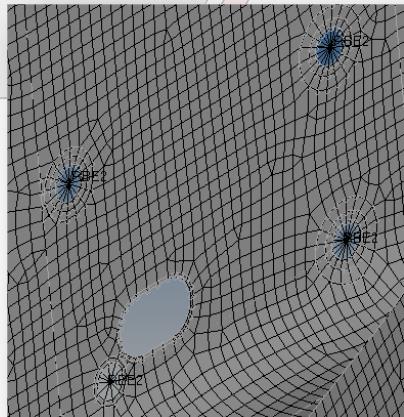


Figure 15 : Eléments rigides



3. Maillage

Le maillage du monocoque a été réalisé en élément mixed au premier ordre. Un maillage plus fin a été fait proche des trous et lieu de fixation.

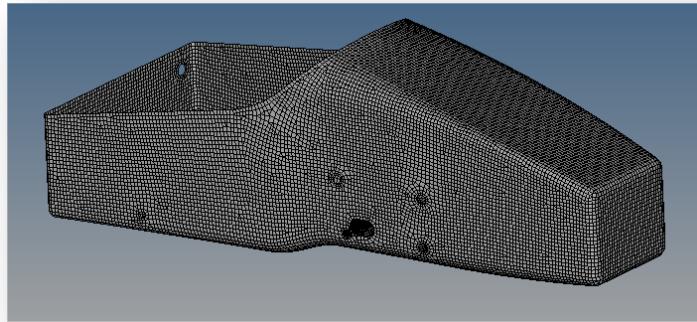


Figure 16 : Maillage du monocoque

4. Contrôler et changer la normale des éléments

Il peut arriver que les normales aux éléments de maillage pointent vers des directions différentes. Ce contrôle doit être exécuté avant chaque analyse par éléments finis avec des matériaux composites. Cette vérification est importante car elle définit l'ordre de l'empilement du stratifié. Les plis sont classés de la surface inférieure vers le haut, par rapport à la direction normale de l'élément.

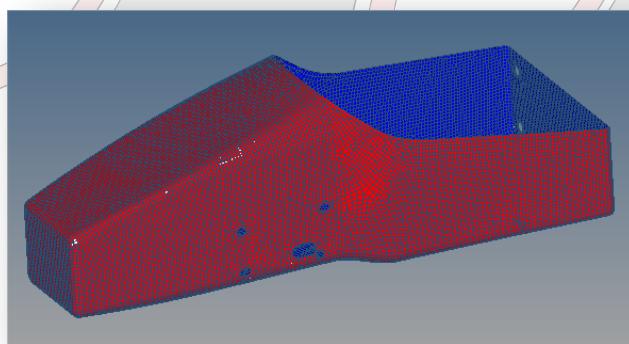


Figure 17 : Elements normals

Sur la figure ci-dessus la normale va de la surface bleue à la surface rouge.



5. Contrôler et changer l'orientation des éléments

Lors de la configuration du composite, l'orientation sur les éléments doit être vérifiée et si nécessaire être adaptée, pour être en mesure de calculer efficacement l'orientation souhaitée des matériaux anisotropes.

Ainsi, dans le modèle actuel, les surfaces de coté, de dessus et de dessous, l'orientation a été alignée avec l'axe x, sur le devant et à l'arrière de la surface, elle a été alignée avec l'axe z.

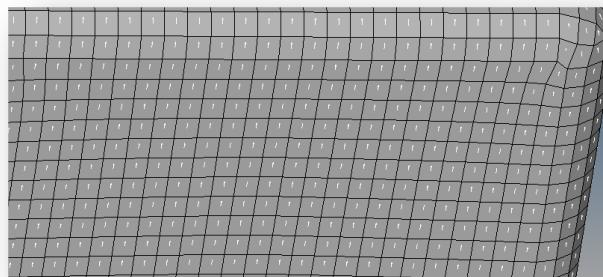


Figure 18 : Orientation des éléments

6. Construction du laminate

Nous allons expliquer les différentes étapes à réaliser pour créer un stratifié sous Hypermesh avec une propriété de type PCOMPP.

Etape 1 : Création des matériaux

Il faut d'abord créer les matériaux avec leurs propriétés, le carbone est considéré comme un matériau orthotrope (MAT8) et la mousse comme un matériau anisotrope (MAT1). Les caractéristiques de ces matériaux ont été trouvées dans les documents fournis par les fournisseurs de carbone et de mousse.

MAT 8	MID	E1	E2	[NU12]	[G12]	[G1Z]	[G2Z]	[RHO]
	3	[1 . 4 e + 0 5]	[1 . 2 e + 0 4]	[0 . 2 6 0]	[5 8 0 0 . 0 0 0]	[5 4 0 0 . 0 0 0]	[5 4 0 0 . 0 0 0]	[1 . 5 e - 0 9]
	[A1]	[A2]	[TREF]	[X]	[Xc]	[Yt]	[Yc]	[S]
	[GE]	[F12]	[STRN]	[2 0 0 0 . 0 0]	[1 5 0 0 . 0 0]	[7 0 . 0 0 0]	[2 3 0 . 0 0 0]	[9 0 . 0 0 0]

Figure 19 : Propriété du carbone - MAT8

MAT 1	ID	[E]	[G]	[NU]	[RHO]	[A]	[TREF]	[GE]
	4	[3 6 . 0 0 0]	[]	[0 . 3 8 5]	[3 . 2 e - 1 0]			
	[ST]	[SC]	[SS]					
		[1 . 0 0 0]	[0 . 4 0 0]	[0 . 4 0 0]				

Figure 20 : Propriété de la mousse - MAT1



Etape 2 : Création des plis

Il y aura 2 zones distinctes de plis. Une sera la zone où l'on fera l'optimisation avec les couches de carbone et le matériau d'âme et la deuxième sera une zone non optimisée qui sera la zone où se trouvent les inserts, qui sera composé des couches de carbone et le matériau d'âme sera l'insert en aluminium.

Les plis de la zone de conception sont :

Matériaux	Orientation	Epaisseur
Carbone	0°	0.2mm
Carbone	45°	0.2mm
Carbone	-45°	0.2mm
Carbone	90°	0.2mm
Mousse Rohacell	180°	10mm

Les plis de la zone de non-conception (les inserts) sont :

Matériaux	Orientation	Epaisseur
Carbone	0°	0.2mm
Carbone	45°	0.2mm
Carbone	-45°	0.2mm
Carbone	90°	0.2mm
Aluminium	180°	10mm

Pour le matériau d'âme, il est recommandé d'attribuer une orientation différente de celle du matériau de recouvrement (par exemple de 180 ° à la place de l'orientation de 0 °). Cela est nécessaire pour la poursuite du processus d'optimisation pour pouvoir définir concrètement les contraintes de fabrication. En outre, les résultats par orientation pourront être affichés pendant le post-traitement.

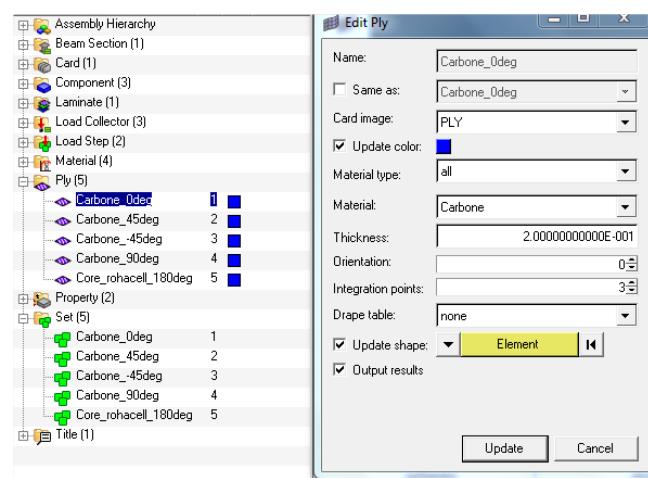


Figure 21 : Crédit des plis

La figure ci-dessus nous montre la fenêtre de création des plis. Il faut rentrer le nom du pli, son matériau, son orientation, son épaisseur et ensuite sélectionner sur la surface où l'on veut appliquer ce pli.

Etape 3 : Crédit des laminates

Après la création des plis, il faut créer les deux laminates, le laminate définit l'ordre et la méthode d'empilement de ceux-ci. Dans notre exemple, l'empilement est symétrique.

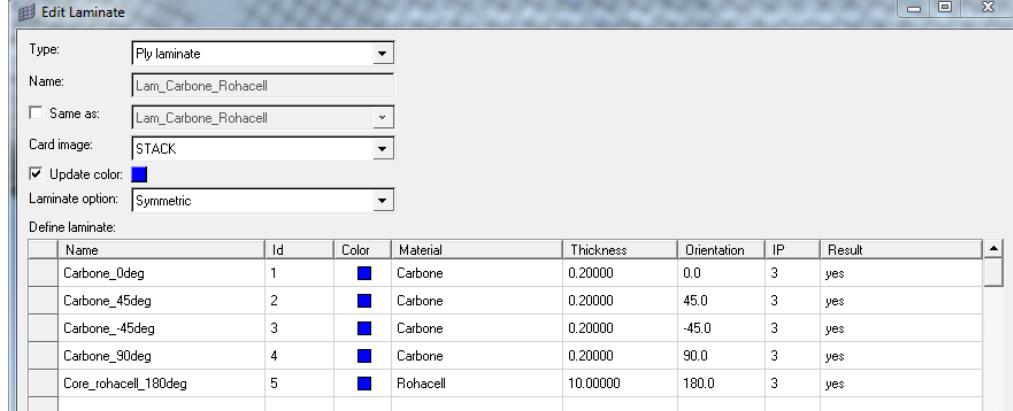


Figure 22 : Laminate de la zone de conception

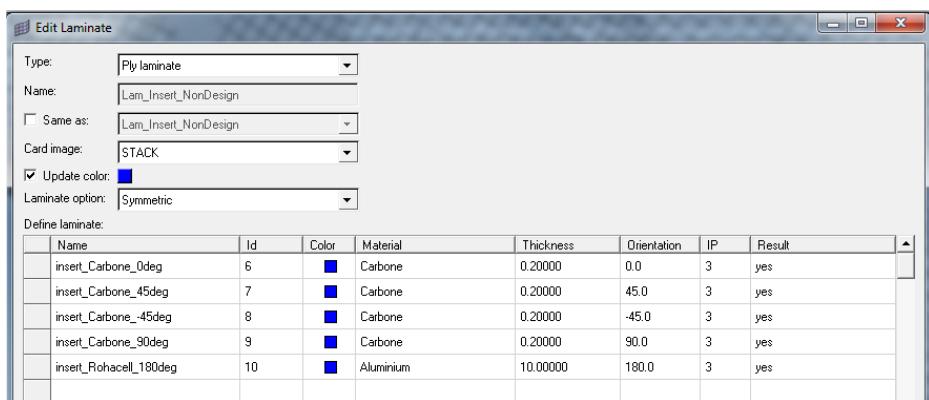


Figure 23 : Laminate de la zone d'insert

Etape 4 : Création de la propriété PCOMPP

Il faut ensuite créer la propriété et lui assigner les éléments.

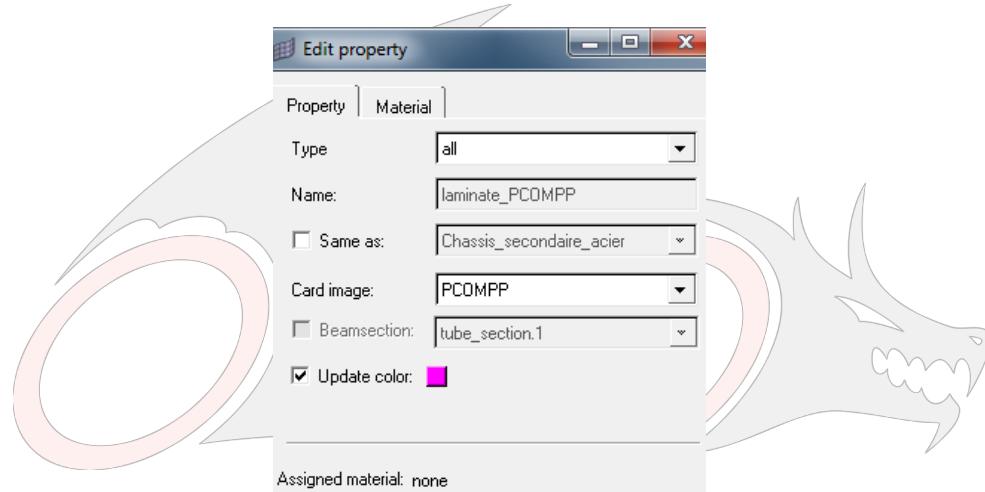


Figure 24 : Création de la propriété

C'est dans la propriété que l'on indique également quel critère de rupture nous voulons utiliser (ici Hoffman) et la valeur du cisaillement inter laminaire maximale SB qui en plus des valeurs inter laminaires dans les propriétés du carbone permettront de calculer le délaminage du stratifié.

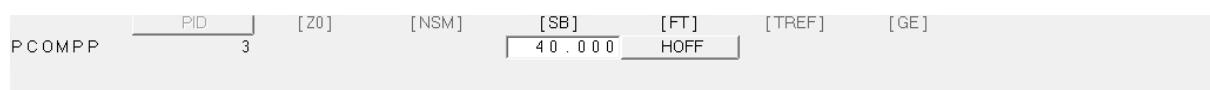


Figure 25 : Critère de rupture et de délaminage

⊕ Etape 5 : Vérifier si le stratifié a correctement été créé

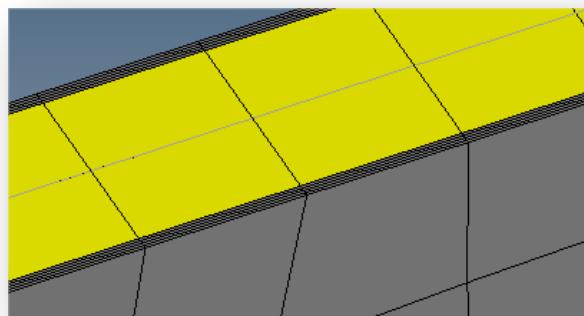


Figure 26 : Vérification du stratifié

Sur la figure ci-dessus, nous avons l'aperçu du stratifié avec la mousse en jaune et les différents plis de carbone en gris.

7. *Création des chargements*

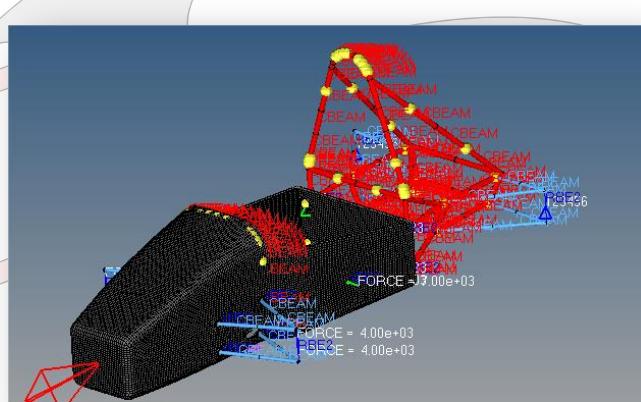


Figure 27 : Loadstep

Les chargements créés tiennent compte du règlement de la compétition. Les différents cas de chargements sont :

- ⊕ Choc frontal,
- ⊕ Choc sur le côté du monocoque,
- ⊕ Torsion du monocoque,
- ⊕ Force sur les points d'accroche du harnais,
- ⊕ Poids du pilote.

8. Analyse

Avant de débuter l'analyse, il faut choisir les sorties que l'on souhaite, dans notre cas, les contraintes et déformations (CSTRAIN et CSTRESS). Ensuite on peut lancer l'analyse.

Nous avons également ajouté un critère de rupture, le critère de HOFFMAN, ainsi qu'un critère de délaminage. En **annexe 1** se trouvent les résultats pour le critère de rupture et en **annexe 2** les résultats pour le critère de délaminage. On sait d'après les formules qui définissent le critère de rupture et de délaminage que si leurs valeurs sont inférieures à 1 il n'y a ni rupture du carbone et ni délaminage du stratifié. On discerne dans ses annexes que toutes les valeurs sont inférieures à 1.

```

ANALYSIS RESULTS :

-----
ITERATION    0
(Scratch disk space usage for starting iteration = 242 MB)
(Running in-core solution)

Volume          =  5.66742E+07   Mass      =  4.95911E-02

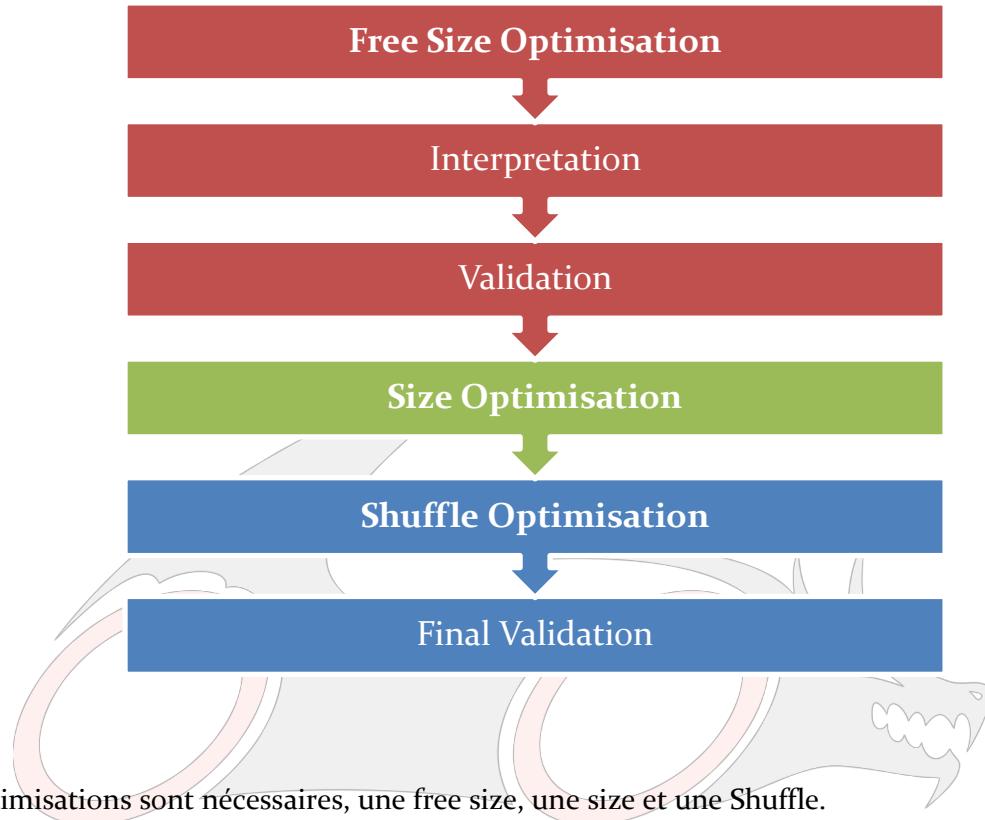
Subcase  Compliance
  3  5.825488E+04
  4  4.765243E+04
  5  3.107901E+03
  6  2.692534E+05
  7  2.692534E+05
  8  4.391022E+04
  9  3.580324E+05

```

Figure 28 : Résultat de l'analyse

b) Processus d'optimisation d'un matériau composite dans Hyperworks.

Les différentes étapes pour optimiser une pièce composite sont décrites ci-dessous.



Trois optimisations sont nécessaires, une free size, une size et une Shuffle.

- ▣ Free Size : L'optimisation free size permet de créer pour chaque orientation de fibre des couches d'épaisseurs différentes.
- ▣ Size : L'optimisation Size permet de calculer le nombre optimal de plis pour chaque orientation.
- ▣ Shuffle : L'optimisation Shuffle trouve l'ordre d'empilement optimal de chaque couche.

1. L'optimisation Free Size

L'optimisation Free Size émet une proposition sur l'orientation de la fibre qu'il est préférable d'appliquer à certaines zones du composant.

Les différentes étapes de l'optimisation Free Size sont :

Etape 1 : Edition des plis pour définir des « superplis »

OptiStruct ne peut ni ajouter ni enlever de matière, la première étape de la mise en place d'une optimisation free size en composite est la création de ce qu'on appelle des « superplis », qui sont des couches trop épaisses.

Il faut veiller à ce que l'épaisseur du matériau d'âme soit préservée, parce que sinon, l'optimisation ne réalise pas la performance du matériau de cœur (préservation de la distance entre la fibre extérieure et l'axe neutre).

Les couches existantes seront modifiées comme suit:

Matériaux	Orientation	Epaisseur
Carbone	0°	1mm
Carbone	45°	1mm
Carbone	-45°	1mm
Carbone	90°	1mm
Mousse Rohacell	180°	10mm

Les couches de la zone où se trouvent les inserts ne seront pas optimisés et resteront donc inchangés.

Etape 2 : Définir la « design variable » de free size

En créant le design variable nous allons donner au logiciel les conditions dont il dispose pour faire son optimisation. Nous avons choisi l'épaisseur maximale et minimale du stratifié, 2mm à 25mm.

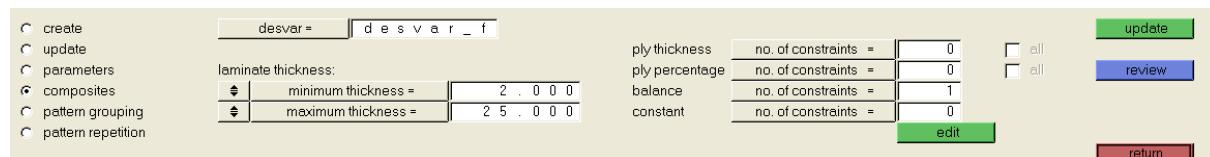


Figure 29 : Création de la "design variable"

On ajoute également une contrainte supplémentaire, que les couches à 45° soient identiques à celle à -45° , comme le préconise la théorie du composite.

DSIZE	ID	1 STACK	EID	1
		MINDIM		
MEMBSIZ	30.00000			
COMP	LAMTHK	LTMIN	LTMAX	[LTSET]
		2.000000	25.0000	
COMP	BALANCE	BANGLE1	BANGLE2	
		45.000	-45.000	
<input type="checkbox"/> PLYTHK				
<input type="checkbox"/> PLYPCT				
<input checked="" type="checkbox"/> BALANCE				
DSIZE_NUMBER_OF_BALANCE = <input type="text" value="1"/>				
<input type="checkbox"/> CONST				
<input type="button" value="reject"/> <input type="button" value="default"/>				

Figure 30 : Contrainte de la variable

Etape 3 : Définir les réponses pour l'optimisation.

L'étape suivante est la définition des réponses de l'optimisation. Les réponses sont les éléments que nous souhaitons obtenir. Pour la première optimisation nous allons créer deux réponses, la réponse en masse et la réponse en souplesse.

Pour la réponse en masse, nous souhaitons avoir la masse totale.

response =	r e s p _ m a s s	no regionid
response type	mass	total

Figure 31 : Création de la réponse en masse

Pour la réponse en souplesse, nous voulons disposer de la souplesse dans chaque cas de chargement, il faut donc sélectionner les cas de chargement (loadstep).

response =	r e s p _ w c o
response type	weighted comp
	loadsteps <input type="button" value=" < > "/>

Figure 32 : Création de la réponse en souplesse

Etape 4 : Définir la contrainte.

Après avoir créé les réponses, il faut créer la contrainte. La contrainte est la condition aux limites de l'optimisation. Pour l'optimisation FreeSize nous avons choisi de faire une contrainte de masse avec une masse maximale de 40kg.

constraint =	c o n s t _ m a s s	response =	r e s p _ m a s
<input type="checkbox"/> lower bound =	-1.000e+20		
<input checked="" type="checkbox"/> upper bound =	0.040		

Figure 33 : Contrainte de masse

Etape 5 : Définir l'objectif de l'optimisation.

Il faut ensuite définir l'objectif de l'optimisation. L'objectif de l'optimisation est la fonction que le logiciel va améliorer, soit en maximisant ou en minimisant celle-ci. Dans notre cas, l'objectif sera de minimiser la souplesse.

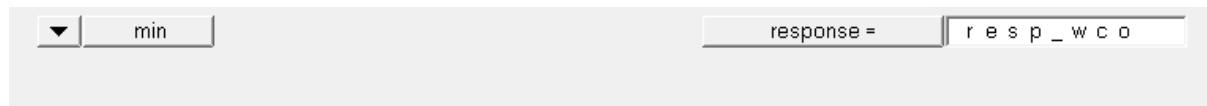


Figure 34 : Création de l'objectif

Etape 6 : Free size optimisation.

Nous pouvons maintenant lancer l'optimisation FreeSize. Avant de passer dans Hyperview, le logiciel de post traitement, nous vérifions dans le fichier texte généré pendant le calcul que la valeur de masse maximale que nous avons indiqué a bien été respectée, que l'épaisseur du stratifié correspond à nos attentes et que l'optimisation a réussi à trouver un design correct en respectant nos contraintes.

Etape 7 : Post traitement de la free size.

Dans hyperview, nous pouvons visualiser plusieurs choses, soit l'épaisseur totale du monocoque, soit l'épaisseur par orientation de carbone. Le calcul nous donne des résultats qui seraient difficiles, voire impossible à réaliser pendant la fabrication. Les formes des couches de carbone sont très complexes, nous devrons donc pendant la prochaine optimisation, interpréter ces plis pour les rendre plus simples. En **annexe 3** se trouvent les résultats de l'optimisation FreeSize avec les épaisseurs préconisées par orientation de carbone et de mousse.

2. L'optimisation Size

La seconde phase de l'optimisation a deux objectifs. Le premier est d'ajouter les contraintes de fabrication, comme l'épaisseur des plis de carbone et de mousse et le deuxième est d'ajouter des nouvelles réponses et contraintes.

Etape 1 : Importer le résultat de la FreeSize

La deuxième optimisation, la Size, commence par l'importation des résultats de la FreeSize dans hypermesh. Les résultats de la première optimisation ne sont pas réalisables dans l'état, nous allons donc les interpréter. Lorsqu'on importe les résultats dans hypermesh, le nombre de plis a considérablement augmenté. Je vais prendre l'exemple du pli avec une orientation de 0° , qui était composé d'un seul pli est maintenant composé de quatre plis.

Ci-après nous voyons la décomposition des plis avec une épaisseur de 0° .

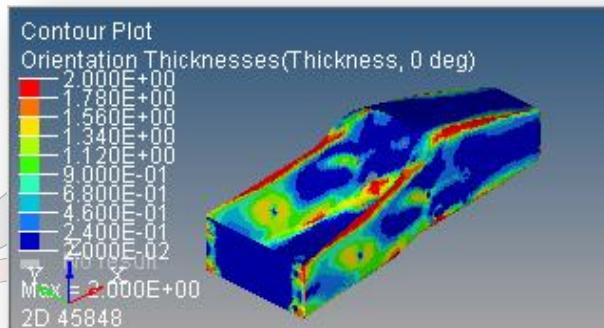


Figure 35 : Résultat defreesize, épaisseur des éléments à 0°

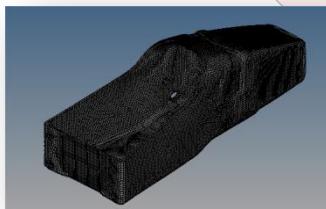


Figure 36 : Pli n°1 à 0°

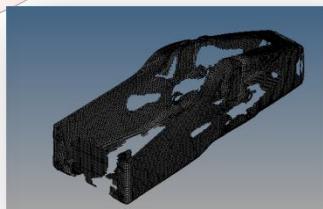


Figure 37 : Pli n°2 à 0°

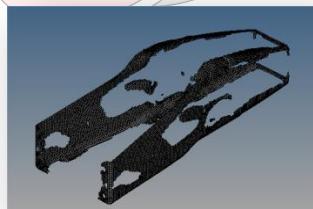


Figure 38 : Pli n°3 à 0°



Figure 39 : Pli n°4 à 0°



⊕ Etape 2 : Interprétation des plis

Vu les résultats, il nous faut interpréter ces plis pour qu'ils soient plus facile à réaliser lors de la fabrication. Pour ce faire il faut éditer chaque pli pour refaire des formes qui correspondent aux contraintes de fabrication. Le premier pli de chaque orientation étant un pli complet il suffit d'interpréter les trois plis suivant. Ci-après, le résultat de l'interprétation pour les plis à 0° .

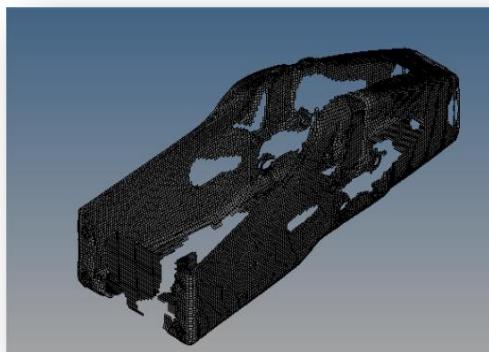


Figure 40 : Pli n°2 à 0° avant interprétation

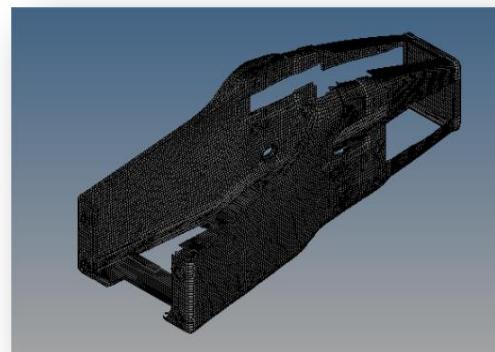


Figure 41 : Pli n°2 à 0° après interprétation

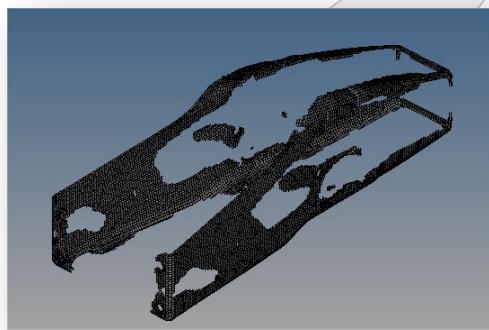


Figure 42 : Pli n°3 à 0° avant interprétation

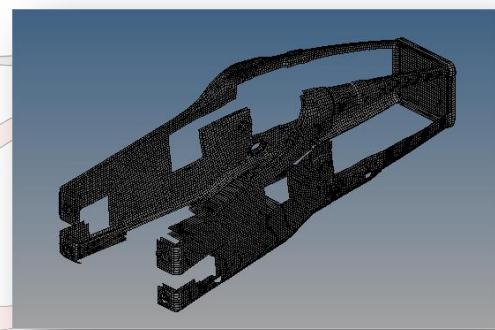
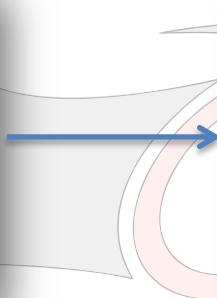


Figure 43 : Pli n°3 à 0° après interprétation



Figure 44 : Pli n°4 à 0° avant interprétation

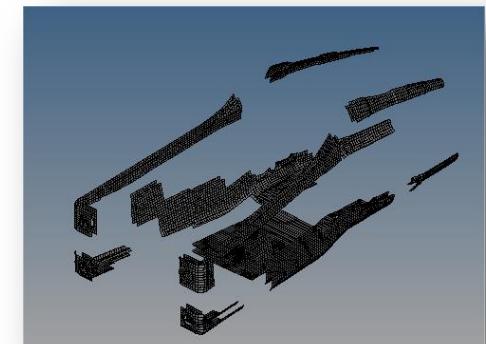


Figure 45 : Pli n°4 à 0° après interprétation

Durant l'optimisation, l'ordre des couches a été changé, c'est-à-dire que des couches de carbone peuvent être intercalées entre des couches de mousse, il faut donc réorganiser le laminate pour remettre les couches de mousse au centre du stratifié.

Name	Id	Color	Material
PLYs_14100	14100	Orange	Carbone
PLYs_15100	15100	Pink	Rohacell
PLYs_11200	11200	Green	Carbone
PLYs_12200	12200	Magenta	Carbone
PLYs_13200	13200	Dark Red	Carbone
PLYs_14200	14200	Brown	Carbone
PLYs_15200	15200	Purple	Rohacell
PLYs_11300	11300	Blue	Carbone
PLYs_12300	12300	Grey	Carbone
PLYs_13300	13300	Light Blue	Carbone
PLYs_14300	14300	Cyan	Carbone
PLYs_15300	15300	Dark Blue	Rohacell
PLYs_11400	11400	Yellow	Carbone
PLYs_12400	12400	Dark Grey	Carbone
PLYs_13400	13400	Dark Blue	Carbone
PLYs_14400	14400	Magenta	Carbone
PLYs_15400	15400	Pink	Rohacell

Figure 46 : Laminate avant réorganisation

Name	Id	Color	Material
PLYs_11100	11100	Red	Carbone
PLYs_12400	12400	Dark Grey	Carbone
PLYs_12300	12300	Light Grey	Carbone
PLYs_12200	12200	Magenta	Carbone
PLYs_12100	12100	Cyan	Carbone
PLYs_13400	13400	Dark Grey	Carbone
PLYs_13300	13300	Blue	Carbone
PLYs_13200	13200	Dark Red	Carbone
PLYs_13100	13100	Orange	Carbone
PLYs_14400	14400	Magenta	Carbone
PLYs_14300	14300	Cyan	Carbone
PLYs_14200	14200	Brown	Carbone
PLYs_14100	14100	Orange	Carbone
PLYs_15400	15400	Pink	Rohacell
PLYs_15300	15300	Dark Blue	Rohacell
PLYs_15200	15200	Purple	Rohacell
PLYs_15100	15100	Pink	Rohacell

Figure 47 : Laminate après réorganisation

Etape 3 : Ajouter des réponses d'optimisation

A tout moment pendant les étapes d'optimisation des réponses peuvent être modifiées ou ajoutées. Par exemple, dans l'optimisation Size nous allons maintenant ajouter les contraintes dans le matériau comme réponse.

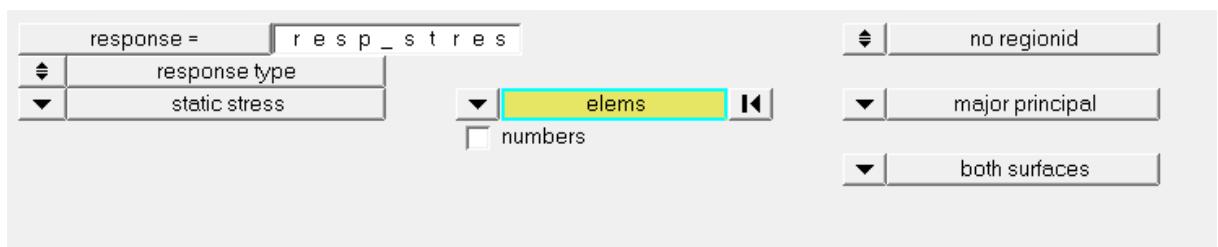


Figure 48 : Réponse contrainte

Etape 4 : Définir les nouvelles contraintes

La réponse en contrainte peut maintenant être associée à une contrainte avec les limites basses et hautes acceptables.

constraint =	const_stre	response =	resp_stres
<input checked="" type="checkbox"/> lower bound =	- 80 . 000	loadsteps	
<input checked="" type="checkbox"/> upper bound =	80 . 000		

Figure 49 : Stress contrainte

Etape 5 : Définir les contraintes de fabrication

L'étape suivante consiste à intégrer les contraintes de fabrication. Nous allons intégrer les contraintes suivantes : L'épaisseur du carbone et de la mousse, le pourcentage minimal de chaque pli et l'équivalence entre les couches de -45° et 45° .

Tout d'abord, on insère dans la « card » de chaque pli la valeur « TMANUF » qui représente l'épaisseur du pli de carbone que l'on souhaite, ici 0.2mm (**figure 50**) car le carbone pré-imprégné s'achète avec cette épaisseur. On fait de même pour le matériau d'âme.

PLY	ID	MID	T	THETA	SOUT	[TMANUF]	DRAPE_ID
	1 1 1 0 0		20 . 0838200	. 0000000YES		0 . 200	0
	ESID						

Figure 50 : Epaisseur nominale du carbone

Ensuite on renseigne le pourcentage de chaque pli souhaité. Habituellement, cela nécessite au moins 10% de chaque pli dans un stratifié. On renseigne également l'équivalence entre les couches à 45° et -45° .

PLYPCT	0 . 0	0 . 1	PPMAX(2)	[PPSE]		
PLYPCT	9 0	0 . 1	PPMIN(2)	PPMAX(3)	[PPSE]	
PLYPCT	4 5	0 . 1	PANGLE(3)	PPMAX(3)	[PPSE]	
PLYPCT	- 4 5	0 . 1	PANGLE(4)	PPMIN(4)	PPMAX(4)	[PPSE]

PLYTHK
 PLYPCT
 Ply Percentage Options
 ▾ Specify Number
 DSIZE_NUMBER_OF_PLYPCT = 4
 BALANCE
 DSIZE_NUMBER_OF_BALANCE = 1

Figure 51 : Contraintes de fabrication



⊕ Etape 7 : Optimisation Size

On peut maintenant lancer l'optimisation. Le logiciel va effectuer de nombreuses itérations et va ensuite nous donner le classement de chaque itération dans un tableur Excel. Dans notre cas, la meilleure itération était l'itération 14. Il s'avère que la meilleure optimisation nous donne 8 couches de carbone entières, une dans chaque orientation, symétriquement et du matériau d'âme réparti avec des épaisseurs différentes. La **figure 52** nous montre le résultat de l'épaisseur du monocoque après l'optimisation size.

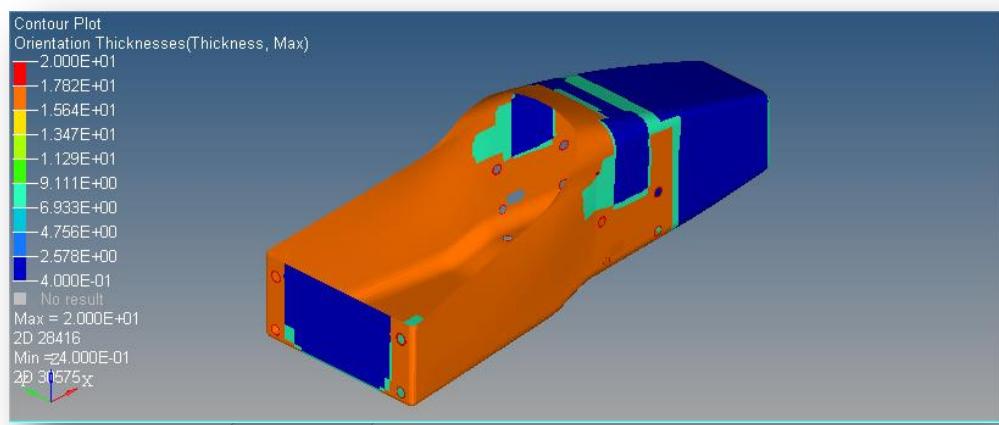


Figure 52 : Epaisseur finale du monocoque

Nous avons également le résultat du critère de rupture et de délaminaison après cette optimisation qui est décrite en **annexe 4 et 5**.

3. L'optimisation Shuffle

⊕ Etape 1 : Importer le résultat de la Size

Pour réaliser l'optimisation de l'empilement des plis, on commence par importer le fichier généré par l'optimisation. Il faut ensuite vérifier que le nom des couches dans le laminate soit correct et supprimer la design variable qui a été créé automatiquement par le logiciel.

Etape 2 : Editer les variables

Dans cette étape il faut insérer les contraintes de fabrication. Les informations à indiquer sont : équivalence entre les couches (**figure 53**), nombre de couches successives maximales (**figure 54**), orientation du matériau d'âme et orientation du matériau à mettre sur l'extérieur (**figure 55**).

<input type="radio"/> create	dshuffle =	desvar_f
<input type="radio"/> update		
<input checked="" type="radio"/> parameters	<input checked="" type="checkbox"/> pairing constraint pair type: <input type="radio"/> same ply angle1 = 45 . 0 0 0 ply angle2 = - 45 . 0 0 0	
		successive pli no. of constraints = 3 core no. of plies = 1 cover no. of plies = 2
<input type="button" value="edit"/>		

Figure 53 : Equivalence des couches

Le nombre de couches successives identique est de 2.

DSHUFFLE	1 STACK		1
	MANGLE	MSUCC	
MAXSUCC	0 . 0 0 0	2	1
MAXSUCC	9 0 . 0 0 0	2	1
MAXSUCC	4 5 . 0 0 0	2	1
MAXSUCC	- 4 5 . 0 0 0	2	1
	PANGLE1	PANGLE2	POPT
PAIR	4 5 . 0 0 0 0 0	- 4 5 . 0 0 0 0 0	SAME

Figure 54 : Couches successives

Les couches sur l'extérieur seront les couches à -45° et $+45^\circ$. Tandis que le matériau d'âme sera la couche avec une orientation de 60° . Il est important de changer l'orientation de la mousse de 180° à 60° car l'optimisation est possible seulement de 0° à 90° .

CORE	CREP	CANG(1)
	1	6 0 . 0 0 0
COVER	VREP	VANG(1) VANG(2)
	2	4 5 . 0 0 0 - 4 5 . 0 0 0
<input checked="" type="checkbox"/> MAXSUCC Successive Plies Options <input type="radio"/> Specify Number DSHUFFLE_NUMBER_OF_MAXSUCC = 4		
<input checked="" type="checkbox"/> CORE DSHUFFLE_CORE_NUMBER_OF_PLIES = 1		
<input checked="" type="checkbox"/> COVER		

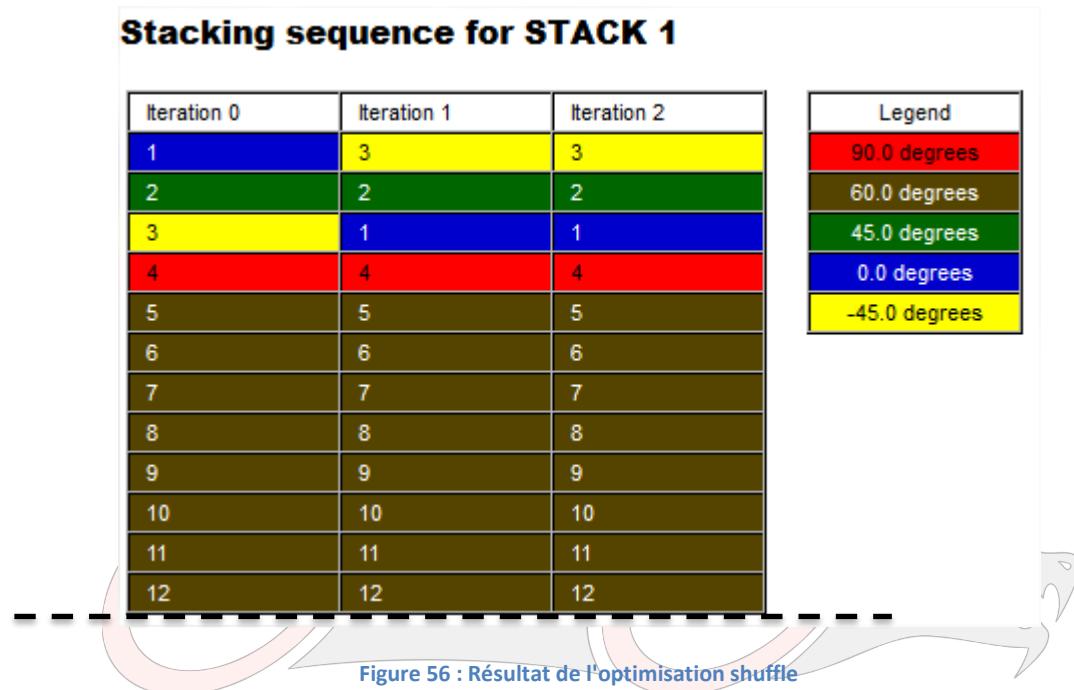
Figure 55 : Couches de couverture et d'âme



⊕ Etape 3 : Shuffle optimisation

On remarque que dès la première itération toutes les contraintes de conception sont respectées. A cause de la symétrie seulement la moitié du stratifié est représenté.

On peut simplifier les couches de mousse en seulement trois partie car la contrainte de fabrication était de 1 mm et dans notre cas plusieurs couches de 1 mm sont identiques, il nous est donc possible de réaliser, par exemple plusieurs couches de 4 mm.





c) Résultat de l'optimisation

Nous allons maintenant récapituler toutes les couches nécessaires avec leurs formes, leurs épaisseurs et leurs orientations.

1 couche de carbone à -45°
1 couche de carbone à 45°
1 couche de carbone à 0°
1 couche de carbone à 90°
1 couche de mousse de 4mm
1 couche de carbone à 90°
1 couche de carbone à 0°
1 couche de carbone à 45°
1 couche de carbone à -45°

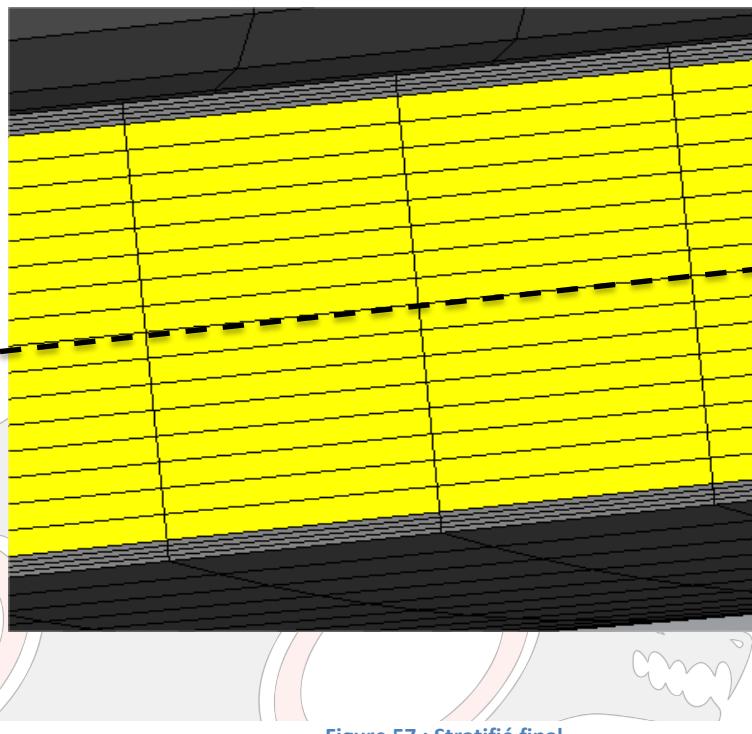


Figure 57 : Stratifié final

Les huit couches de carbone sont des couches qui recouvrent tout le monocoque, et les couches de mousse sont les suivantes :

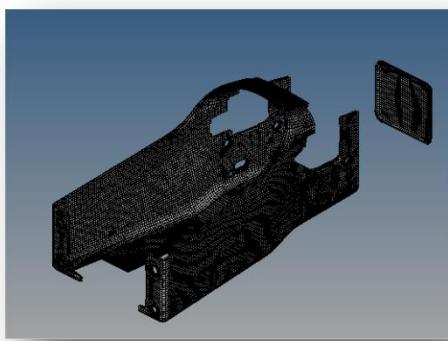


Figure 58 : Mousse épaisseur 4mm

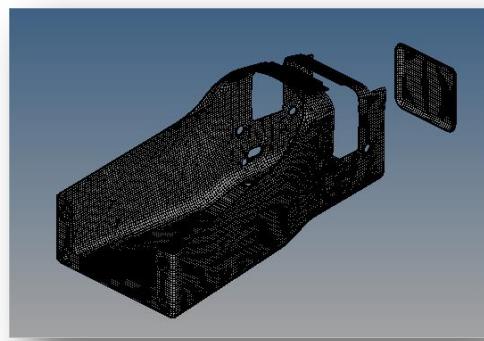
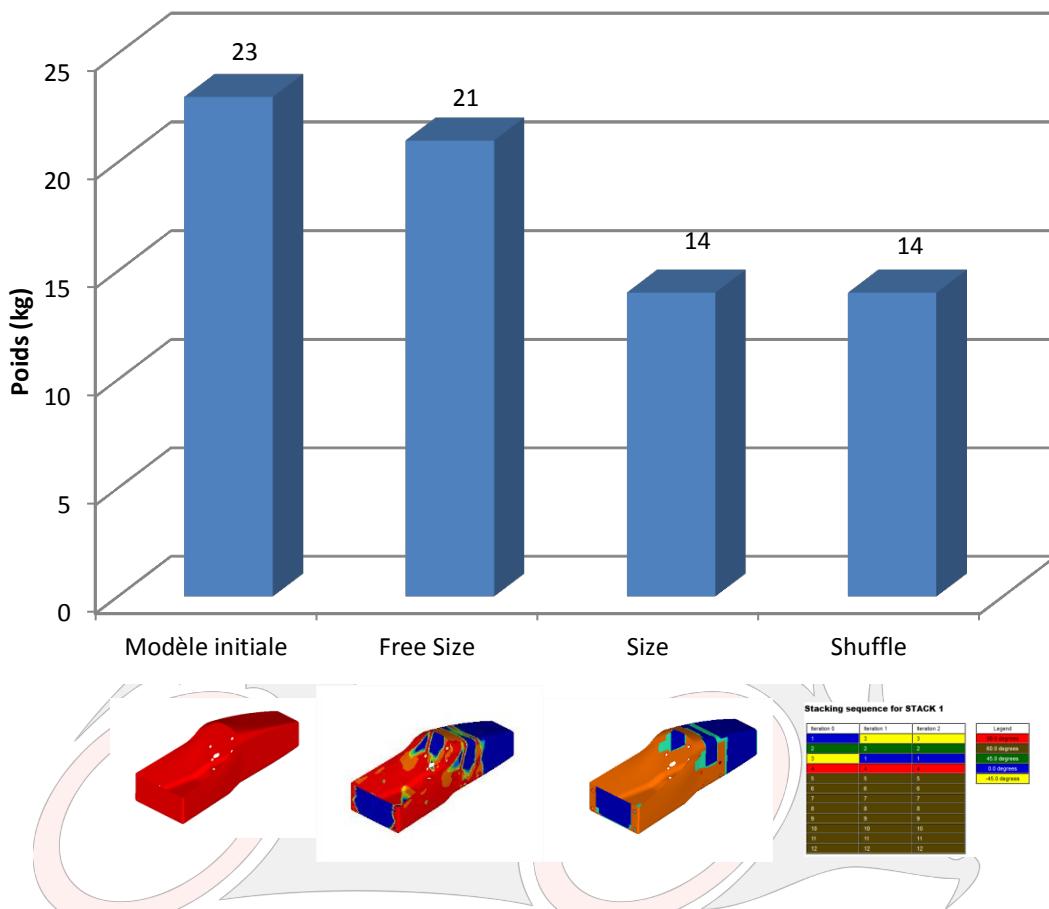


Figure 59 : Mousse épaisseur 4mm

Le graphique suivant permet d'illustrer l'évolution du monocoque et plus particulièrement son poids tout au long des différentes étapes d'optimisation.



Ce graphique met en exergue un gain de 9 kgs entre le modèle initial et la dernière optimisation. Au regard des critères de rupture et de délamination, encore loin de leurs valeurs maximales de 1, il serait encore possible de gagner un poids considérable sur le monocoque. Pour cela il faudrait recommencer une optimisation. Le gain par rapport au châssis actuel en acier est de presque 10 kg, ce qui est un résultat encourageant pour une première optimisation.



V. Conclusion

a) Résultats obtenus

Le cahier des charges de ce projet de fin d'étude était la réalisation d'une recherche bibliographique, la réalisation du budget pour la construction d'un monocoque carbone et la recherche de partenaires pour nous soutenir dans ce projet ambitieux. Tous ces objectifs ont été atteints et de plus nous avons réalisé la conception ainsi que le calcul et l'optimisation de celui-ci.

La recherche bibliographique nous a permis de définir le procédé de fabrication du monocoque. Nous avons choisi de le réaliser en carbone pré imprégné avec un matériau d'âme en mouse rohacell. Le moule choisi est en mousse PU qui, accouplé au carbone pré imprégné basse température, nous permettra de faire une chauffe basse température et faire une économie par rapport à un moule haute température.

Le budget du monocoque s'élève à 8142 euros. Ce budget peut être encore diminué grâce à une recherche de partenaire intensive, principalement sur le tissu carbone qui est l'élément le plus couteux de ce projet.

Durant tout ce projet, nous avons pu effectuer des rapprochements avec plusieurs entreprises, qui se sont toutes avérées particulièrement intéressées par le projet. De plus, la négociation d'un partenariat avec ALTAIR, qui nous a offert une formation sur la modélisation des composites, nous a permis d'avancer rapidement sur le calcul et l'optimisation du monocoque.

L'optimisation du monocoque est en cours de finalisation et nous donne des résultats encourageant pour la suite. Un gain non substantiel de poids a déjà été réalisé et nous ne faisons aucun doute que ce poids peut encore être diminué grâce à une nouvelle optimisation.

b) Travaux restant à effectuer

Différentes choses seront encore à réaliser l'année prochaine avant de pouvoir passer à la mise en œuvre pratique.

D'une part une nouvelle étude peut être réalisée en cas de changement dans le règlement demandant des modifications, notamment au niveau des cas de chargements.

Une nouvelle optimisation pourra aussi être réalisée pour essayer de diminuer encore le poids du monocoque, cette nouvelle optimisation aura l'avantage de pouvoir se baser sur un modèle déjà sain et la prochaine équipe pourra donc gagner beaucoup de temps.

La réalisation d'éprouvettes devra aussi être réalisée pour satisfaire aux exigences du règlement.

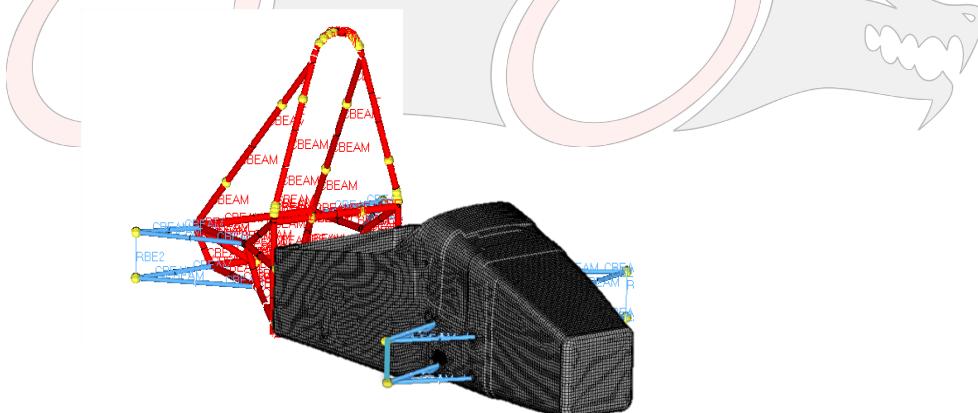
Pour finir, la recherche de sponsors pour le carbone et l'usinage est l'un des points primordiaux pour la fabrication du monocoque carbone.

c) Conclusion générale

L'une des difficultés de ces cinq mois de projet de fin d'étude était d'avoir à jongler entre nos PFE respectifs et la suite de la réalisation du prototype pour la Formula Student. Notre souhait étant d'avoir une monoplace toujours plus aboutie au fil des années, il était évident qu'il ne suffisait pas de se focaliser uniquement sur notre PFE.

Ce projet était l'un des plus ambitieux projets que l'équipe a eu depuis la création de la section sports mécaniques et nous sommes fiers d'avoir pu contribuer à l'évolution de l'équipe dans les années futures.

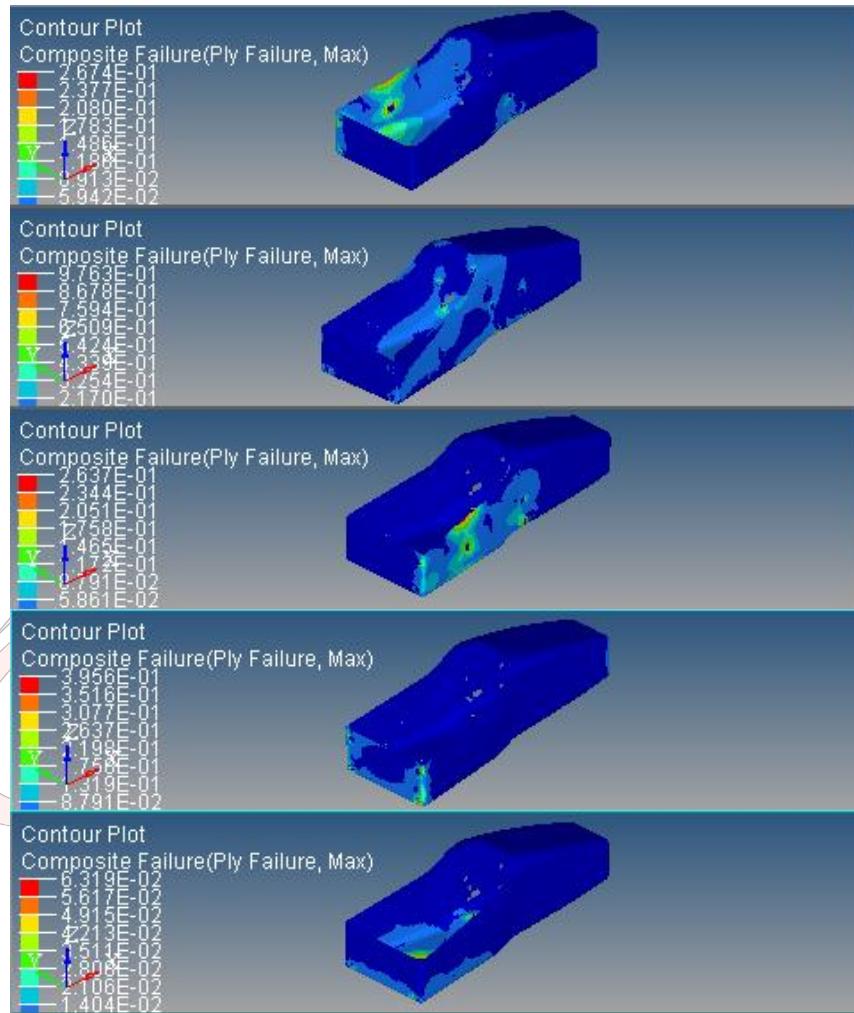
Ce projet nous a permis d'enrichir nos connaissances dans tous les domaines, que ce soit en conception, en calcul, ou dans les méthodes de fabrication d'une pièce composite. La Formula Student est un projet passionnant qui restera dans nos mémoires pour longtemps.



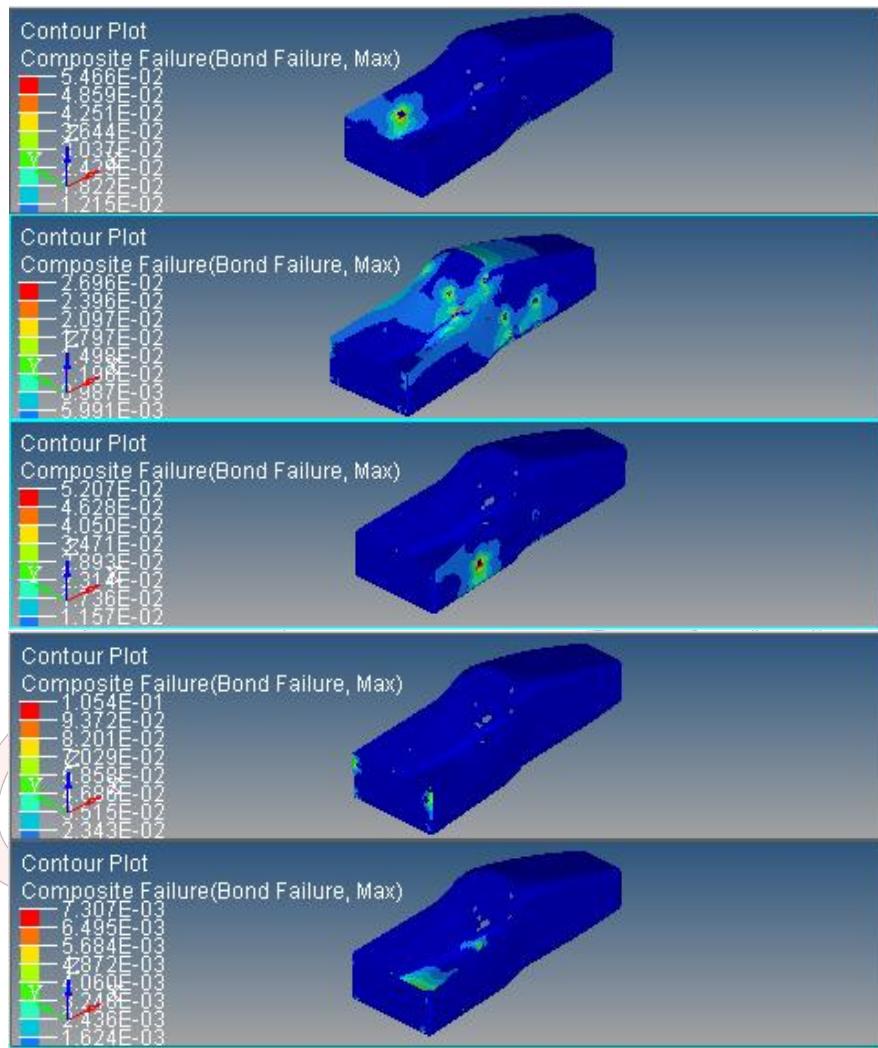


VI. Annexes

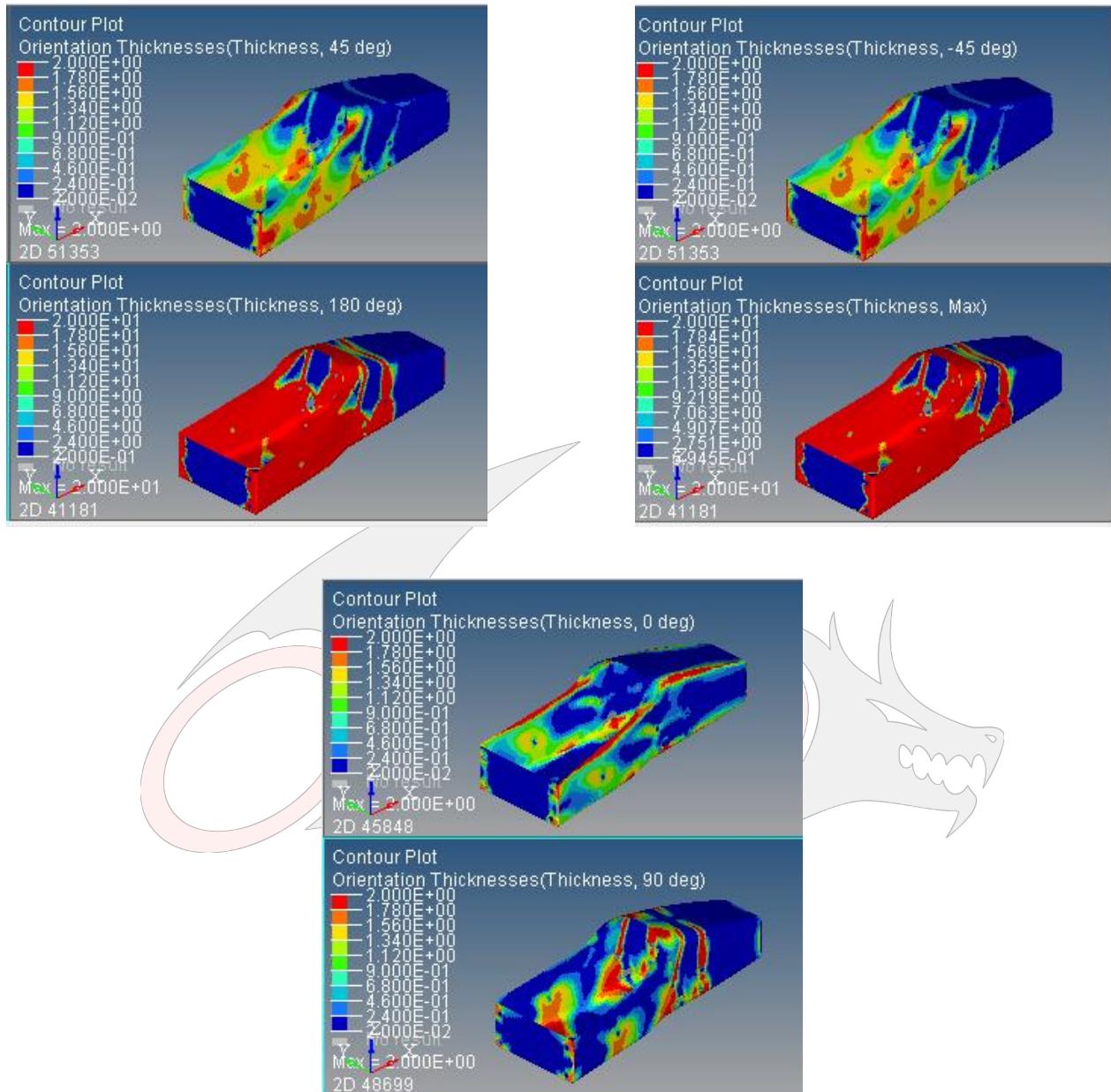
Annexe 1 : Résultat de l'analyse. Critère de rupture pour les différents cas de chargements.



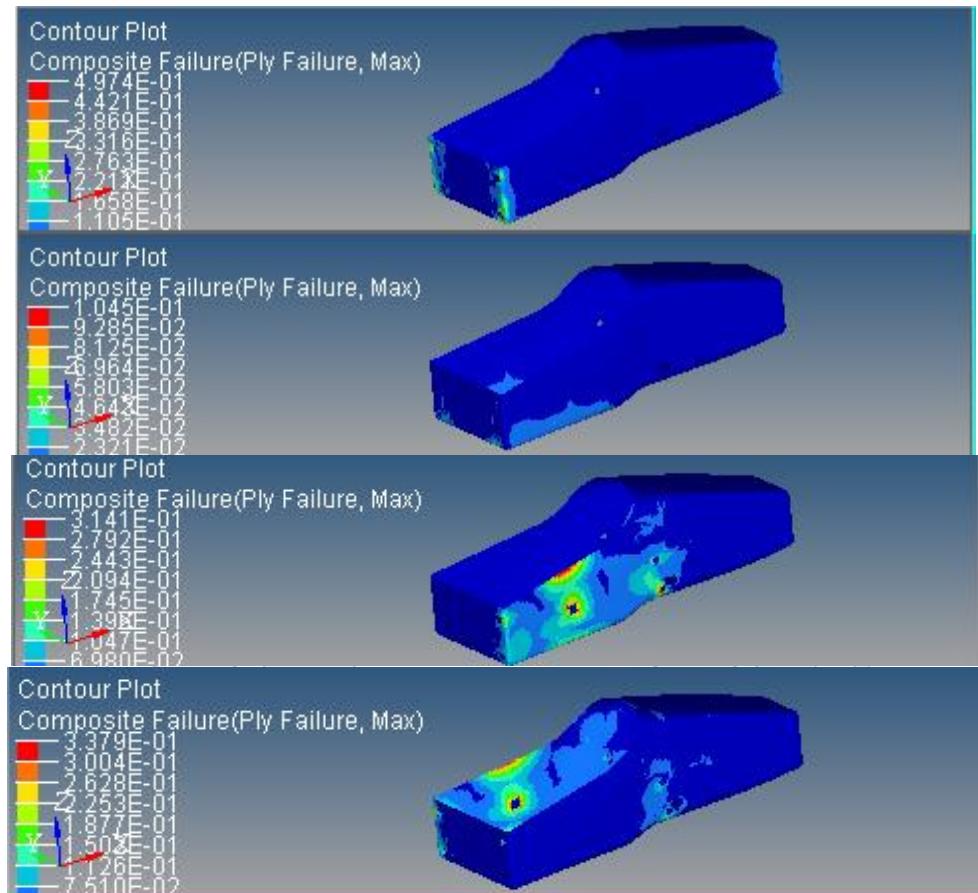
Annexe 2 : Résultat de l'analyse. Critère de déclaminage pour les différents cas de chargements.



Annexe 3 : Résultat de l'optimisation FreeSize. Epaisseur de matière par orientation.

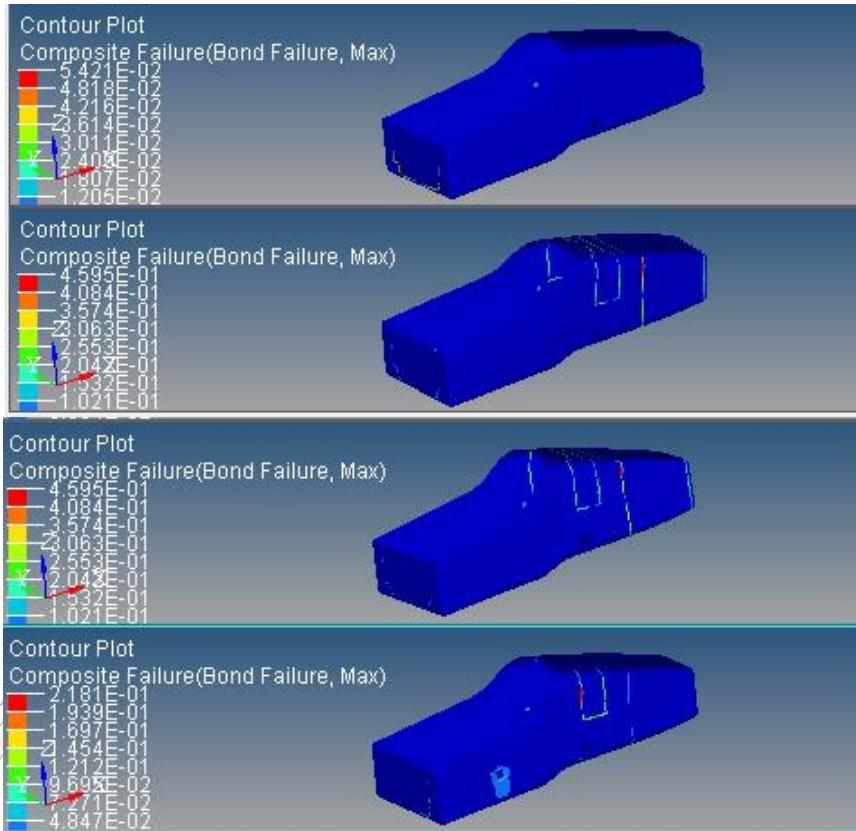


Annexe 4 : Résultat de l'optimisation. Critère de rupture pour différents cas de chargements.





Annexe 5 : Résultat de l'optimisation. Critère de délaminaison pour différents cas de chargements.



VII. Références

- [1] Généralités sur les matériaux composites - Laurent Gornet – Ecole Centrale Nantes
- [2] Cours sur la théorie des composites - MECA - ALTAIR Composite Training
- [3] Composite modeling using Altair Optistruct – ALTAIR – Emillien Goetz
- [4] Techniques de l'ingénieur – Mise en œuvre des composites – Méthodes et matériels – François Berbain et Alain Chevalier
- [5] 2013 Formula SAE rules – SAE International
- [6] Composite Optimization with Optistruct 11.0 on the example of a Formula Student Monocoque – ALTAIR – Markus Kriesch et André Wehr

