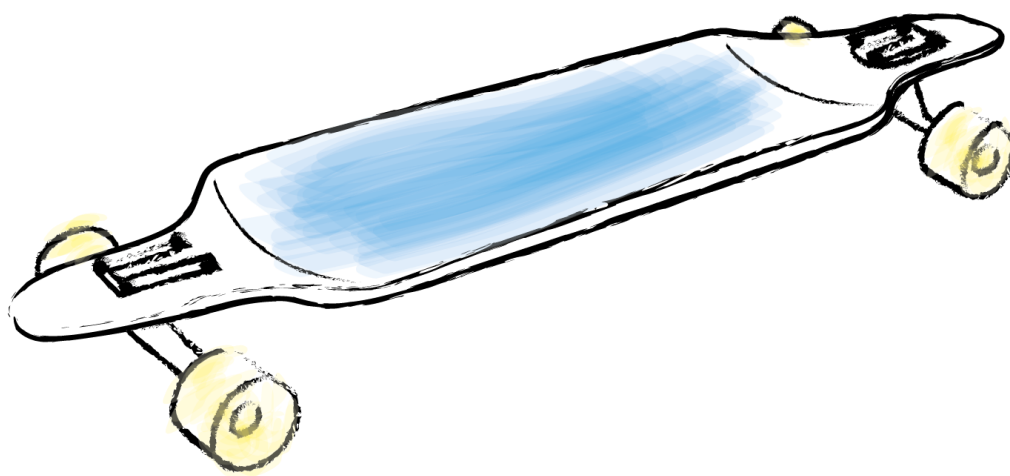


Conception d'un longboard à haute performance

*Claes Fredriksson, Granta Design, 300 Rustat House, 62 Clifton Road, Cambridge, CB1 7EG UK
Benjamin Hornblow, FORCE Technology, Park Allé 345, 2605 Brøndby, Denmark*

Traduction: Nicolas Martin, 300 Rustat House, 62 Clifton Road, Cambridge, CB1 7EG UK

*Première publication en Octobre 2016
© 2016 Granta Design Limited*



Résumé

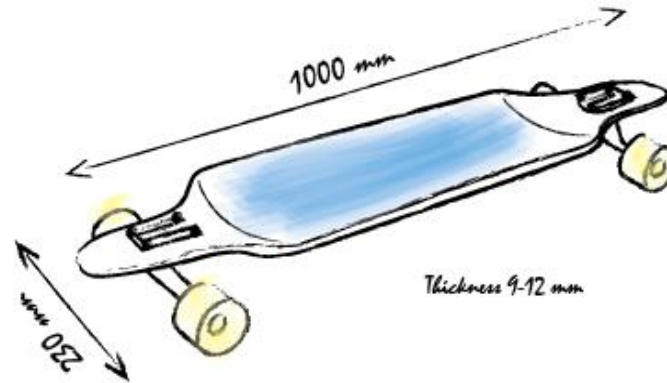
Granta Design développe des logiciels utilisés pour la sélection de matériaux avancée en industrie. CES EduPack est la version éducative conçue spécifiquement pour identifier et guider les étapes du processus de décision dans un but pédagogique et de formation. Nos études de cas industriels avancées, associées à un produit réel, favorisent la compréhension et motivent les étudiants. Dans ce document, nous abordons le développement et l'analyse comparative d'un panneau sandwich à double courbure constitué de matériaux composites dans le but d'améliorer la performance d'un certain type de skateboard appelé longboard.

Table des matières

1. Quel est le contexte?	2
2. Comment aborder la problématique ?	3
3. Comment utiliser CES Edupack pour réaliser la sélection de matériaux ?	3
4. Amortissement	6
5. Résultat et vérification réelle	8
6. Qu'apporte CES EduPack à la compréhension ?	10
7. Références	10

1. Quel est le contexte?

Lors du développement de produits, il est déjà difficile d'être certain d'avoir les meilleurs matériaux pour son application. Et lorsqu'il est question des paramètres de conception pour fabriquer un composite, la complexité augmente encore d'un cran. Cependant, être capable d'envisager plusieurs options dès les phases initiales de conception permet d'effectuer des améliorations majeures en ce qui concerne la performance, l'allègement, la réduction des coûts et de l'empreinte écologique. La difficulté qui persiste est de définir quels matériaux utiliser et comment les associer structurellement pour maximiser ces avantages.



Un longboard est une variante de skateboard conçue pour des courses de descente ou de slalom, mais aussi pour se balader ou comme moyen de transport. Comme il est plus long qu'un skateboard classique et possède généralement des roues plus grosses, il favorise les grandes vitesses. Sa masse et son volume plus élevés le rendent moins pratique pour de nombreuses acrobaties mais contribuent à une meilleure stabilité et des mouvements plus fluide du fait de l'élan qu'ils apportent.

Les planches de longboard sont généralement fabriquées à partir de bois contreplaqués, typiquement de deux à onze couches de 2 mm d'épaisseur. Ces bois sont constitués de bouleau, bambou, érable ou chêne par exemple. Les longboards sont commercialement disponibles dans de nombreuses formes et tailles, chacune d'entre elles ayant ses avantages et inconvénients liés à des critères techniques ou à des critères de préférences personnelles du skateboarder.

Les planches peuvent être mises en forme de manière à s'incurver vers le haut ou vers le bas le long de la planche. Elles peuvent aussi être à double courbure : concave sur la largeur et convexe sur la longueur. De plus, certaines planches sont conçues pour être flexibles, ce qui est généralement requis pour un usage à faible vitesse car, à grande vitesse, une planche flexible peut présenter une flexion en torsion qui est une des causes d'oscillations. Les fibres de verre sont utilisées dans de nombreuses nouvelles planches car elles sont légères comme le carbone mais plus facilement pliables.

Dans cette étude de cas, nous avons investigué à l'aide de CES EduPack le développement d'une structure multicouche pour planche à double courbure d'un longboard. Ceci s'appuie sur les travaux réalisés par FORCE Technology, un institut de développement industriel de composites au Danemark [1]. Nous détaillons le processus de comparaison de matériaux, de définition des matériaux composites modèles à l'aide de l'outil Synthesizer, puis de l'utilisation de ces nouvelles fiches matériaux composites pour construire une structure sandwich de compétition à l'aide de ce même outil. La démarche est expliquée en détail et une analyse comparative des résultats est faite avec les matériaux réellement utilisés dans le commerce.

2. Comment aborder la problématique ?

Nous allons débiter l'étude par l'identification des différents matériaux utilisés pour planches de longboard puis déterminer les propriétés clés pour la performance. La résistance en traction est bien évidemment l'un des critères cruciaux du fait que les planches doivent être suffisamment solides. Cependant, ce n'est pas cette propriété qui freine la performance, mais plutôt, comme pour d'autres équipements utilisés pour la pratique du sport et de la course (skis, raquettes, voitures, etc.), c'est *une conception contrainte en rigidité (pour empêcher la déflexion de la planche)*. Dans la figure ci-dessous, différentes sortes de matériaux pour planches communément utilisées sont montrées. Nous nous concentrerons sur la performance, de ce fait le critère de coût ne sera pas abordé dans cette étude de cas.

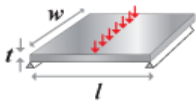
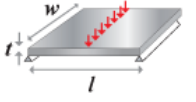


De gauche à droite : à l'extrémité basse des prix, une planche classique en érable, qui a typiquement 5 à 8 épaisseurs de contreplaqués perpendiculaires les unes aux autres. Puis une planche en bambou unidirectionnel et enfin une structure allégée en panneau sandwich associant des couches de composite à fibres de carbone, d'érable et de composite à fibres de verre. Ces dernières coûtent généralement plus de \$100. Bien que la masse de la planche apporte de la stabilité au longboard, cette caractéristique ne contribue pas aux grandes vitesses lors de descente du fait de l'inertie élevée. C'est plutôt une friction et une résistance à l'air faibles qui favorisent la vitesse. D'un autre côté, en montée, la masse impacte fortement la vitesse. Il est de ce fait naturel de rechercher à minimiser la masse lors du choix de matériau pour planche. Un autre critère, qui influence le confort et la sécurité des déplacements, est l'amortissement du matériau. Il est souhaitable de trouver un matériau qui minimise les vibrations car celles-ci sont gênantes. Par conséquent, les objectifs seront de minimiser la masse et de maximiser l'amortissement.

3. Comment utiliser CES Edupack pour réaliser la sélection de matériaux ?

La planche du longboard est en soit très similaire à un panneau contraint en flexion. Le tableau des indices de performance, disponible via le bouton **S'instruire** dans CES EduPack, nous indique de maximiser la racine cubique du module en flexion E_f divisé par la densité ρ . Pour minimiser les vibrations, la même expression multipliée par le facteur de perte (amortissement), η , doit être maximisée (voir ci-dessous). Un récapitulatif des exigences de conception est donné en page 4 [2].

Stiffness-limited design at minimum mass

FUNCTION AND CONSTRAINTS ¹			MAXIMIZE ²	MINIMIZE ²
Panel in bending		length, width fixed; thickness free	$E_t^{1/3} / \rho$	$\rho / E_t^{1/3}$
Panel in bending		optimize for resonant frequency; length, width fixed; thickness free	$E_t^{1/3} / \rho$	$\rho / E_t^{1/3}$
		optimize for vibration amplitude; length, width fixed; thickness free	$\eta E_t^{1/3} / \rho$	$\rho / \eta E_t^{1/3}$

Le point de départ pour la sélection de matériaux est les données des fiches de près de 4000 matériaux d'ingénierie disponibles dans le niveau 3 de CES EduPack. Ceux-ci ne sont pas tous candidats potentiels pour une planche de longboard. Il est possible d'appliquer des contraintes pour limiter le nombre de matériaux. Ces contraintes sont en grande partie définies à partir des planches existantes présentées plus haut.

Fonction :

L'application est ici **un panneau contraint en flexion**, limité par la **rigidité** (nous ne voulons pas que la planche fléchisse de trop). Les variables libres de conception sont l'épaisseur du panneau et l'association de matériaux.

Contraintes :

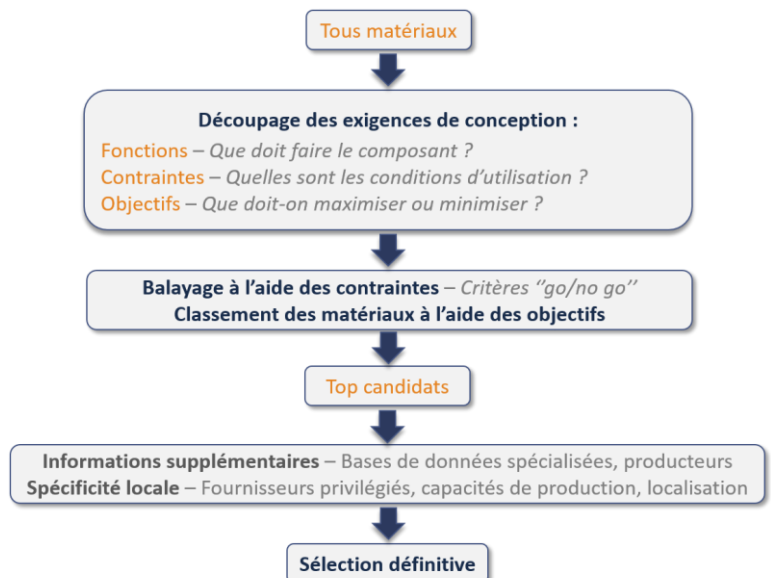
Ces contraintes sont en grande partie définies à partir des planches du commerce :

- *Température de service* : -20°C à +60°C
- *Densité*: < 3000 kg/m³
- *Module de Young* > 1 MPa
- *Résistance à la pluie et l'eau* :

Limited/Acceptable/Excellent

Objectifs :

Un tableau des indices de performances classiques en ingénierie est accessible via le bouton **S'instruire** ou **Aide** de la barre d'outils du logiciel. Pour de **faibles masses** dans une conception limitée par la rigidité et pour une conception **limitée par la vibration**, nous devons maximiser $M1 = E^{1/3} / \rho$ (masse) et $M2 = \eta * E^{1/3} / \rho$ (amortissement) respectivement.



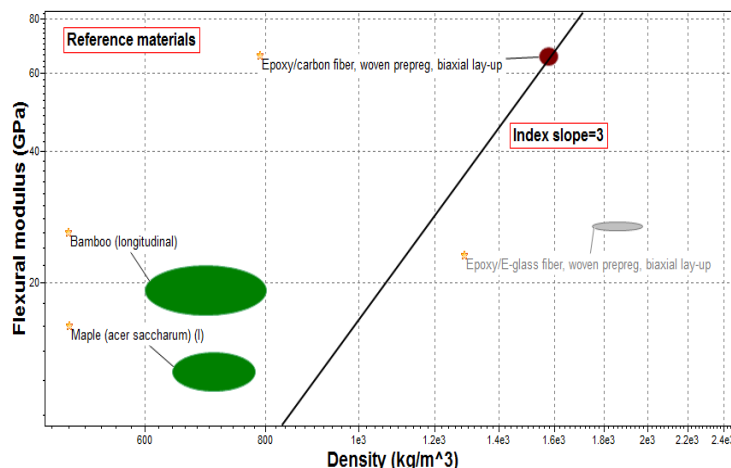
Performance Indices for Materials				
Click on the buttons to view a table of relevant performance indices.				
Stiffness-limited design	kg	\$	H_m	CO_2
Strength-limited design	kg	\$	H_m	CO_2
Vibration-limited design				
Damage-tolerant design				
Abrasion-resistant design				
Thermo-mechanical design				
Electro-mechanical design				
Vapor barrier design				
Strength-limited design to optimize performance				

Pour une conception limitée par la vibration, CES EduPack fournit les indices de performance dans une section isolée, comme nous pouvons le voir sur la gauche.

Une approche fréquente pour le développement de produit en industrie, dans le but d'améliorer ceux existants, est de partir des matériaux actuellement utilisés, tels que ceux des planches montrées précédemment en page 3, comme point de départ. Ces matériaux peuvent être pris en compte en tant que références dans un sous-ensemble défini par l'utilisateur (définissez votre propre sous-ensemble) en les marquant comme favoris. Un concepteur expérimenté

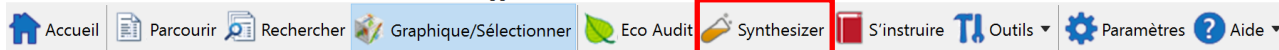
essayerait ensuite de nouvelles associations et améliorations puis ferait une analyse comparative de celles-ci avec les matériaux existants. Dans cette étude de cas, nous allons suivre cette méthode et tester plusieurs configurations structurales à l'aide des quelques matériaux communs, en faisant appel à l'outil Synthesizer pour guider nos développements.

Dans le but d'évaluer la performance et d'avoir une vue d'ensemble, il est utile de tracer un graphique à l'aide du sous-ensemble des matériaux des planches de référence. A l'aide d'une droite d'indice de performance de pente 3 (échelle logarithmique), ce qui correspond à l'exposant 1/3 dans les expressions des indices, nous pouvons voir que le bambou est le matériau le plus performant, surclassant même le composite époxy renforcé par fibres de carbone (CFRP), aussi dépassé par l'érable à fibres longitudinales. Le composite époxy renforcé par fibres de verre (GFRP) se place en dernier dans cette comparaison.



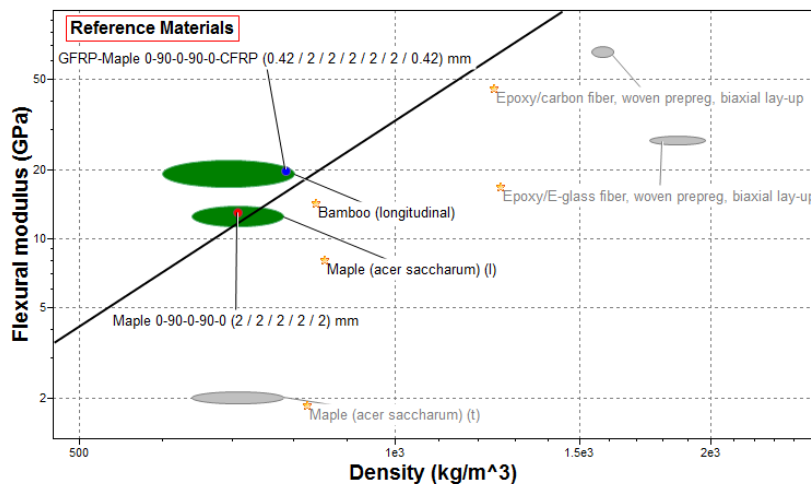
Quel serait l'effet d'un laminage de l'érable ou d'une mise en structure sandwich de celui-ci entre des couches en composite ? Cela peut être exploré à l'aide de l'outil Synthesizer, disponible dans la plupart des éditions avancées de CES EduPack.

Fichier Modifier Afficher Sélectionner Outils Fenêtre Vos suggestions Aide



Il est possible de répondre à ces deux questions à l'aide du modèle multicouches disponible dans l'outil Synthesizer. Deux modèles de 5 et 7 couches ont été créés en empilant alternativement des couches transversales et longitudinales d'érable de 2 mm puis en ajoutant une peau inférieure et une peau supérieure de 0,42 mm de GFRP et CFRP préimprégné tissé biaxial respectivement. Les résultats sont comparés dans le graphique suivant.

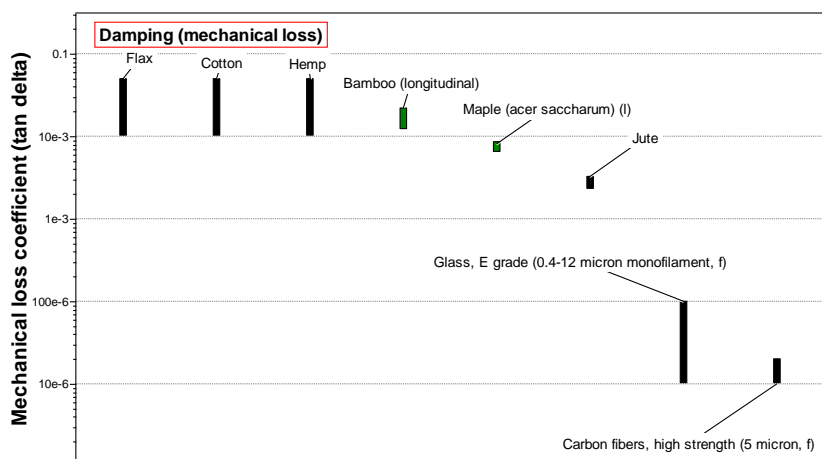




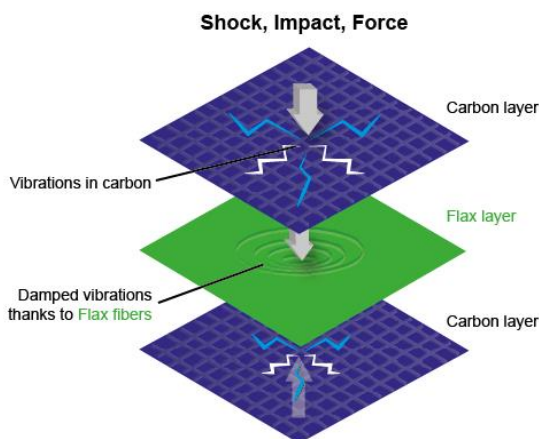
Par comparaison au bambou, ni le laminage ni la mise en structure sandwich de l'érable au sein de couches en composite n'améliorent la performance vis-à-vis de l'indice. Pour améliorer la performance du skateboard à planche en bambou, il est nécessaire de faire croître le module en flexion et/ou de réduire la densité. La performance de structures suggérées peut être évaluée grâce à l'outil Synthesizer avant la construction de prototypes.

Cela peut être fait en parallèle de l'amélioration des propriétés d'amortissement.

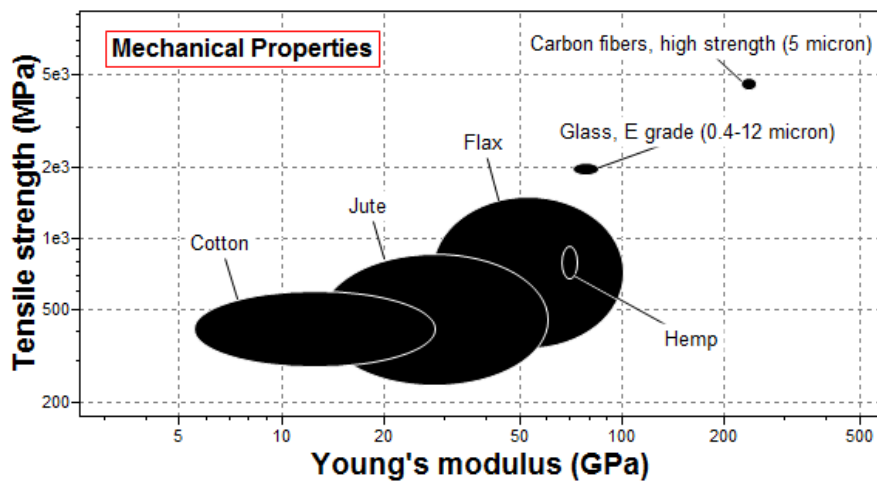
4. Amortissement



Si nous nous penchons sur le second objectif, lié à l'amortissement des vibrations du longboard, nous pouvons voir que certaines fibres naturelles sont bien supérieures à celles utilisées dans le CFRP ou le GFRP lorsqu'il est question du facteur de perte. Le chanvre ou le lin sont des fibres disponibles qui peuvent être utilisées comme renforts dans des composites et contribueront à la réduction des vibrations de la planche. Le résultat pour le second objectif, M2, est identique.



Un produit commercial s'appuyant sur cette idée est mis sur le marché par Lineo [3]. Si les fibres naturelles sont mises en sandwich entre des peaux en CFRP, elles peuvent contribuer à l'augmentation du module de flexion et de l'amortissement. Le choix de fibres en lin est privilégié car elles produisent d'excellentes performances en amortissement et de bonnes propriétés mécaniques, comme montré ci-dessous. Des fractions volumiques allant jusqu'à 50 % de lin dans une matrice époxy sont proposées par ce fournisseur : *FlaxTapeTM* and *FlaxPregTM* [3].



La résistance en traction en fonction de la rigidité est proposée sur la gauche pour des fibres d'usage commun. En termes de rigidité, les fibres naturelles sont en compétition avec la rigidité mais pas avec les fibres de carbone. Le lin (flax) est, potentiellement, meilleur que le chanvre (Hemp) à la fois en rigidité et en résistance en traction. L'outil Synthesizer peut être employé pour estimer les propriétés, sous le modèle de

liaisons simples parfaites, de composite à base de fibres de lin unidirectionnelles dans une matrice époxy.

Le modèle unidirectionnel à liaison interfaciale parfaite dans l'outil Synthesizer a été utilisé pour produire deux fiches matériaux avec 40% et 50% de fraction massique dans une matrice époxy. Celles-ci peuvent être visionnées dans le graphique de la section suivante. Nous utilisons ensuite la fiche composite synthétisée à 50% de fibres (plus haute valeur de E_f et disponible commercialement) dans un nouveau modèle à 7 couches. Pour réduire la densité, une mousse rigide en PET est utilisée en tant que cœur du matériau.

Les détails des paramètres du modèle utilisé sont précisés dans les notes incluses dans la fiche matériau, comme montré ici à droite. Pour des raisons pédagogiques, il est important de discuter des limites de ces modèles, ce qui explique la section "Warning". Toutes les hypothèses ainsi que les équations employées sont accessibles via le bouton **Aide** puis dans la section **Tools**.

Notes

Warning ⓘ

The accuracy of the multilayer model calculations varies between properties. In particular, caution should be exercised when making decisions based on: Price, flexural strength and through-thickness thermal conductivity. In these cases refer to the model assumptions.

Notes

Source records

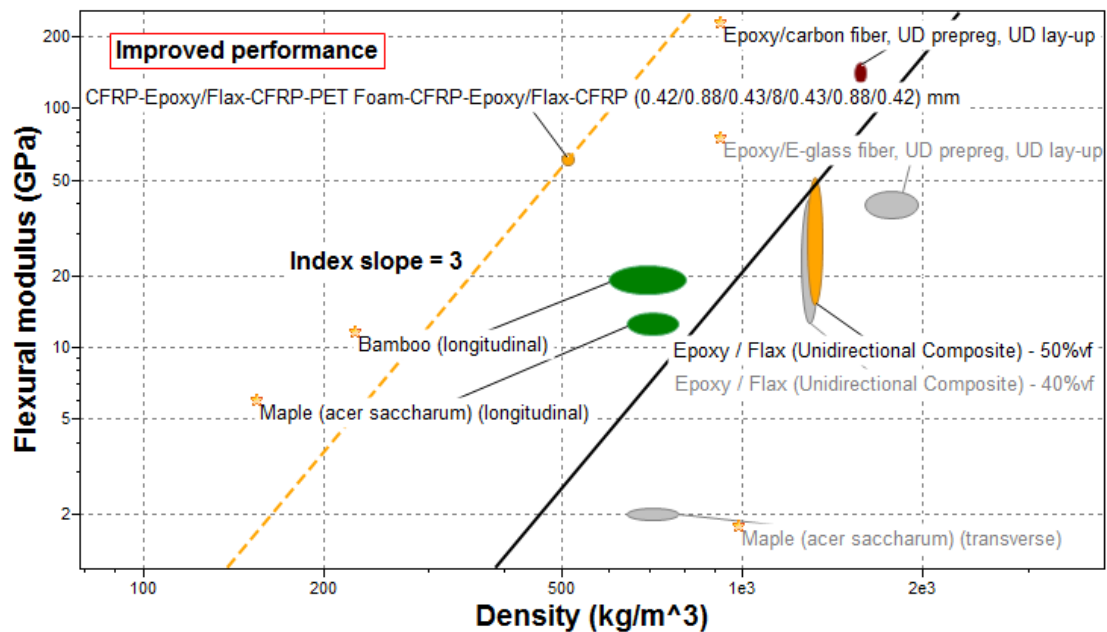
Layer 7 (top) = Epoxy/carbon fiber, woven prepreg, biaxial lay-up
 Layer 6 = Epoxy / Flax (Unidirectional Composite) - 50%vf
 Layer 5 = Epoxy/carbon fiber, woven prepreg, biaxial lay-up
 Layer 4 = Polyethylene terephthalate foam (closed cell, 0.108)
 Layer 3 = Epoxy/carbon fiber, woven prepreg, biaxial lay-up
 Layer 2 = Epoxy / Flax (Unidirectional Composite) - 50%vf
 Layer 1 (bottom) = Epoxy/carbon fiber, woven prepreg, biaxial lay-up

Parameters

Thickness layer 7 (top) = 0.42 mm
 Thickness layer 6 = 0.88 mm
 Thickness layer 5 = 0.43 mm
 Thickness layer 4 = 8 mm
 Thickness layer 3 = 0.43 mm
 Thickness layer 2 = 0.88 mm
 Thickness layer 1 (bottom) = 0.42 mm

Model: Multi-layer Materials, 7-layer
 Date of analysis: 11 October 2016

5. Résultats et vérification réelle

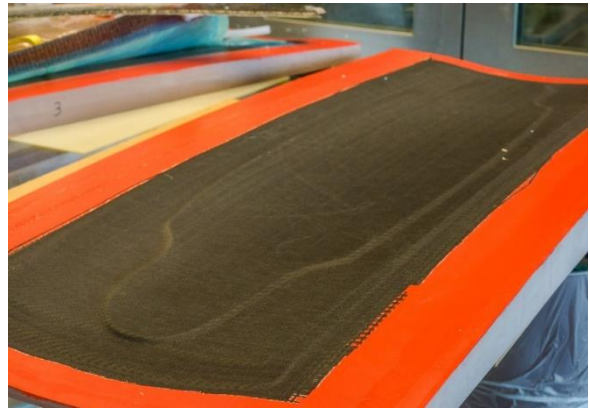


Le graphique obtenu montre que la structure à 7 couches proposée, avec le cœur en mousse PET et les couches composites en peau, apporte une amélioration significative de la performance. Des simulations complémentaires (calculs en éléments finis etc.) sont nécessaires mais la démarche à l'aide de l'outil Synthesizer a fourni une ligne directrice et peut de ce fait réduire fortement les coûts, les efforts et la durée de la phase développement.

Cette étude de cas a aussi montré comment un ingénieur peut utiliser les données et graphiques de CES EduPack pour prendre des décisions avisées sur l'amélioration de la conception d'une planche de longboard. Elle sert d'exemple réel pour les étudiants, étant donné qu'elle a été mise en place par un institut au Danemark, FORCE, dans le but d'utiliser les composites pour améliorer les performances. Des prototypes d'une combinaison très semblable avec une peau en epoxy/lin et un cœur de mousse rigide en PET ont été fabriqués par FORCE Technology et sont envisagés pour un développement commercial. Certaines données expérimentales de ces prototypes sont fournies ci-dessous (les photos ont été fournies par Benjamin Hornblow de FORCE Technology)

Longboard	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Déflexion, Flexion 3 points [mm]
Référence	9.8	1685	14
Panneau sandwich Carbone/lin	11	1180	15
Différence		505 (30% de réduction de la masse)	

Les étapes de fabrication par FORCE Technology d'un longboard composite CFRP+ composite Epoxy/lin avec un cœur en mousse PET sont montrées ci-dessous : Mise en forme de la mousse PET, puis l'étape de cuisson (en haut), vue de la section du prototype final et l'utilisateur en phase de test (en bas).



6. Qu'apporte CES EduPack à la compréhension ?

CES EduPack génère de manière interactive des résultats quantitatifs et fortement visuels qui, associés à l'expertise matériaux d'un enseignant, contribuent à l'enseignement du processus de conception et de la prise de bonnes décisions sur le choix de matériaux.

CES EduPack aide à proposer les conclusions suivantes :

- Il identifie l'indice de performance propre à la problématique, ici celui pour un panneau contraint en flexion limité par la rigidité, donnant une bonne vue d'ensemble des propriétés des matériaux existants. Cela fournit un bon point de départ pour le développement de produit et une feuille de route pour les améliorations.
- Les planches de longboard en bambou ou érable commercialement disponibles peuvent difficilement être améliorées. Un laminage ou mise en sandwich de couches fines n'améliorent pas la performance.
- Une idée tirée d'un composite époxy/lin commercialement disponible peut être explorée, par dans un premier temps la création d'une fiche composite à liaison simple parfaite, puis par l'utilisation de ce matériau dans un modèle à 7 couches de l'outil Synthesizer avec un cœur en mousse PET au lieu du bois. Cela aboutit à un résultat beaucoup plus performant.
- CES EduPack a permis de suivre une voie de développement prise par FORCE Technology au Danemark pour développer et fabriquer un prototype de longboard dans leurs laboratoires. Les tests montrent qu'une solution sandwich avec des peaux en composite CFRP et époxy/lin et un cœur en mousse PET apporte un allègement de 30% de la masse ainsi qu'une expérience utilisateur plus agréable.



7. Références

1. Benjamin Hornblow, spécialiste composite, FORCE Technology, www.forcetechnology.com
2. La méthodologie est explicitée, par exemple, dans Ashby, M.F. (2005) "Materials Selection in Mechanical Design", 3rd edition, Butterworth Heinemann, Oxford, UK. ISBN 0-7506-6168-2.
3. La page d'accueil et la description des produits sont accessibles via www.lineo.eu