

**David Roche, de P&Z Engineering Ltd, montre comment une nouvelle technique d'optimisation peut être appliquée avec succès à des structures en matériaux composites stratifiées.**

# Optimisation des composites stratifiés

L'ingénierie moderne est pilotée par d'importantes contraintes de coût. Ces contraintes obligent à réduire les temps de conception, à mieux utiliser les matériaux et à améliorer l'efficacité globale de l'ingénierie. Ceci a propulsé les méthodes d'optimisation numériques sur le devant de la scène. Ces méthodes sont utilisées pour trouver la combinaison de variables de conception la mieux appropriée, satisfaisant un certain nombre de contraintes tout

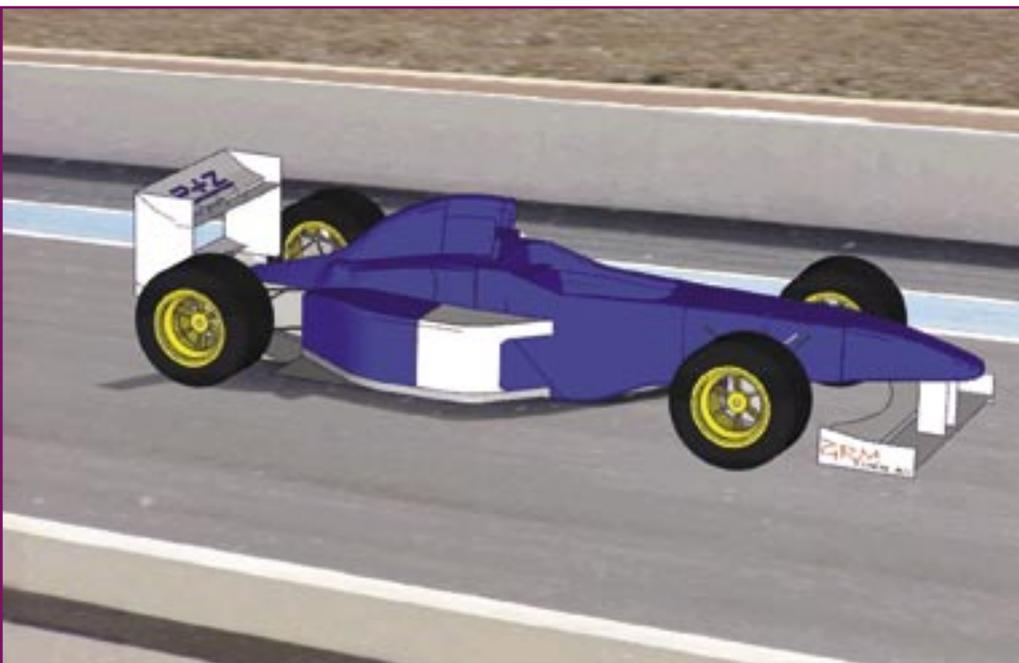
en penchant vers un objectif global, pour un cas de chargement donné. Ces méthodes sont basées sur des techniques de dérivation permettant de déterminer la sensibilité des variables de conception et leur influence sur l'objectif de l'analyse. C'est la raison pour laquelle ces techniques sont rassemblées sous l'appellation « Gradient Based ».

Les matériaux isotropes à réponses linéaires sont particulièrement bien adaptés à ce type de méthodes. Ceux-

ci sont caractérisés par des fonctions réponses lisses et infiniment dérivables. Plus généralement, ces méthodes sont bien adaptées aux matériaux présentant des propriétés linéaires, avec des variables de conception non discrètes ; ce qui est loin d'être le cas des matériaux composites.

L'utilisation de matériaux composites permet de réaliser des économies et de réduire le poids des structures. Les composites stratifiés offrent la plus grande flexibilité, car ils autorisent une variation de l'épaisseur des empilements sur l'ensemble de la structure. Cela permet d'envisager l'utilisation d'une quantité minimale de matériau, tout en garantissant un résultat satisfaisant à l'ensemble des exigences de conception.

La détermination d'un schéma d'empilement correct pour un composant en matériau stratifié est souvent considérée comme un art obscur. Les stratifiés sont souvent créés par tâtonnement successifs et requièrent une grande expérience. La théorie classique des matériaux stratifiés, combinée à des indices de prédiction de rupture, permettent aux concepteurs de déterminer la raideur et les points de rupture des structures. Ces calculs sont complexes et coûteux en temps lorsqu'ils sont effectués à



L'optimisation des stratifiés composites est utilisée dans des applications de développement pour la formule 1.

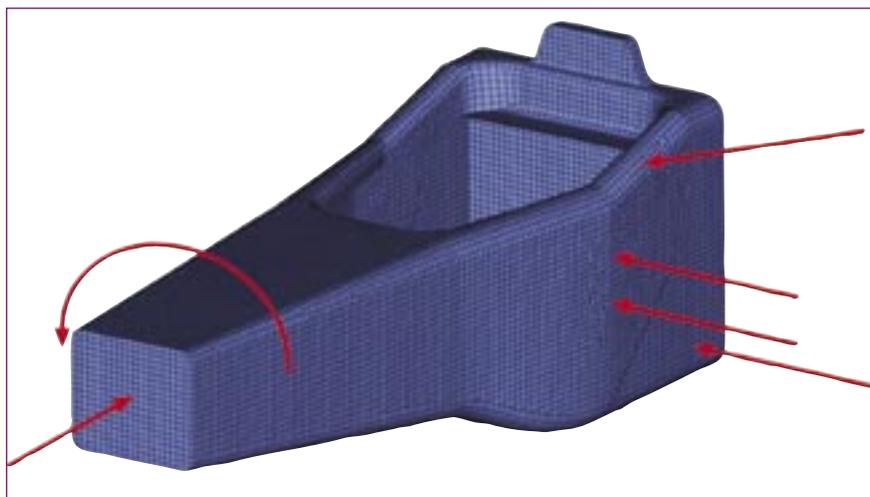
la main. L'analyse par éléments finis offre une méthode de calcul, mais son application mène généralement à une conception itérative.

L'étude de cas présentée ci-après montre comment une nouvelle méthode d'optimisation utilisant VR&D Genesis peut être appliquée avec succès à une structure en fibres composites stratifiées, dans le but de déterminer l'empilement optimal et le choix des matériaux.

## La problématique

Nous avons choisi d'étudier le cas d'une cellule de protection de voiture de course. Il s'agit d'une structure composite conçue pour protéger le pilote en cas d'accident. Des directives strictes établies par la FIA gouvernent la conception de tels éléments. Ces directives spécifient une liste de cas de chargement statiques devant être appliqués à la cellule et supportés par celle-ci.

Nous avons sélectionné cinq tests statiques, auxquels nous avons ajouté un cas de torsion réalisé par nos soins. Cela nous fait donc un total de six



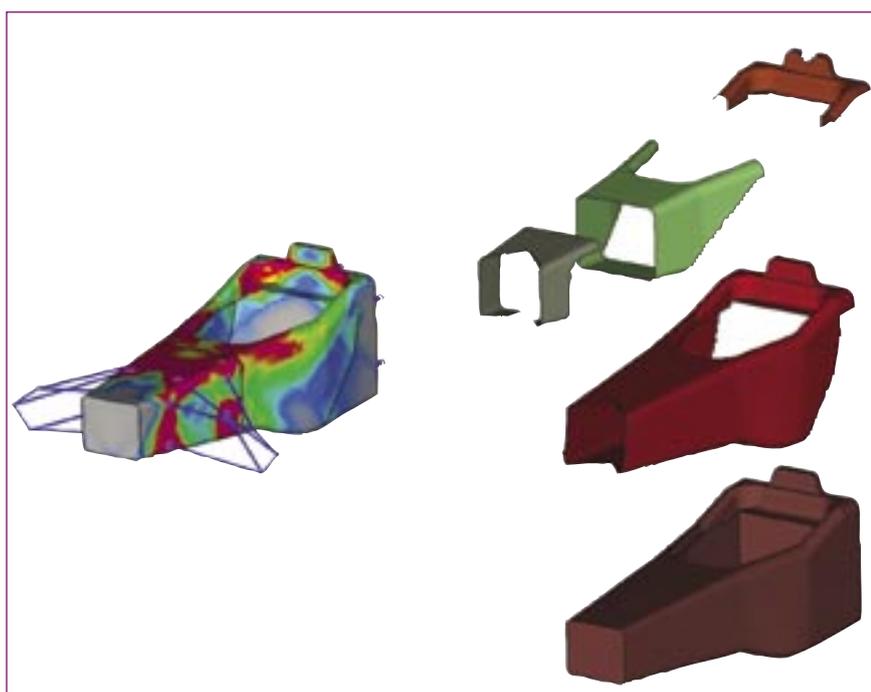
L'optimisation des composites peut être réalisée pour de multiples cas de chargements en tenant compte des contraintes de déplacement, de stress et de flambage.

charges distinctes appliquées séparément à la structure. L'objectif de notre analyse est de minimiser le poids de la cellule, en variant l'épaisseur des empilements de couches stratifiées. Pour la rupture, nous avons choisi d'utiliser le critère de Hoffman, et de fixer l'indice de rupture à 0.8. Lorsqu'elle est soumise aux chargements décrits, la cellule de protection ne doit pas casser, conformément au critère de rupture appliqué. Le cas de torsion est associé à une contrainte de dépla-

cement maximal, permettant d'assurer que la cellule possède une souplesse minimale en torsion.

## L'approche utilisée

La première étape de la résolution d'un tel problème consiste à déterminer le bon schéma d'empilement. Certaines parties de la structure auront à supporter des charges plus importantes que d'autres. Le schéma d'empilement doit être adapté en conséquence. Dans un premier temps il nous faut donc définir les différentes zones de sensibilité. Pour cela, nous avons choisi de conduire une optimisation topométrique en utilisant le logiciel Genesis de Vanderplaats. Cela permet d'optimiser l'épaisseur de chacun des plis, soumis aux différents cas de chargement. Pour cela, nous commençons par créer un empilement arbitraire, que nous appliquons à l'ensemble de la structure. Ensuite l'optimisation topométrique fait varier l'épaisseur de chaque pli, élément par élément, en utilisant comme contraintes l'index de rupture et le déplacement. Les charges appliquées ne sont pas de nature à provoquer une rupture par flambage, néanmoins la méthode utilisée permet tout à fait, à ce stade, de considérer des contraintes de flambage.



L'analyse sous Genesis fournit une solution optimisée et fabricable.

Woven Cloth (mm)	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Uni-directionnal fibres (mm)	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50

Table d'épaisseur des plis

Woven Cloth (degrees)		0		15		30		45		60		75	90						
Uni-directionnal fibres (degrees)	90		75	60		45	30		15	0		15	30		45	60		75	90

Table d'orientation des fibres

Le résultat de cette analyse indique l'emplacement correct des différentes zones où la structure doit varier. Dans cet exemple, il est important d'obtenir une couche continue à l'extérieur de la structure, pour des raisons essentiellement esthétiques.

C'est pourquoi la première zone que nous définissons couvre l'ensemble de la structure. Les autres zones sont définies aux endroits où nous estimons que l'épaisseur d'empilement devra varier.

A chaque zone est associé un nombre de strates à optimiser, incluant une strate principale. Il est important de s'assurer que les zones sont compatibles, c'est-à-dire que l'orientation des fibres est continue.

Pour cela, nous utilisons un outil de pré-processing de GRM Consulting, baptisé OptiAssist. Ce package est conçu spécialement pour définir les paramètres d'optimisation des composites stratifiés, incluant les séquences d'empilement, la symétrie des strates, les strates liées, les incréments, etc.

A ce stade de l'étude, nous disposons d'un grand nombre de variables de conception. Pour cet exemple nous allons autoriser le processus d'optimisation à faire varier l'épaisseur des strates ainsi que l'orientation des fibres. Le matériau stratifié, ici de l'aluminium en nid d'abeille, est autorisé à varier en épaisseur.

Une table des épaisseurs discrètes et des angles d'orientation des fibres est fournie pour le processus d'optimisation. A un point prédéterminé de l'analyse, nous allons forcer l'utilisa-

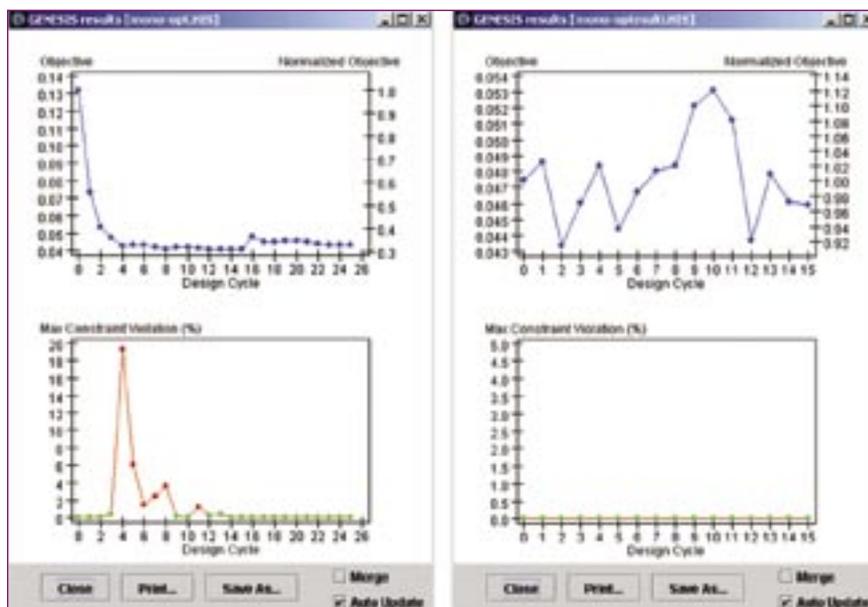
tion de ces variables afin d'assurer la fabricabilité du résultat.

A ce stade, nous sommes capables de soumettre l'analyse au solveur. L'un des problèmes fondamentaux que posent les méthodes d'optimisation basées sur des calculs de gradients est lié à l'existence d'extremums locaux. Ce problème est causé par la non-linéarité des matériaux composites, qui génère des fonctions solutions extrêmement complexes. Le processus d'optimisation est donc susceptible de converger vers un extremum local ne correspondant pas à la solution optimale. Quoiqu'il en soit, OptiAssist peut fixer intelligemment les points de départ des variables de conception, et soumettre un grande quantité d'analyses, de manière à éviter toute convergence vers un extremum local.

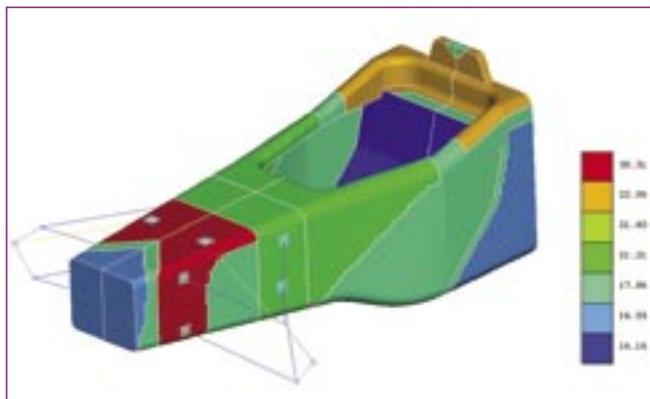
Le graphique situé sur la gauche représente l'historique des itérations pour une analyse individuelle. Au pas de temps 16, les valeurs discrètes sont forcées. Le graphique sur la droite représente la solution finale optimisée, et illustre la variabilité des méthodes par calcul de gradient.

## Résultats

Le résultat final peut être comparé directement à un composant existant en terme de masse. Le composant existant a été conçu grâce à la méthode traditionnelle des éléments finis, pour des cas de charge identiques. Le résultat fourni par Genesis se présente sous diverses formes. Premièrement, un tracé des contours de chacune des zones considérées peut être visualisé.



La solution est obtenue grâce au couplage de plusieurs méthodes d'optimisation.



Aperçu de la solution optimisée

Deuxièmement, un document texte est créé, décrivant l'empilement final pour chacune des zones analysées. Enfin, la dernière itération de l'optimisation fournit un modèle pouvant être directement soumis à des analyses complémentaires de type éléments finis. Dans cet exemple, l'application de la méthode d'optimisation a conduit à un résultat équivalent en terme de raideur, pour un gain de 18 % en masse par rapport au composant existant.

## Conclusion

Les techniques d'optimisation modernes sont devenues monnaie courante en phase de conception, du fait des gains de temps et d'argent qu'elles permettent d'envisager. L'utilisation de matériaux composites se démocratise elle aussi, nécessitant que des méthodologies d'optimisation soient établies. La méthode décrite dans cet article a été appliquée avec succès dans le cadre de nombreuses études, et a fourni des résultats nettement supérieurs à toute autre méthode employée jusque là. Cette étude n'a pas nécessité plus de quatre jours de travail, création du modèle comprise.

L'utilisation de variables discrètes assure que le résultat de l'optimisation est bien fabricable. Des tables de propriétés peuvent également être appliquées afin de déterminer la forme de la structure, permettant ainsi d'établir un lien entre l'analyste et l'ingénieur d'étude. Les outils et méthodes présentées ici ont permis à P+Z Engineering Ltd de réduire les coûts de conception des structures composite, tout en améliorant les performances des composants. ■

Article écrit par David Roche,  
P&Z Engineering Ltd,  
tiré de la revue BENCHmark  
(Nafems, Octobre 2004)

Traduit de l'anglais par cad-magazine

# Le Bâtiment évolue ...

Accompagnez toutes les étapes de la vie de l'ouvrage avec les logiciels "métier" Nemetschek.

## Relevé

Allplan Métrie  
Allplan Photo

## Conception

Allplan Archi  
Allplan Coffrage  
Allplan Steel Design

## Etude

Allplan Ferrailage

## Métrés

Allmètre

## Imagerie

Cinéma 4D

## Organisation

MyOffice

## Exploitation

Allfa TT

**N** NEMETSCHKEK

BUILDING THE FUTURE

www.nemetschek.fr Tél 01 46 13 47 00