



Enseigner les Matériaux et les Procédés aux étudiants de 1^{ère} et 2^{ème} année de l'enseignement supérieur.

Michael Ashby, Professeur émérite, Département d'ingénierie, Université de Cambridge, Royaume-Uni

Première publication en septembre 2007. Seconde édition mai 2012
© 2012 Granta Design Limited

Approches pédagogiques pour l'enseignement des matériaux

Intéresser et motiver les étudiants de première et deuxième année de l'enseignement supérieur est un véritable défi. Lorsque l'on donne des cours aux étudiants en science des matériaux et en physique, il est pertinent de commencer au niveau de l'atome pour ensuite élargir le champ d'étude à la physique moléculaire, aux liaisons chimiques, structures cristallines ainsi qu'à la thermodynamique et cinétique des alliages, avant d'aborder pour finir les propriétés des matériaux (Cf. *Illustration 1*, à lire de gauche à droite).

Cependant, les étudiants en cursus d'ingénieur trouvent souvent cette démarche trop abstraite et éloignée des objectifs qui les motivent. Ces étudiants, futurs ingénieurs, sont destinés à concevoir et gérer des produits. Que doivent-ils alors savoir sur les matériaux afin de pouvoir les choisir et les utiliser correctement? Tout d'abord, ils doivent acquérir une vision globale du monde des matériaux, c'est à dire des «familles» de métaux, polymères, verres, céramiques et composites, ainsi que des procédés permettant leur mise en forme, leur assemblage et leur finition. De plus, les ingénieurs ont besoin de comprendre et d'appréhender les propriétés des matériaux

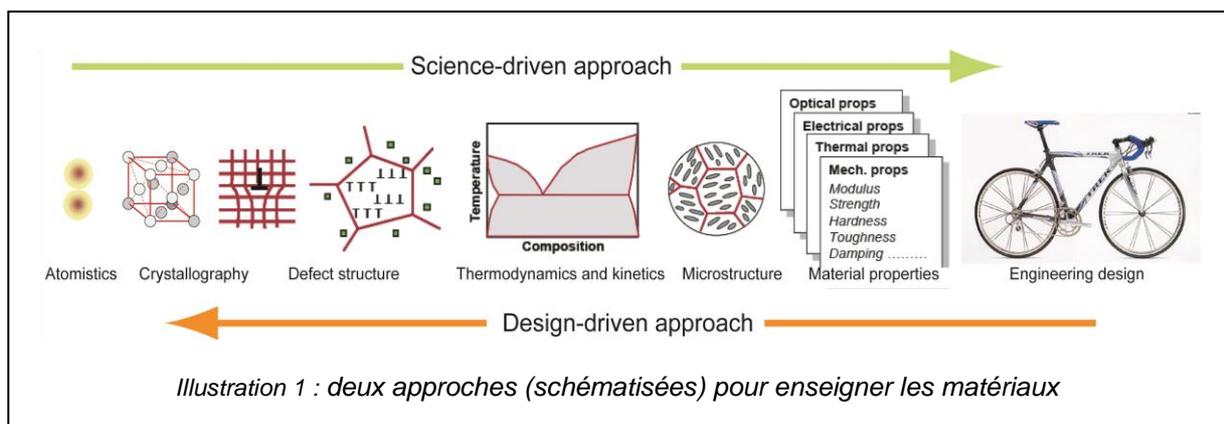


Illustration 1 : deux approches (schématisées) pour enseigner les matériaux

et la façon dont elles peuvent être manipulées. En outre, ils doivent acquérir des méthodes pour choisir parmi ces familles les matériaux et les procédés qui répondent le mieux aux exigences de conception. Pour finir, l'accès aux données sur les propriétés des matériaux est indispensable. Etant donné l'abondance d'informations et le manque de fiabilité des méthodes manuelles qui se révèlent fastidieuses, il apparaît que les techniques informatiques sont l'outil idéal pour solutionner l'accès et le traitement de ces données sur les matériaux.

A l'Université de Cambridge, nous avons pu mettre au point une démarche pédagogique permettant aux étudiants en ingénierie d'acquérir une compréhension globale de ces objectifs, et ce grâce à notre collaboration avec Granta Design ainsi qu'avec des collègues de nombreuses universités. Nous commençons par une introduction des méthodes de conception et du rôle que jouent les données matériaux dans ces processus de conception. Les propriétés des matériaux sont représentées sur des graphiques qui permettent de saisir en un coup d'œil les valeurs typiques d'une propriété. Ces graphiques servent alors d'outil de sélection pour choisir des matériaux répondant aux contraintes de conception. Une fois que l'on a établi la pertinence d'une propriété pour la conception, il devient logique d'approfondir le sujet et de se pencher sur les concepts scientifiques sous-jacents, en démontrant d'où vient cette propriété et comment elle peut être manipulée (*illustration 1*, à lire de droite à gauche).

**Aperçu des ressources
accompagnant CES EduPack:**

- **Des cours au format PowerPoint**
- **Des exercices avec leurs solutions**
- **Des fichiers de projets à réaliser**
- **Des livres blancs**
- **Des bases de données en accès libre**
- **Des graphiques de matériaux**
- **Des posters**

Tout comme la démarche scientifique, l'approche axée sur la conception requiert des outils et des ressources pour motiver et faire participer les étudiants. En développant nos cours axés sur une approche de type conception, nous avons créé un certain nombre d'outils et de ressources qui se révèlent être particulièrement utiles aux cours d'introduction, quelle que soit la méthode et l'approche qu'ils suivent.

Organisation de l'information

De nos jours, les supports visuels deviennent indispensables pour l'enseignement. Une introduction visuelle aux matériaux conviendra aux étudiants de toutes les disciplines. La présentation des informations, structurée de façon claire, aide également l'étudiant à naviguer à travers les différentes familles de matériaux sans se sentir perdu. Nos bases de données reflètent l'interdépendance entre les propriétés des matériaux et des procédés de fabrication. Les données matériaux sont complétées par des informations sur les procédés, ces deux domaines étant reliés entre eux de façon claire et interactive. Des données sur les producteurs des matériaux ainsi que sur les références des sources utilisées sont également

accessibles et reliées au sein de la base de données. Sur l'illustration 2, on peut ainsi voir la structure de la base de données ainsi que les liens qui existent entre chacune des tables existantes. L'illustration 3 montre des exemples d'images utilisées pour illustrer les fiches matériaux de la base de données. Ces illustrations sont conçues pour interpeller les étudiants, et cela quelle que soit la discipline qu'ils étudient.

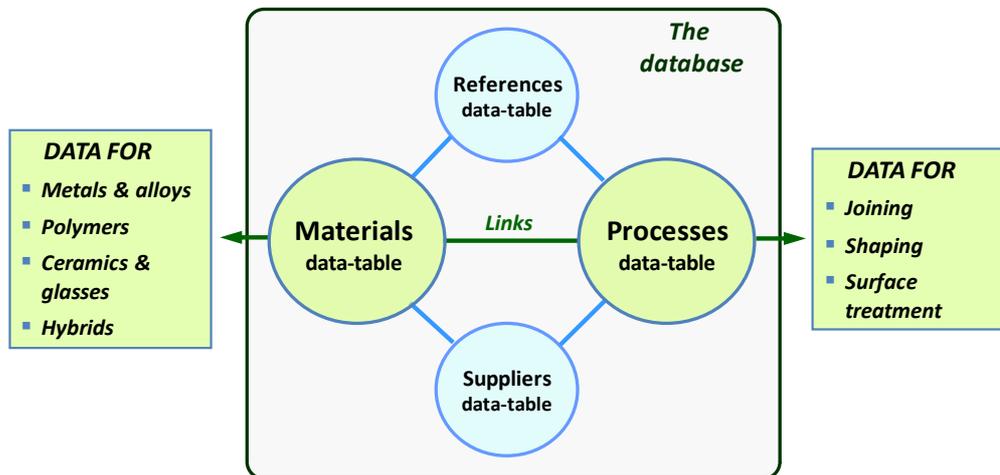


Illustration 2 : structure de l'information dans CES EduPack.

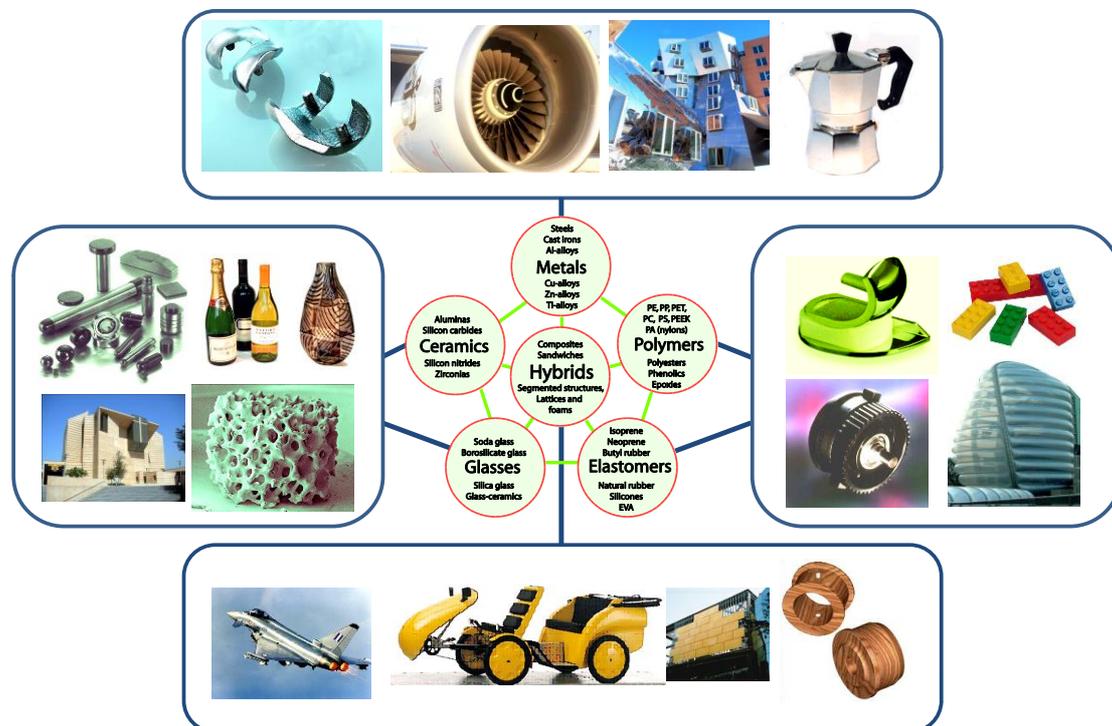


Illustration 3 : exemples de matériaux appartenant à différentes familles de matériaux, adaptés aux étudiants de toutes les disciplines.

Graphiques de propriétés, sélection et fondements scientifiques

L'illustration 4 est un exemple de graphique représentant les propriétés des matériaux (dans ce cas le module de Young, E , en fonction de la masse volumique, ρ). L'échelle pour l'axe des abscisses et des ordonnées est choisie de façon à inclure tous les matériaux, des mousses les plus légères et souples aux métaux les plus lourds et rigides. Les propriétés de chaque famille de matériaux (les polymères par exemple) sont regroupées entre elles. Dans tous les cas, les écarts au sein de la gamme de valeurs d'une propriété *pour une famille particulière* sont beaucoup moins importants que dans la gamme de valeurs *de l'ensemble des matériaux* pour la même propriété. Comme on peut le voir sur le graphique, il est possible de regrouper visuellement les données pour chaque famille en les recouvrant d'une enveloppe colorée étiquetée à leur nom. Des bulles représentant les valeurs des catégories et sous-catégories de matériaux se trouvent à l'intérieur de chaque enveloppe. Toutes les propriétés des matériaux peuvent être représentées de cette façon. On obtient ainsi un ensemble d'outils permettant que la sélection des matériaux réponde aux contraintes de conception qui ont été définies. Les méthodes pour utiliser ces outils font partie intégrante de notre enseignement axé sur la conception.

Dans les cours d'introduction, qu'ils suivent ou non une pédagogie axée sur la conception, les graphiques peuvent être utilisés pour se pencher sur un ensemble de questions : pourquoi les membres d'une même famille de matériaux se regroupent-ils ainsi qu'on peut le voir sur les graphiques? Quels sont les facteurs déterminant la position de ces bulles sur les graphiques? De toute évidence, certaines propriétés sont étroitement liées entre elles : pourquoi? Comment les propriétés peuvent-elles être manipulées pour mieux répondre aux exigences de conception? Ces questions constituent d'excellentes transitions qui permettent de rester pertinent auprès des étudiants en ingénierie et d'aborder les principes scientifiques sous-jacents aux différentes familles de matériaux, tels que : les liaisons atomiques et les liens entre densité, point de fusion et rigidité ; les défauts structurels jouant sur la dureté, solidité et rigidité ; la dynamique des propriétés et le comportement magnétique des matériaux.

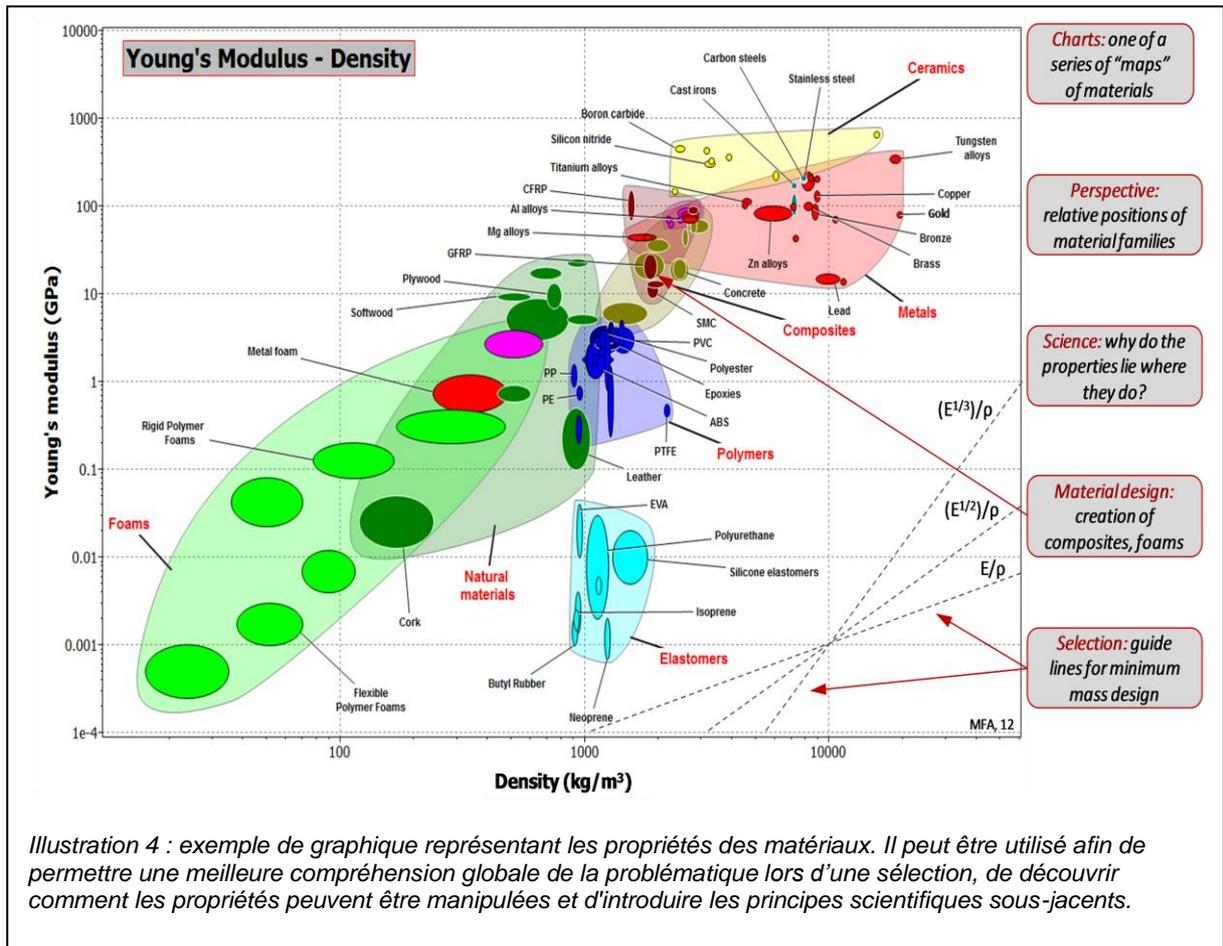


Illustration 4 : exemple de graphique représentant les propriétés des matériaux. Il peut être utilisé afin de permettre une meilleure compréhension globale de la problématique lors d'une sélection, de découvrir comment les propriétés peuvent être manipulées et d'introduire les principes scientifiques sous-jacents.

Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)

The Material

ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene) is tough, resilient, and easily molded. It is usually opaque, although some grades can now be transparent, and it can be given vivid colors. ABS-PVC alloys are tougher than standard ABS and, in self-extinguishing grades, are used for the casings of power tools.

General properties

Density	1e3 - 1.2e3	kg/m ³
Price	2 - 2.7	USD/kg

Mechanical properties

Young's modulus	1.1 - 2.9	GPa
Hardness - Vickers	5.6 - 15	HV
Elastic limit	19 - 51	MPa
Tensile strength	28 - 55	MPa
Compressive strength	31 - 86	MPa
Elongation	1.5 - 1e2	%
Endurance limit	11 - 22	MPa
Fracture toughness	1.2 - 4.3	MPa.m ^{1/2}

Thermal properties

Thermal conductivity	0.19 - 0.34	W/m.K
Thermal expansion	85 - 230	μstrain/°C
Specific heat	1400 - 1900	J/kg.K
Glass Temperature	88 - 130	°C
Max service temp.	62 - 90	°C

Electrical properties

Resistivity	2.3e21 - 3e22	μhm.cm
Dielectric constant	2.8 - 2.2	

Typical uses

Safety helmets; camper tops; automotive instrument panels and other interior components; pipe fittings; home-security devices and housings for small appliances; communications equipment; business machines; plumbing hardware; automobile grilles; wheel covers; mirror housings; refrigerator liners; luggage shells; tote trays; mower shrouds; boat hulls; large components for recreational vehicles; weather seals; glass beading; refrigerator breaker strips; conduit; pipe for drain-waste-vent (DWV) systems.

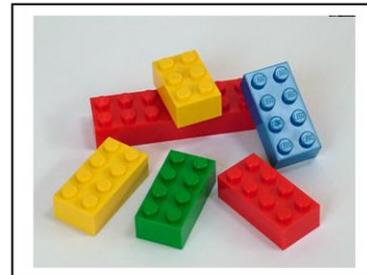


Illustration 5 : extrait de la fiche matériau de l'ABS (source : CES EduPack)

Choisissez l'édition de CES EduPack qui correspond le mieux à vos besoins pour vos cours:

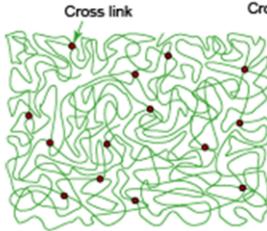
- **Standard (édition générale pour les cursus d'ingénierie)**
- **Aéronautique**
- **Architecture**
- **Bio-ingénierie**
- **Design (niveaux adaptés aux cours d'introduction)**
- **Eco-Design**
- **Polymères**
- **Développement durable et environnement construit**
- **Production d'énergie à faible empreinte carbone**

Le recours à ces graphiques pour explorer le monde des matériaux permet de motiver les étudiants. Cependant, au cours de l'apprentissage, il est nécessaire de compléter et d'approfondir ces ressources. Le logiciel CES EduPack, développé spécifiquement pour répondre aux besoins de l'enseignement, se révèle utile en ce sens : les étudiants peuvent en effet créer des graphiques à partir de n'importe quelle combinaison de propriétés puis utiliser le zoom pour cibler toute partie du graphique, et ouvrir enfin la fiche recensant les propriétés du matériau recherché (l'illustration 4 a été réalisée avec le logiciel [1]).

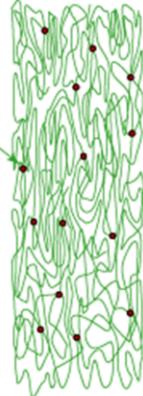
Le logiciel comprend des outils de sélection afin de répondre à des exigences complexes de conception. En outre, sa démarche pédagogique s'appuie sur l'accès qu'elle donne aux différents principes et explications scientifiques. Sur l'illustration 5, on peut voir un extrait d'une fiche matériau. Cette fiche introduit en premier lieu une description du matériau ainsi qu'une image d'un objet connu des étudiants et fabriqué à partir de ce matériau - une information qui se révèle pertinente pour la conception industrielle.

Young's modulus (cont)

...
 One class of materials – elastomers (rubber) – have moduli that are much less than 1 GPa. An elastomer is a tangle of long-chain molecules with occasional cross-links, as in Figure 4 as explained in Density and atom packing. The bonds between the molecules, apart from the cross-links, are weak – so weak that, at room temperature, they have melted.
 ...



(a) Undeformed



(b) Stretched

Further reading.

Author	Title	Chapter
Ashby et al	Materials: Engineering, Science, Processing & ...	4,5
Ashby & Jones	Engineering Materials Vol 1&2	V1: Chp3,6,7
Askeland	The Science & Engineering of Materials	2,6
Budinski	Engineering Materials: Properties & Selection	2
Callister	Materials Science & Engineering: An Introduction	6

Illustration 6 : extrait d'une note scientifique sur le module de Young.

Plus bas dans la fiche, on trouve une liste des propriétés du matériau et une énumération des utilisations les plus fréquentes. Dans les niveaux les plus avancés du logiciel, on accède à des recommandations pour la conception, des notes techniques ainsi que des remarques concernant l'impact environnemental. Chaque champ (par exemple le Module de Young) présent dans ces fiches matériaux contient un lien qui permet d'ouvrir une note scientifique sous forme de fichier texte. Ces notes fournissent une définition de chaque propriété, des explications sur la façon dont elle est mesurée et sur son origine, ainsi que des liens bibliographiques de référence pour en savoir plus. Sur l'illustration 6, on peut voir un extrait d'une note scientifique. Enfin, chaque fiche matériau comporte des liens vers une autre base de données sur les procédés de fabrication. On peut alors voir de quelles façons le matériau peut être mis en forme, assemblé, quelles finitions peuvent lui être

Description

No other process has changed product design more than INJECTION MOLDING. Injection molded products appear in every sector of product design: consumer products, business, industrial, computers, communication, medical and research products, toys, cosmetic packaging and sports equipment. The most common equipment for molding thermoplastics is the reciprocating screw machine, shown schematically in the figure...

Shape

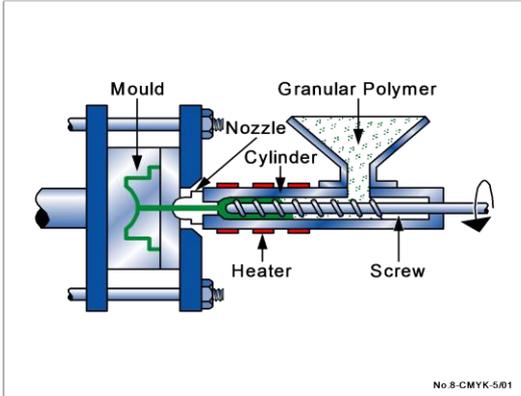
Circular Prism	True
Non-circular Prism	True
Solid 3-D	True
Hollow 3-D	True

Physical attributes

Mass range	0.01 - 25	kg
Roughness	0.2 - 1.6	µm
Section thickness	0.4 - 6.3	mm
Tolerance	0.1 - 1	mm

Process characteristics

Discrete	True
Prototyping	False



Economic attributes

Economic batch size	1e+04 - 1e+06
Relative tooling cost	high
Relative equipment cost	high

Cost modeling

Relative cost index 

Typical uses

Injection molding is used

Illustration 7 : extrait de la fiche d'un procédé de fabrication sur le moulage à injection dans le logiciel CES EduPack.

apportées. Il est ainsi possible d'obtenir davantage d'informations sur un procédé donné, de voir quelles sont les contraintes et les limites, quelles formes peuvent être produites. Les fiches matériaux et procédés comprennent également des données environnementales et des attributs économiques. De plus, on trouve une modélisation du coût sous une forme assez simplifiée, afin de familiariser les étudiants avec des concepts tels que la taille de lot, la vitesse de production et le coût de l'outillage.

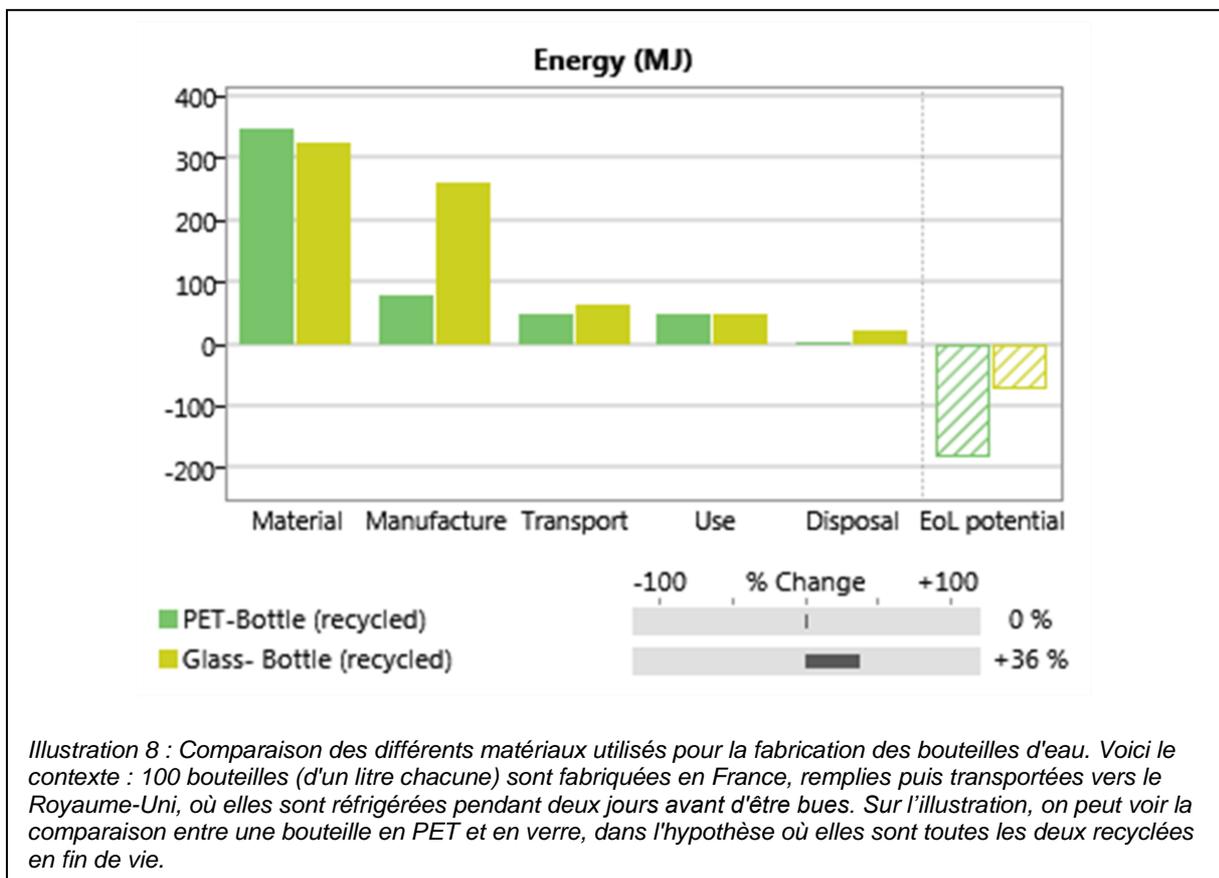
Enfin, chaque fiche procédé contient des liens vers les matériaux que ce procédé peut mettre en œuvre. Sur l'illustration 7, on peut voir un extrait d'une fiche procédé sur le moulage à injection. Dans la pratique, CES EduPack s'est avéré être un logiciel au contenu particulièrement pertinent : il fournit un support visuel, simple et motivant, que les étudiants peuvent utiliser pour aller à la découverte de l'univers des

matériaux et des concepts scientifiques fondamentaux. Cette ressource établit ainsi un lien entre les principes scientifiques et leurs applications en conception. Les démarches de ce type contribuent à permettre une meilleure compréhension globale du monde des matériaux et peuvent se révéler particulièrement adaptées lorsque l'on cherche à susciter l'intérêt des étudiants de première et deuxième année.

L'environnement vu autrement

CES EduPack permet d'obtenir rapidement une vision globale de l'impact environnemental d'un produit, et ce dès le début de la conception, en donnant un aperçu de la consommation énergétique et de l'empreinte carbone lors des différentes étapes de la vie du produit.

La répartition de l'impact environnemental en différentes phases de vie (production du matériau brut, fabrication du produit, transport, utilisation, élimination et fin de vie) permet aux étudiants d'estimer quelle phase de vie risque de dominer en termes de conséquences environnementales et quelles mesures peuvent être prises pour y remédier dès le début du processus de conception. En outre, l'outil Eco-Audit permet d'élaborer différents scénarios de conception et de les comparer entre eux. On peut alors voir lequel permet de réduire l'impact environnemental en matière de consommation énergétique ou d'empreinte carbone. Grâce à l'outil éco audit, on peut identifier beaucoup plus facilement les situations dans lesquelles le choix des matériaux utilisés ou des procédés de fabrication a un impact environnemental significatif. Cela permet ainsi d'envisager des solutions adéquates pour minimiser cet impact. Sur l'illustration 8, on peut voir la comparaison de deux scénarios pour des bouteilles d'eau en PET et en verre. Il est possible de comparer jusqu'à 10 scénarios sur le même graphique. Le logiciel CES EduPack contient des conseils pour réduire



l'impact environnemental de chaque phase de vie d'un produit, spécifiant que toute modification peut aussi avoir des conséquences sur les autres phases de vie. Cela permet ainsi de lancer un débat sur les compromis possibles dans la conception du produit.

Intégration des manuels et des ressources complémentaires

Les outils logiciels du CES EduPack ne peuvent constituer qu'une partie d'un cours d'introduction sur les matériaux. En complément, nous avons ainsi développé une série d'unités de cours accompagnés d'exercices pour aider les professeurs à préparer leurs cours. Le choix des manuels utilisés est également une décision importante pour tout cours sur les matériaux.

Le logiciel CES EduPack permet d'introduire les principes fondamentaux sur les matériaux, et ce quelle que soit l'approche pédagogique adoptée par le professeur (axée sur la science ou sur la conception) et le manuel utilisé. Ainsi, les manuels adoptant l'approche scientifique, comme ceux de Callister [2], Budinsky [3] ou Asklund [4], peuvent être complétés par des exercices basés sur le logiciel afin de découvrir le monde des matériaux.

Par ailleurs, nous avons adopté une pédagogie axée sur la conception dans plusieurs manuels, dont deux qui sont adaptés à l'enseignement en première et deuxième année de l'enseignement supérieur. Deux nouveaux manuels, «Matériaux» Tomes 1 et 2 [5], proposent une introduction aux méthodes essentielles et illustrent leurs applications dans l'utilisation des matériaux en construction mécanique, en thermique, électromagnétique, et conception. Ces manuels intègrent le CES EduPack en incluant des exercices utilisant le logiciel. Un autre manuel intitulé «Materials and Design» [6] aborde la problématique de la conception industrielle en proposant une introduction aux matériaux pour les étudiants en conception de produits. Le manuel «Choix des matériaux pour la conception mécanique» [7] est un ouvrage plus élaboré adapté aux niveaux supérieurs pour une utilisation en cours avec des étudiants en troisième, quatrième année d'études supérieures ou en master. Le manuel «Matériaux et environnement - Choix éco-responsable en conception» permet d'introduire les notions de développement durable et d'éco-conception auprès des étudiants [8]. Tous ces manuels comprennent de nombreux exercices dont les livrets de solutions sont également disponibles.

Motiver vos étudiants à découvrir le monde des matériaux en:

- ***innovant dans la sélection des matériaux***
- ***élargissant les perspectives en repoussant les limites de ce que l'on peut faire actuellement***
- ***mettant en relation les concepts de matériau, mise en forme, procédé de fabrication et coût***
- ***introduisant les conséquences environnementales des matériaux***

L'enseignement basé sur des projets

CES EduPack est une ressource que l'on peut utiliser dans les cours se basant sur des projets pédagogiques. Les projets que nous proposons en première et seconde année d'études supérieures se concentrent sur l'analyse du choix des matériaux pour des produits connus, évitant ainsi de rentrer dans des explications pour des systèmes trop complexes en début de cursus.

Dans l'exemple du projet proposé sur le vélo (voir l'*illustration 1*), on demande tout d'abord aux étudiants de sélectionner une composante d'un vélo (le cadre, la fourche, la selle, les rayons, le câble de frein...) et un type d'utilisateurs (par exemple un vélo pour enfants, pour aller faire des courses, pour faire de la randonnée, du sprint, du VTT, ...). On leur demande ensuite de faire la liste des exigences de conception afin que le produit réponde aux besoins de ce groupe et atteigne les objectifs spécifiques recherchés (minimiser le poids ou le coût, optimiser la solidité, ...). C'est là qu'intervient le logiciel CES EduPack : il permet d'obtenir une liste avec un classement des matériaux les plus adaptés, des fiches sur leurs propriétés et des recommandations sur les procédés de fabrication possibles.

Par ailleurs, la re-conception d'un produit afin de réduire son impact environnemental est un thème qui peut être utilisé dans de nombreux projets pédagogiques. Les étudiants doivent établir quelle phase de vie (production du matériau, fabrication du produit, utilisation, élimination en fin de vie) est la plus nuisible à l'environnement. Ils devront ensuite sélectionner les matériaux appropriés afin d'en réduire l'impact environnemental. CES EduPack fournit tous les outils nécessaires à ce type de projets.

Résumé

Les étudiants en première et deuxième année d'études supérieures ont besoin d'acquérir une compréhension globale des matériaux ainsi que des méthodes, des outils et une logique leur permettant de sélectionner et d'utiliser les matériaux de façon rationnelle. En adoptant une approche pédagogique axée sur la conception, on favorise dès le début le travail interdisciplinaire au sein de l'ingénierie. Quelle que soit l'approche pédagogique choisie, la clarté et l'impact visuel des graphiques de propriétés constitue un support idéal au cours, en particulier lorsque l'on utilise des logiciels comme CES EduPack. L'expérience a prouvé que les étudiants sont friands de ce type d'outils, qui les motive à découvrir par eux-mêmes le monde des matériaux. Ce type de logiciel présente également l'avantage de donner aux étudiants un aperçu des outils utilisés par les ingénieurs dans le monde professionnel.

Références

- [1] CES EduPack 2012, Granta Design, Cambridge (2012) www.grantadesign.com.
- [2] Callister, W.D. (2003) «Science et génie des matériaux», Dunod, France
- [3] Budinski, K.G. et Budinski, M.K. (2009) «Engineering Materials, Properties and Selection», 9th edition, Prentice Hall, Columbus, OH, USA.
- [4] Fulay, P., Wright, W., Asklund, D.R. (2011) «The Science and Engineering of Materials», 6th Edition, Wadsworth, Calif. USA.
- [5] Ashby, M.F., Jones, D.R.H. (2008) «Matériaux : Tome 1, Propriétés, applications et conception», 3e édition, Dunod, France
Ashby, M.F., Jones, D.R.H. « Matériaux : Tome 2, Microstructures, mise en œuvre et conception» 3e édition, Dunod, France
- [6] Ashby, M.F. et Johnson, K. (2009) « Materials and Design», 2nd Ed., Butterworth Heinemann, Oxford, UK
- [7] Ashby, M.F. (2011) «Choix des matériaux en conception mécanique», Dunod, France
- [8] Ashby, M.F. (2011) «Matériaux et environnement - Choix éco-responsable en conception», Dunod, France



Le site des ressources pédagogiques en ligne de Granta Design propose des supports pour l'enseignement de cours en rapport avec les matériaux dans les domaines de la conception, de l'ingénierie et de la science.

Les ressources sont disponibles sous plusieurs formats et ont été conçues pour des utilisations avec des étudiants de différents niveaux.

Le site internet comprend également d'autres ressources créées par les professeurs utilisateurs du CES EduPack souhaitant contribuer aux ressources disponibles. Ces ressources sont mises à disposition par des membres du corps enseignant des quelques 800 universités et écoles supérieures ainsi que des lycées utilisateurs du logiciel à travers le monde.

Le site internet des ressources pédagogiques en ligne propose aussi bien des ressources pour utiliser le CES EduPack que d'autres destinées à l'enseignement classique. L'utilisation du CES EduPack que d'autres exercices et sources d'information pouvant être utilisés indépendamment du logiciel.

www.grantadesign.com/education/