

TP Sélection des matériaux

Objectifs

1. Savoir transposer les contraintes et les objectifs de conception d'un produit à partir d'une demande/problématique industrielle.
2. Formuler les indices des matériaux et apprendre à utiliser les cartes de M. Ashby.
3. Se familiariser avec le logiciel de sélection des matériaux CES EduPack.
4. Analyser un cas particulier : appliquer les notions apprises pour identifier les contraintes et les objectifs de conception ; utiliser successivement le CES EduPack pour sélectionner les matériaux qui répondent le mieux à ces contraintes.
5. Utiliser l'outil Eco-Audit du logiciel pour étudier l'impact environnemental associé au cas analysé.

Avant de commencer le TP

1. Lire et assimiler attentivement le document : "Vue d'ensemble de CES Edu-Pack", fourni en annexe.
2. La lecture du chapitre 3 du livre de M. Ashby *et al.* "Materials: Engineering, science, processing and design"[1] est recommandée.

Note générale

Le travail pratique "Sélection des Matériaux" est basé sur les ressources académiques (projets, exercices, présentations, webinars, documents) fourni par Granta Design Limited [2], selon les accords stipulés entre Granta Design et la section IMX de l'EPFL.

ELEMENTS DE CONCEPTION

Pour concevoir un design original, il faut d'abord identifier les besoins du marché, exprimés par les exigences de conception. Successivement, les concepts, c'est-à-dire les idées nécessaires à répondre à ces exigences, doivent être développées. Un premier développement d'un concept est ensuite utilisé pour une étude de faisabilité technique. On travaille ensuite sur les détails de conception et finalement, un prototype est construit et testé.

Dans la procédure d'identification de la stratégie de sélection du matériau, la transition des exigences de conception est indispensable; cette transposition consiste à traduire les exigences de chaque composant d'un produit en fonctions, contraintes, objectifs et variables libres.

Fonction	Que fait le composant ?
Contraintes	Quelles conditions non-négociables doivent être respectées ?
Objectifs	Que faut-il maximiser/minimiser ?
Variables libres	Quels sont les paramètres qu'un concepteur peut changer ?

Si, d'un côté, la fonction du composant et les variables libres sont facilement identifiables, la différence entre contraintes et objectifs est moins évidente. Les **contraintes** expriment les limites à atteindre par certaines caractéristiques du matériau ou du procédé de fabrication. Elles servent à présélectionner/trier les candidats potentiels parmi l'ensemble des matériaux et des procédés. Après ce tri, un classement est nécessaire pour identifier les matériaux ou procédés les plus adéquats. C'est ensuite grâce aux **objectifs** qu'on peut classer les candidats présélectionnés grâce aux contraintes. Dans le tableau ci-dessous une liste de contraintes et objectifs typiques est fournie :

Contraintes typiques	Objectifs typiques
Valeur limite min ou max :	Minimiser :
Rigidité	Prix
Résistance maximale	Masse
Ténacité	Volume
Conductibilité thermique	Consommation énergétique
Température d'utilisation	Emission de CO2

De nombreuses conceptions exigent la minimisation du prix ou du poids, alors que d'autres propriétés sont à maximiser. Pour cette raison, des **indices de matériaux** sont dérivés en fonction du type de contraintes ou d'autres propriétés des matériaux. Par exemple, imaginons que nous voulions concevoir un élément structurel léger pour un avion et que nous souhaitions maximiser la limite d'élasticité tout en minimisant le poids. L'élément structurel ne sera soumis qu'à des charges de traction. Afin d'éviter une déformation permanente (plastique), nous imposons que la contrainte de traction (σ) subie par l'échantillon soit inférieure à la limite d'élasticité (σ_y), à savoir

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq \sigma_y$$

Avec A la section transversale qui peut être exprimée en fonction de la masse (m), de la densité (ρ) et de la longueur (L) comme suit (voir Figure 1):

$$A = \frac{m}{\rho L}$$

ce qui conduit au critère suivant de minimisation de la masse

$$m \geq FL \left(\frac{\rho}{\sigma_y} \right)$$

Il est clair que si nous voulons nous assurer que le critère est satisfait, le rapport $\frac{\rho}{\sigma_y}$ doit être minimisé ou, en d'autres termes, le rapport $\frac{\sigma_y}{\rho}$ doit être maximisé. Par conséquent, si nous voulons maximiser la limite d'élasticité d'un matériau tout en minimisant le poids, l'indice de performance qui nous intéresse sera $\frac{\sigma_y}{\rho}$. Dans le cas d'autres contraintes et de géométries, les indices de performance peuvent être dérivés de manière similaire, notamment pour les conceptions limitées en résistance et en rigidité.

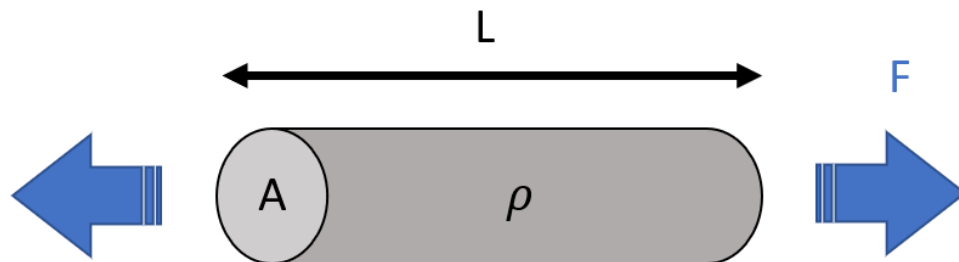
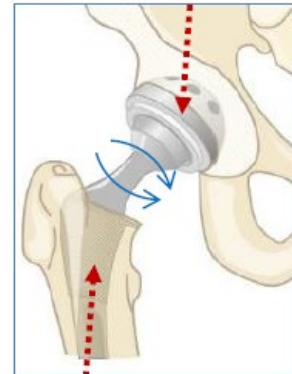


Figure 1 : Élément structurel d'un avion, à savoir une barre d'ancrage soumise à des charges de traction

Exemple 1:

On veut concevoir un implant pour remplacer l'articulation de la hanche d'origine en supportant la charge et l'usure résultant du poids et des mouvements du corps. Celui-ci peut être divisé en deux parties : la tige et la tête (voir schéma)

**1. La tige :**

- Fonction :
Supporter la charge de compression des forces externes (flèches rouges en pointillés) entraînant également un cisaillement et une flexion (illustrés schématiquement par des flèches bleues) de la tige fémorale.
- Contraintes :
 - Matériel biomédical
 - Rigidité et résistance non inférieures à celles de l'os cortical
 - Ténacité à la rupture pour éviter une rupture rapide ($>11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)
 - Matériel non magnétique + Matériau en vrac
- Objectifs :
 - Maximiser la résistance spécifique
 - Minimiser les coûts

2. La tête :

- Fonction :
Supporter la charge de compression et l'usure de la tête fémorale et de l'insert/cotyle acétabulaire
- Contraintes :
N'envisagez que des matériaux biocompatibles adaptés au remplacement de l'articulation de la hanche
- Objectifs :
 - Maximiser la résistance à la compression
 - Minimiser l'usure (abrasion contondante)
 - Minimiser le coût

** pour plus d'informations sur cet exemple, consultez la référence [3] dans la bibliographie

Exemple 2 :

On veut concevoir une poêle de cuisine qui puisse utiliser un minimum de chaleur pendant la cuisson tout en émettant le minimum d'émissions de CO₂.

- Contraintes :
 - Matériau non-toxique
 - Formabilité
 - Température d'utilisation maximale : $> 400^\circ\text{C}$
 - Résistance à la corrosion dans l'eau (douce et salée)
 - Rigidité suffisante pour éviter la flexion à cause du poids
 - Ténacité suffisante pour survivre à une chute
 - Fabrication à un prix compétitif
 - Respect des normes pour le contact avec la nourriture

- Objectifs :
Maximiser le transfert de chaleur au contenu de la poêle ; c'est à dire maximiser la conductivité thermique du matériau de la poêle dans l'épaisseur minimale à travers laquelle la chaleur diffuse

UTILISATION DU LOGICIEL CES EDUPACK

Lire et assimiler le document en annexe "Vue d'ensemble de CES EduPack".

CAS D'ETUDE

Les groupes se familiariseront d'abord avec le logiciel CES EduPack pour la résolution d'exercices simples, qui serviront de base au déroulement du projet plus complet.

Chaque groupe d'étudiants sera donc impliqué dans les étapes de :

1. Sélection du produit
2. Recherche et conception
3. Transposition du concept en contraintes et objectifs
4. Pré-sélection des matériaux
5. Sélection du matériau

Quelques exemples sont donnés ci-dessous qui peuvent être choisis pour ce TP. D'autres idées sont possibles, mais doivent être approuvés par l'assistant :

- Bouclier thermique de l'atterrisseur sur Mars
- Cadre de voiture ultraléger et résistant
- Echangeur de chaleur moteur F1
- Aube de turbine aéronautique
- Etui de guitare
- Plat pour four à micro-onde

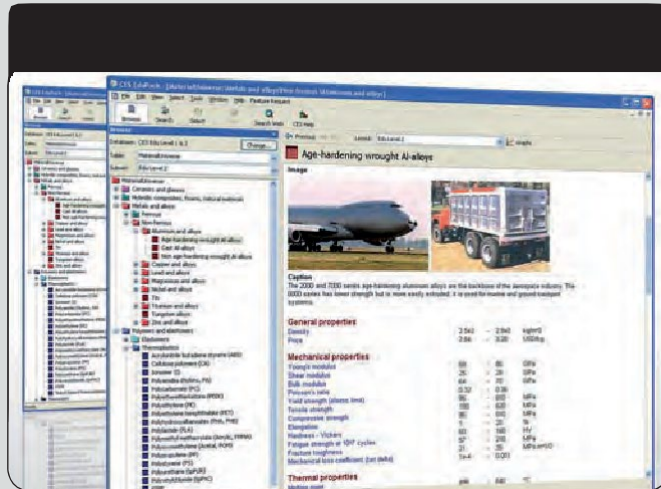
L'utilisation du logiciel CES EduPack permettra de classer les différentes possibilités afin de valider le choix du matériau employé pour le moment pour cette application ou même d'envisager des nouveaux matériaux pour l'améliorer.

Une étude additionnelle sur la durabilité du produit sera effectuée à l'aide de l'outil ECO-Audit et de sa base de données sur l'impact environnemental et l'empreinte CO2 des matériaux, des procédés industriels et des moyens de transport choisis.

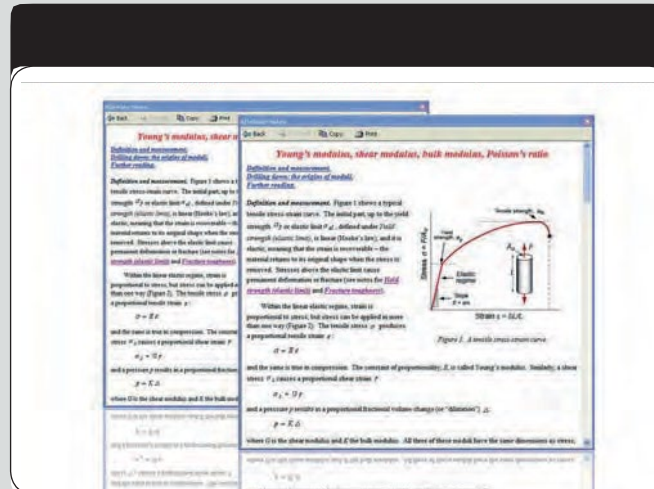
Bibliographie

- [1] M. Ashby, H. Shercliff, D. Cebon. Materials: Engineering, Science, Processing and Design. Ed. Elsevier
- [2] Granta Design Limited. UK Headquarters: Rustat House, 62 Clifton Road, Cambridge CB1 7EG, UK
- [3] Biomaterials Selection for a Joint Replacement – Granta teaching resources (Advanced industrial case studies)

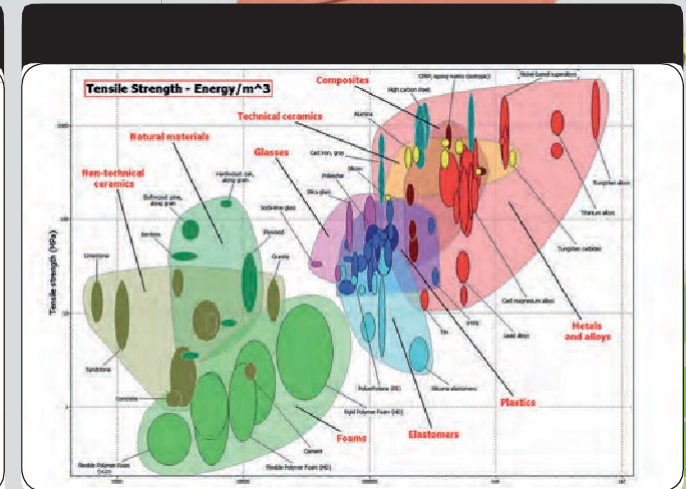
Vue d'ensemble de CES EduPack



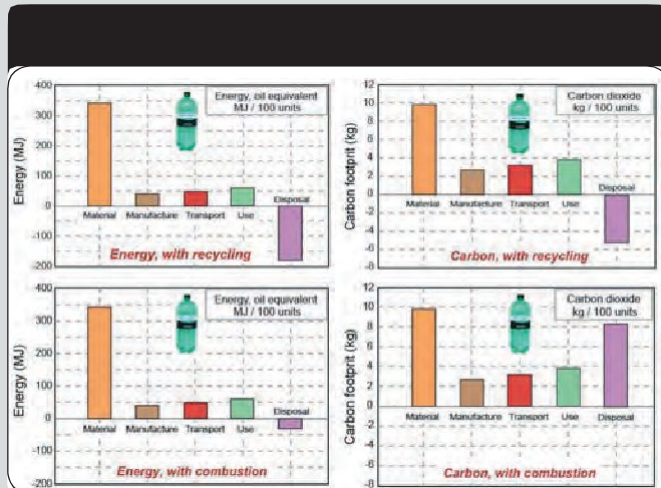
3 Niveaux d'utilisation pour des cours d'Introduction jusqu'à la réalisation de projets couvrant plus de 3000 matériaux.



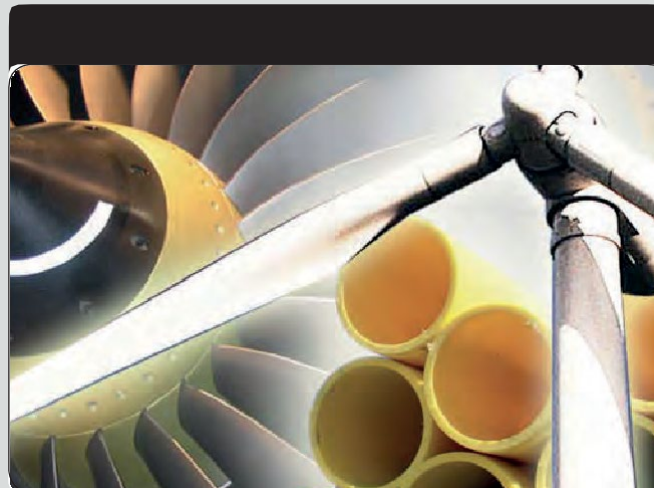
Définitions scientifiques extraites de manuels standards avec un référencement aux livres d'Ashby, Askeland, Callister, Shackelford et plus...



Outil unique de comparaison et d'analyse des propriétés et de sélection des matériaux et des procédés.



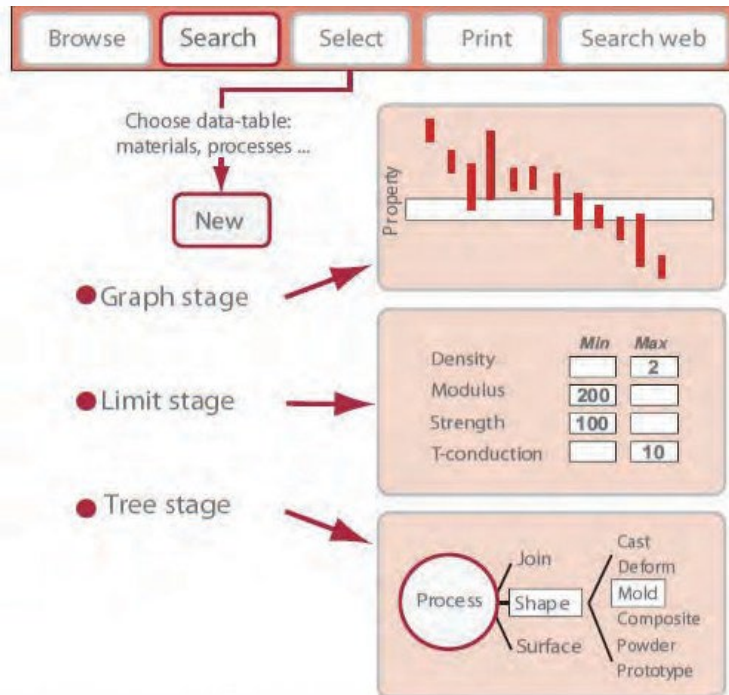
Introduction aux concepts clés de l'éco-conception et de la durabilité. Il permet d'analyser les différents scénarios de conception.



Editions pour la conception, l'éco-conception, les polymères, la bioingénierie, l'architecture et le génie civil.



Construisez votre propre base de données avec CES Selector. CES Selector et Granta MI sont utilisés dans l'enseignement spécialisé, la recherche et l'industrie.



Bien démarrer avec CES Edupack

Professor Mike Ashby

Department of Engineering
University of Cambridge



GRANTA
TEACHING RESOURCES

© Granta Design and M. F. Ashby, 2012

This Getting Started Guide is part of a set of open access teaching resources created by Mike Ashby to help introduce students to materials, processes and rational selection.

The Teaching Resources website aims to support teaching of materials-related courses in Design, Engineering and Science.

Resources come in various formats and are aimed primarily at undergraduate education. Some like this are open access.

www.grantadesign.com/education/resources



Bien démarrer avec CES EduPack

Ces exercices permettent d'apprendre à utiliser facilement le logiciel CES EduPack.
Le fichier d'aide ainsi que le tutoriel fournis avec le logiciel vous apporteront plus de détails si nécessaire.

Aperçu de CES EduPack

Le logiciel CES EduPack a trois niveaux de bases de données :

	Couverture	Contenu
Niveau 1	70 des matériaux les plus communément utilisés et classés dans les familles suivantes : métaux, polymères, céramiques, composites, mousses et matériaux naturels. 70 des procédés les plus importants.	Une description, une image du matériau dans un produit connu, les applications typiques et des données limitées sur les propriétés mécaniques, thermiques et électriques.
Niveau 2	100 des matériaux et 110 des procédés les plus utilisés de par le monde.	Tout le contenu du niveau 1, additionné de données numériques plus complètes, de recommandations pour la conception, de propriétés écologiques et de notes techniques.
Niveau 3	Le cœur de la base de données contient plus de 3 750 matériaux, y compris ceux des niveaux 1 et 2. Des éditions spécialisées permettent de couvrir également des domaines comme : l'aéronautique, les polymères, l'architecture, la bio ingénierie et l'éco conception.	Les données numériques sont complètes pour tous les matériaux, permettant ainsi de déployer complètement la puissance de sélection de CES.

Lorsque le logiciel démarre, vous devez sélectionner un niveau. Choisir le niveau 1 pour commencer.

A chaque niveau, plusieurs tables sont disponibles.

Les principales sont : Matériaux et Procédés.

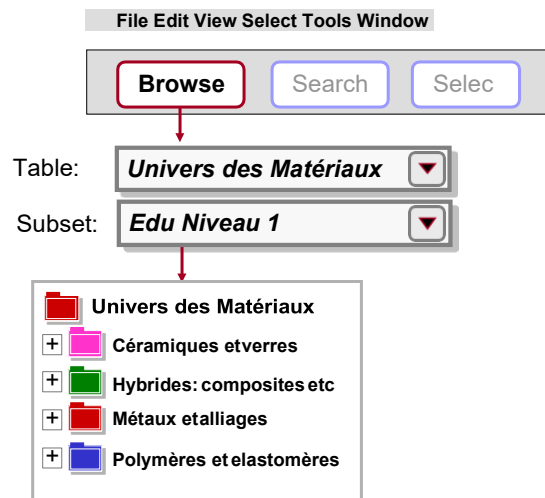
Chaque niveau peut être parcouru par :

- **BROWSE** Parcourir une base de données, ouvrir des fiches, imprimer et exporter le contenu.
- **SEARCH** Recherche texte dans toute la base de données.
- **SELECT** Sélection des matériaux ou des procédés par une combinaison de critères de conception.

Les possibilités de la ressource CES EduPack sont beaucoup plus larges, ce guide ne regroupe que les fonctions principales.

PARCOURIR ET RECHERCHER

Ouvrir CES EduPack au NIVEAU 1. La table de donnée par défaut est : Univers des Matériaux



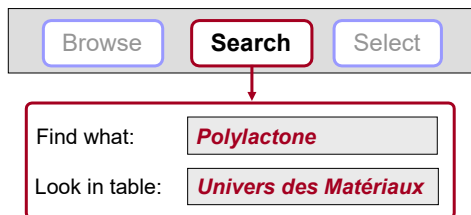
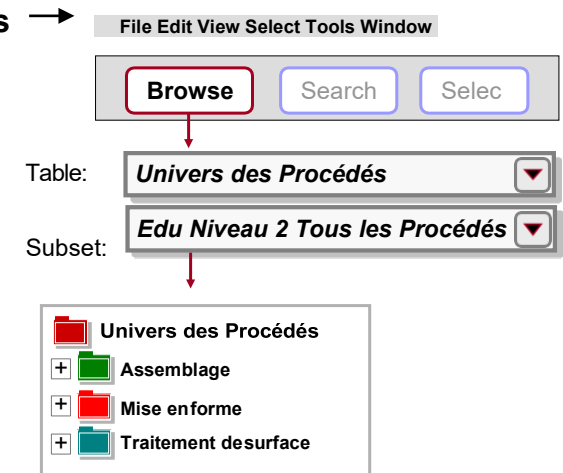
Exercice 1. Parcourir la base de données matériaux

- Trouvez la fiche de l'ACIER INOXYDABLE
- Trouvez la fiche du BÉTON
- Trouver la fiche du POLYPROPYLENE
- Explorez les informations sur le POLYPROPYLENE, au NIVEAU 2
- Trouvez les procédés permettant la mise en forme du POLYPROPYLENE, en utilisant le lien en bas de page (LINK)

Exercice 2. Parcourir la base de données procédés

Sélectionnez NIVEAU 2, tous les procédés

- Trouvez la fiche de MOULAGE PAR INJECTION
- Trouvez la fiche de DURCISSEMENT PAR LASER
- Trouvez la fiche de SOUDAGE PAR FRICTION (MÉTAUX)
- Trouvez tous les matériaux utilisables avec MOULAGE SOUS PRESSION en utilisant le lien en bas de page (LINK)



Exercice 3. La recherche textuelle

- Trouvez le matériau POLYLACTONE
- Trouvez les matériaux pour OUTILS DE COUPE
- Trouvez le procédé RTM

(Des extraits de fiches de matériaux et de procédés sont présentés page suivante)

Extrait d'une fiche de matériau : le polypropylène

Polypropylène (PP) (CH₂-CH(CH₃))_n

Le polypropylène, PP, dont la première production commerciale date de 1958, est le frère cadet du polyéthylène – une molécule très semblable avec un prix, des méthodes de mise en œuvre et des applications très similaires. Comme le PE, il est produit en très grandes quantités (plus de 30 millions de tonnes par an en 2000), avec un taux de croissance de presque 10% par an. Comme le PE également, la longueur de sa molécule et ses branchements latéraux peuvent être ajustés par une catalyse intelligente, donnant un contrôle précis de sa résistance à l'impact et des propriétés qui influencent son aptitude à être moulé ou étiré. Dans sa forme pure, le polypropylène est inflammable et se dégrade à la lumière solaire. Des ignifugeants peuvent ralentir sa combustion et des stabilisants lui donner une très bonne stabilité tant aux rayonnements UV qu'à l'eau douce ou salée ainsi qu'à la plupart des solutions aqueuses.



Propriétés générales

Masse Volumique	890	-	910	kg/m ³
Prix	* 1.37	-	1.50	EUR/kg

Propriétés mécaniques

Module de Young	0.896	-	1.55	GPa
Module de cisaillement	0.316	-	0.548	GPa
Module de compressibilité	2.5	-	2.6	GPa

Coefficient de Poisson	0.405	-	0.427	
Limite élastique	20.7	-	37.2	MPa
Résistance en traction	27.6	-	41.4	MPa
Résistance à la compression	25.1	-	55.2	MPa
Allongement	100	-	600	%
Mesure de dureté Vickers	6.2	-	11.2	HV
Limite de fatigue	11	-	16.6	MPa
Ténacité	3	-	4.5	MPa.m ^{0.5}
Coefficient d'amortissement	0.0258	-	0.0446	

Propriétés thermiques

Température de fusion	150	-	175	°C
Température de transition vitreuse	-25.15	-	-15.15	°C
Température maximale d'utilisation	100	-	115	°C
Température minimale d'utilisation	-123	-	-73.2	°C

Conducteur ou isolant thermique?	Bon isolant
Conductivité thermique	0.113 - 0.167 W/m.°C
Chaleur spécifique	1.87e3 - 1.96e3 J/kg.°C
Coefficient de dilatation	122 - 180 µstrain/°C



Recommandations pour la conception

Le PP standard est bon marché, léger et ductile mais il a une faible tenue mécanique. Il est plus rigide que le PE et peut être utilisé à plus hautes températures. Les propriétés du PP sont semblables à celles du PEHD mais il est plus rigide et fond à une température plus élevée (165-170°C). Sa rigidité et sa résistance mécanique peuvent être améliorées en le renforçant avec des fibres de verre, de la craie ou du talc. Lorsqu'il est étiré en fibre, le PP a une résistance et une résilience exceptionnelle; Ceci, ainsi que sa résistance à l'eau, en font un matériau intéressant pour les cordages et les tissus. Il est plus facile à mouler que le PE, a une bonne transparence et peut accepter une gamme plus large et plus vive de couleurs. Le PP est couramment produit sous forme de feuilles, de produits moulés et de fibres; il peut également être moussé. Les développements des catalyseurs promettent de nouveaux copolymères de PP avec des combinaisons plus intéressantes de résistance aux chocs, stabilité et facilité de mise en œuvre. Les fibres monofilaments ont une haute résistance à l'abrasion et sont presque deux fois plus tenaces que les fibres PE. Les fils multibrins ou les cordes n'absorbent pas l'eau, flottent sur l'eau et se colorent facilement.

Notes techniques

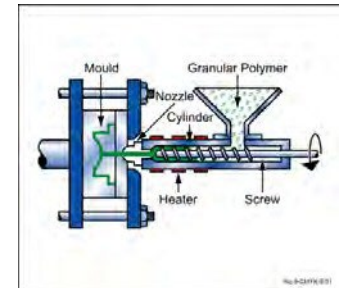
Les nombreux grades de polypropylène tombent dans trois groupes de base : les homopolymères (polypropylènes avec toute une gamme de poids moléculaires et donc de propriétés), copolymères (faits par copolymérisation du propylène avec d'autres oléfines comme l'éthylène, le butylène ou le styrène) et les composites (polypropylènes renforcés avec du mica, des billes ou des fibres de verre..) qui sont plus rigides et résistent mieux à la chaleur que de simples polypropylènes.

Extrait d'une fiche de procédé : le moulage par injection

Moulage par injection

Aucun autre procédé n'a plus changé la conception de produits que le moulage par injection. Les produits moulés par injection apparaissent dans tous les secteurs de la conception de produits : des produits de consommation, des articles de bureau, des pièces industrielles, des ordinateurs, des instruments de communication, des articles médicaux et pour la recherche, des jouets, des emballages de cosmétiques et des équipements de sports. L'équipement le plus courant pour le moulage des thermoplastiques est la presse avec vis réciproquante, représentée schématiquement dans l'illustration. Les granules de polymère sont amenés dans une presse en spirale où ils se mélangent et se ramolissent pour atteindre une consistance pâteuse qui peut être forcée de pénétrer par un ou plusieurs canaux (carottes) dans le moule. Le polymère se solidifie en maintenant une pression (pression de maintien) et les pièces sont alors éjectées.

Les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères peuvent chacun être moulés par injection. La co-injection permet le moulage de pièces avec des matériaux, des couleurs ou des caractéristiques différents. Le moulage par injection d'allégés permet la production économique de grandes pièces moulées en utilisant un gaz inerte ou un agent de gonflage chimique pour faire des pièces qui ont une peau compacte et une structure interne cellulaire.



Attributs physiques

Gamme de poids	0.001	-	25	kg
Gamme d'épaisseurs de section	0.4	-	6.3	mm
Tolérance	0.07	-	1	mm
Rugosité	0.2	-	1.6	µm
Etat de surface	Très lisse			

Caractéristiques du procédé

Procédés de mise en forme primaires	True
Discontinu	True

Attributs économiques

Coût relatif de l'outillage	Très haut
Coût relatif de l'équipement	Haut
Importance de la main d'œuvre	Faible

Taille de la série (unités)	10000 - 1e6
-----------------------------	-------------

Recommandations pour la conception

Le moulage par injection est le meilleur moyen de produire en masse des petits articles en polymère, précis et avec des formes complexes. Le fini de surface est bon; on peut facilement changer la texture et le décor en modifiant le moule et des détails fins sont bien reproduits. On peut surmouler sur des étiquettes décoratives qui apparaissent à la surface des pièces (voir décoration dans le moule). La seule opération de finition est le décarottage.

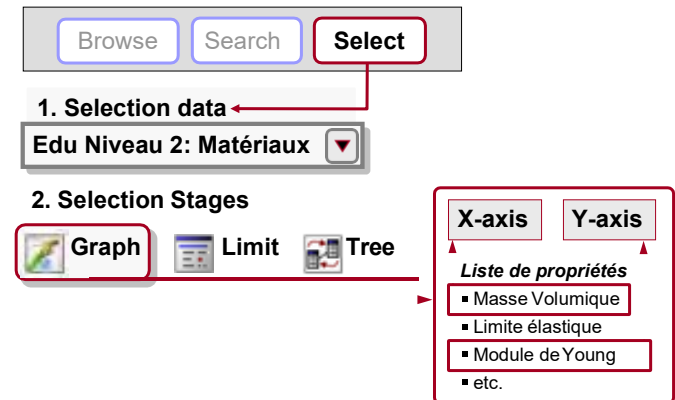
Notes techniques

On peut mouler par injection la plupart des thermoplastiques, bien que ceux qui ont une température de fusion élevée (par exemple le PTFE) soient difficiles à injecter. On peut mettre en œuvre par injection les composites basés sur des thermoplastiques (renforcés par des fibres courtes ou des charges particulières) à condition que le taux de charge ne soit pas trop important. Des changements importants dans la section des pièces ne sont pas recommandés. Des petits angles en contre-dépouille et des formes complexes sont possibles, bien que certaines caractéristiques (comme les contre-dépouilles, les parties filetées et les inserts) peuvent accroître le coût de l'outillage. On peut également utiliser le procédé de moulage par injection avec des thermodurcissables et des élastomères. L'équipement le plus courant pour le moulage des thermoplastiques est la presse avec vis réciproquante, représentée schématiquement dans l'illustration. Les granules de polymère sont amenés sur une vis. La rotation de cette vis mélange et fait fondre le polymère qui atteint une consistance pâteuse. Le polymère fondu s'accumule devant la vis et la force à reculer (vis réciproquante). Lorsqu'une quantité suffisante de matière fondue a été accumulée devant la vis, on lui applique une pression assez élevée appelée pression d'injection. Celle-ci force la masse fondue à pénétrer par un ou plusieurs canaux (carottes) dans le moule. Pendant que le polymère se solidifie, on maintient une certaine pression appelée pression de maintien qui permet de compenser la rétraction de la matière due au refroidissement. Lorsque la matière est suffisamment solidifiée, l'objet est éjecté.

DIAGRAMMES DE PROPRIÉTÉS

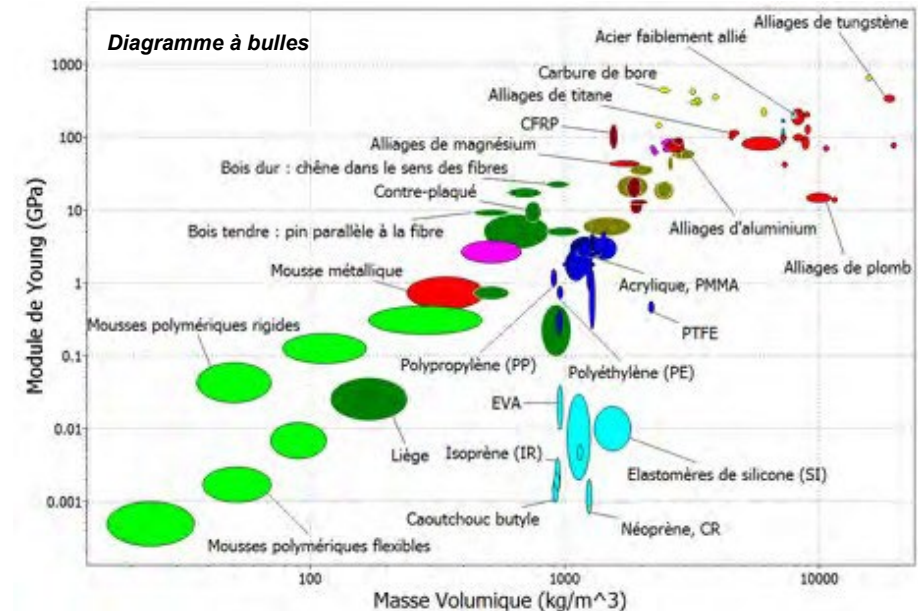
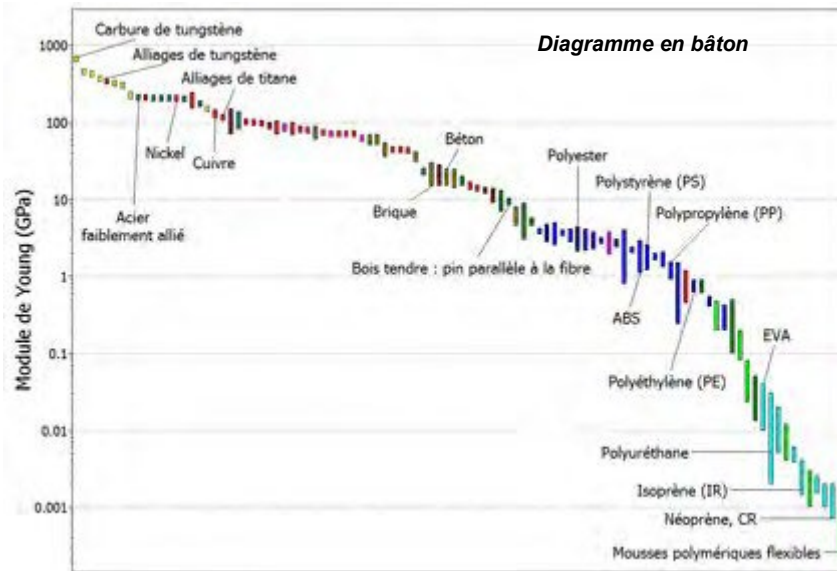
Exercice 4. Construire des diagrammes de propriétés

- Sélectionnez l'Univers des Matériaux: Niveau 2, Matériaux
- Faites un graphique en bâton du Module d'Young (E)
(Choisissez *Module d'Young* sur l'axe des ordonnées ; laissez l'axe des abscisses à <None>)
(Cliquez sur quelques matériaux pour faire apparaître leurs noms (labels) ;
double-cliquez sur un matériau pour visualiser sa fiche)
- Faites un diagramme à bulle du Module d'Young (E) et de la Masse volumique (ρ)
(Configurez les axes *x* et *y* ; par défaut, il s'agit d'un diagramme log-log) (Les labels peuvent être affichés comme précédemment – cliquez et faites les glisser ; appuyez sur *Suppr.* pour les faire disparaître)



EFFACEZ LE GRAPHIQUE

(Cliquez droit sur le "graph stage" puis "Delete")



SÉLECTION PAR ENCADREMENT

Exercice 5. Sélection avec le « LIMIT stage »

- Trouvez les matériaux répondant aux critères suivants :

Température maximale d'utilisation > 200 °C

Conductivité thermique > 25 W/m.°C

Conducteur ou isolant électrique = bon isolant

(Entrez les limites – minimum ou maximum selon les cas – et cliquez sur “Apply”)

(Résultats pour les niveaux 1 et 2 :
Alumine, Nitrure d'aluminium, Nitrure de silicium)

EFFACEZ CETTE ÉTAPE

1. Selection data

Edu Niveau 2: Matériaux

2. Selection Stages

Graph Limit Tree

Results Ranking
X out of 95 pass Prop 1 Prop 2

	Results	Ranking
Matériel1	2230	113
Matériel2	2100	300
Matériel3	1950	5.6
Matériel 4	1876	47
etc...		

L'étape des limites

Propriétés mécaniques

Propriétés thermiques

	Min.	Max.
Temp. max. d'utilisation	200	°C
Conductivité thermique	25	W/m.°C
Chaleur spécifique		J/kg.°C

Propriétés électriques

Conducteur ou isolant électrique?

- ☐ Bon conducteur
- ☐ Mauvais conducteur
- ☐ Semiconducteur
- ☐ Mauvais isolant
- ☒ Bon isolant

Barres d'aide pour les limites

Céramiques et verres
Composites
Métaux et alliages
Polymères et élastomères

0.1 100

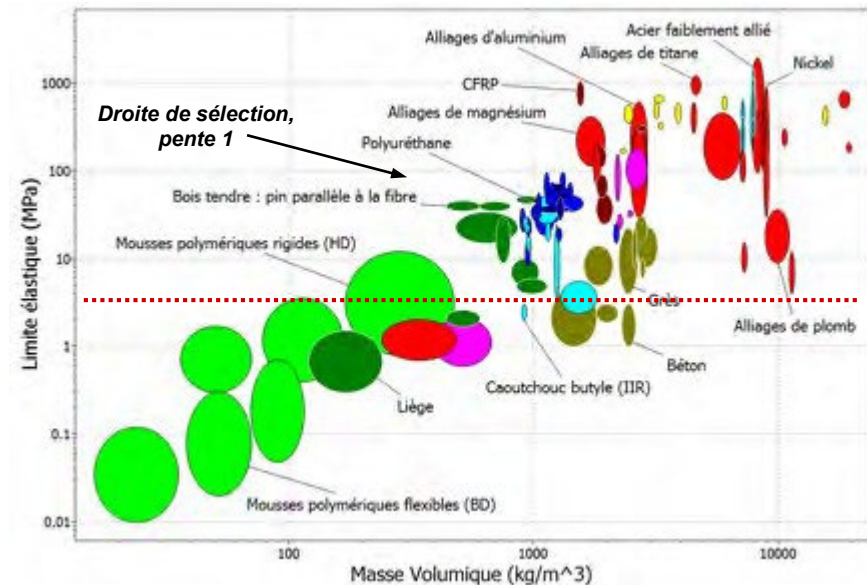
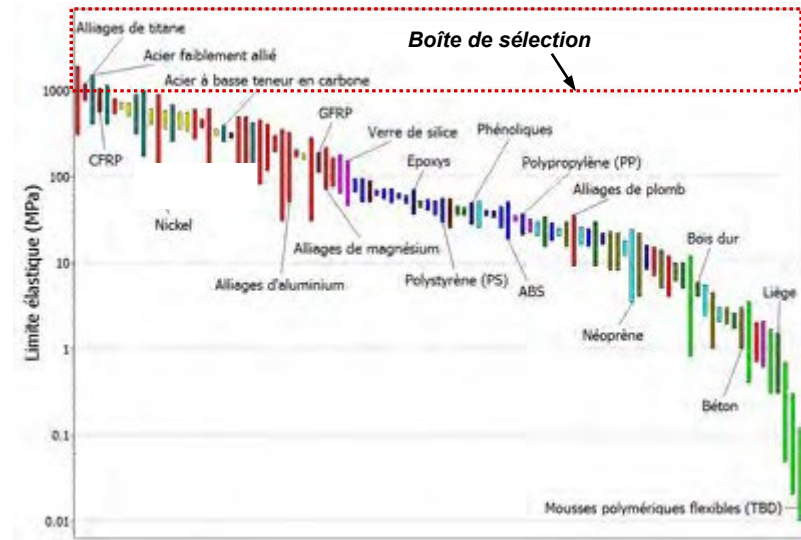
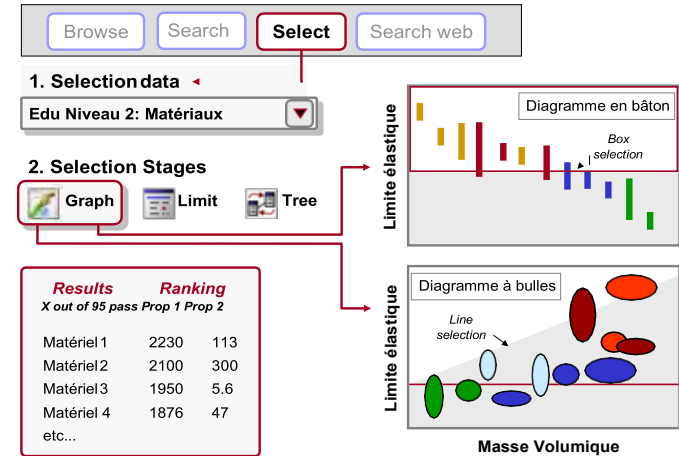
SÉLECTION GRAPHIQUE

Exercice 6. Sélection avec un « GRAPH stage »

- Faites un graphique en bâton de la limite élastique (σ_y), sur l'axe des y
- Utilisez la boîte de sélection  pour déterminer les matériaux à limite d'élasticité élevée (Cliquez sur l'icône rectangulaire, puis "cliquer-glisser" pour tracer le rectangle de sélection)
- Ajoutez, sur l'autre axe, la masse volumique (ρ) (Pour cela : sélectionnez Stage 1 dans la zone "Selection Stages", et cliquez sur Edit ; ou double cliquez sur l'axe x pour l'éditer)
- Sélectionnez les matériaux à faible densité et à la limite d'élasticité élevée à l'aide de la boîte de sélection 
- Remplacez le rectangle par une sélection par une droite  pour trouver les matériaux à "résistance spécifique" élevée (σ_y / ρ) (Cliquez sur l'icône "droite", ensuite entrez la valeur pour "slope" (pente) – 1 ici – cliquez sur le graphique pour positionner la droite et cliquez de nouveau pour choisir la partie du graphique désirée, c.a.d. au-dessus de la ligne pour les hautes valeurs de σ_y / ρ . Ensuite, faites glisser la ligne pour affiner la sélection à seulement 2 matériaux.)

(Résultats pour les niveaux 1 et 2: Composites renforcés de fibres de carbone (CFRP, isotropique), Alliages de titane, Alliages de magnésium, ...)

EFFACEZ LE GRAPHIQUE



SÉLECTION PAR ARBORESCENCE

Exercice 7. Sélection avec « TREE stage »

- Trouvez les matériaux pouvant être moulés

(Dans le “Tree Stage”, sélectionnez Univers des Procédés, ouvrez “Mise en forme”, sélectionnez “Moulage”, cliquez “Insert”, puis sur OK)

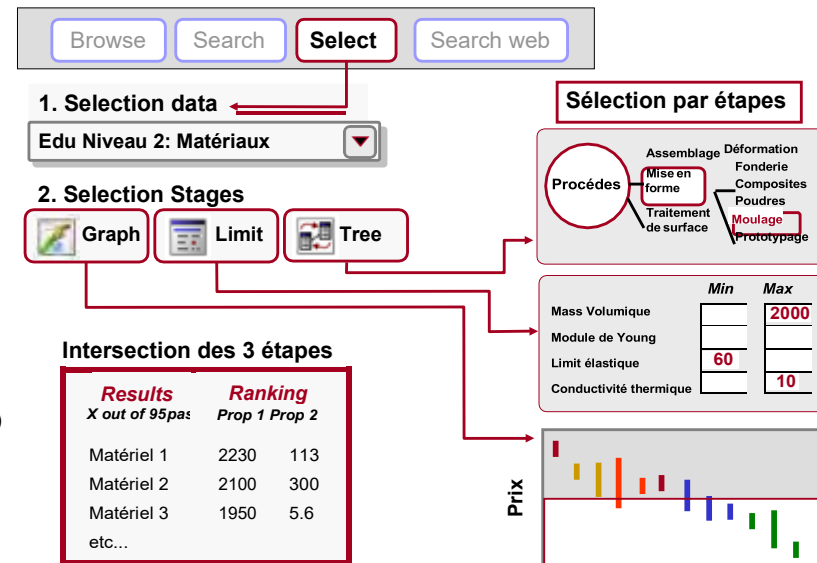
EFFACEZ L'ETAPE DE SELECTION

- Trouver les procédés permettant d'assembler des Aciers

(Commencez par changer la table dans laquelle est faite la recherche dans le menu “Selection Data” pour choisir Edu Niveau 2 Procédés d'assemblage)

(Ensuite, dans la fenêtre “Tree Stage”, sélectionnez Univers des Matériaux, Métaux et alliages, sélectionnez les “alliages ferreux”, et cliquez sur Insert, puis sur OK)

EFFACEZ L'ETAPE DE SELECTION



JOINDRE LES ÉTAPES ENSEMBLE

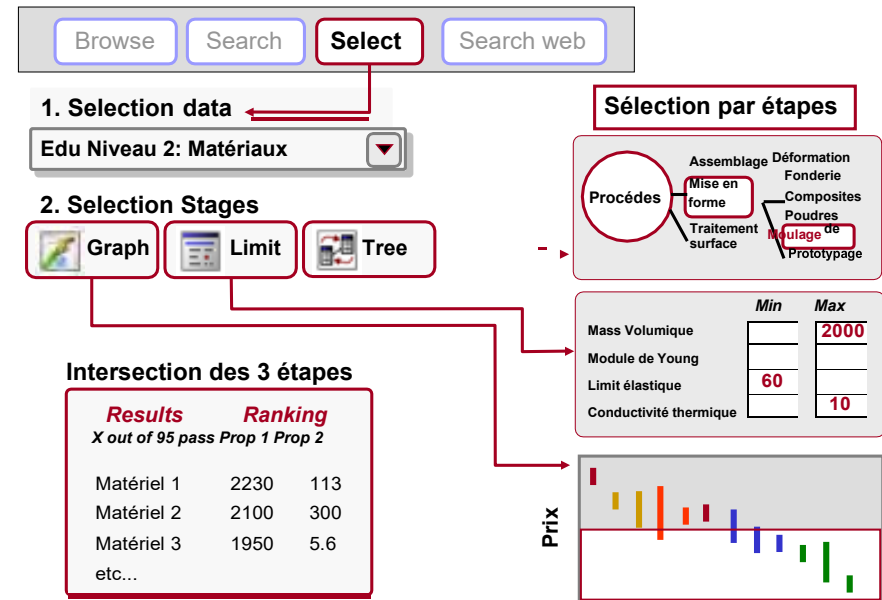
Exercice 8. Utiliser les 3 étapes ensemble

Sélectionnez l'Univers des Matériaux : Edu Niveau 2

Trouvez les matériaux répondant aux critères suivants :

- Masse volumique < 2000 kg/m³
- Limite d'élasticité > 60 MPa
- Conductivité thermique < 10 W/m.°C
(3 sélections dans le "Limit Stage")
- Aptitude à être moulé
(Tree Stage: Univers des Procédés – Mise en forme – Moulage)
- Classez les résultats par Prix
(Graph Stage : diagramme en bâton des prix)
(Sur le dernier graphique, cliquez sur l'icône "Result Intersection",
représentant un petit diagramme d'Euler ; les matériaux ne répondant pas
à au moins un critère sont grisés ; faites apparaître les noms des matériaux
restants, qui répondent à tous les critères. La fenêtre "Results" liste
tous les matériaux compatibles avec l'ensemble de ces critères.)

(Résultats par prix croissants : PET, POM, Polylactone, ...)



Exercice 9. Trouver des informations supplémentaires

(Nécessite une connexion Internet)

- Ouvrez la fiche du Polyéthylène téréphthalate puis cliquez sur le bouton Search Web
(CES EduPack traduit les identifiants de matériaux en chaînes de caractères compatibles
avec des sources d'information de qualité de matériaux et de procédés et transmet les liens.
Certaines sources sont en libre accès, d'autres nécessitent d'être abonné.
Les sources provenant de l'ASM sont particulièrement recommandées.)

EFFACEZ LA SELECTION

SÉLECTION DE PROCÉDÉS

Exercice 10. Sélectionner un procédé

Sélectionnez “Edu Niveau 2 : Procédés de mise en forme”

Trouvez les procédés de mise en forme primaires répondant aux critères suivants :

- Gamme de poids = 10 – 12 kg
- Gamme d'épaisseurs de section < 4 mm
- Forme = Tôle bombée
- Taille de la série > 1000
(5 sélections dans un Limit Stage)
- Fait en Thermoplastique
(Tree Stage: Univers des Matériaux – Polymères et elastomères – Polymères – Thermoplastiques)

(Résultats: Moulage par compression, Moulage par rotation ou rotomoulage, Thermoformage)

1. Selection data

Edu Niveau 2: Procédés de Mise en Forme

2. Selection Stages

Forme

Tôle bombée ☒

Attributs physiques

Gamme de poids: 10 12

Epaisseurs de section: 4 4

Caractéristiques du procédé

Procédés de mise en forme primaires ☒

Attributs économiques

Taille de la série: 1000

Matériaux

Ceramiques

Hybrides

Métaux

Polymères

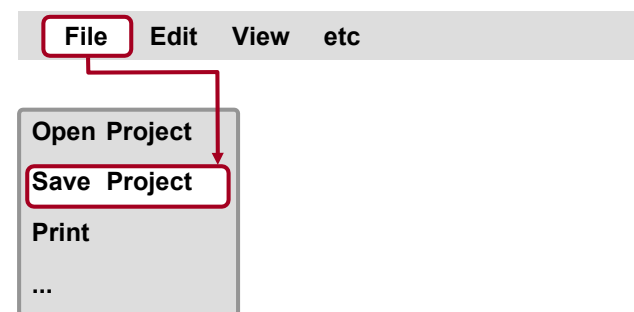
Thermoplastique

Thermodurcissables

SAUVEGARDER, COPIER et créer des RAPPORTS ECRITS

Exercice 11. Sauvegarder les étapes de sélection d'un projet

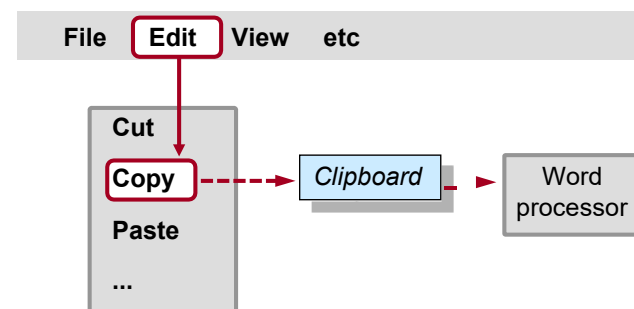
- Sauvegardez le projet – exactement comme Sauvegarder un document sous Word (indiquez un nom de fichier et un dossier de destination, les projets CES EduPack ont l'extension ".ces")



Exercice 12. Copier les résultats de CES dans un document

Les graphiques, les fiches et les listes de résultats peuvent être copiés (CTRL-C) et collés (CTRL-V) dans Word

- Affichez un graphique, cliquez dessus, ensuite copiez et collez dans un document Word
- Double cliquez sur un matériau sélectionné dans la fenêtre "Results" pour afficher sa fiche, puis cliquez sur cette fiche pour la copier et la coller
- Cliquez sur la fenêtre de résultats pour la copier et la coller
- Essayez d'éditer ce document



(Les fiches de l'exercice 3 et les graphes de sélection des exercices 4 et 6 ont été conçus de cette manière)

(Attention : Word 2000 présente un bug : les images incluses dans les textes ne sont pas copiées.

Le problème peut être contourné en copiant et en collant séparément l'image dans un document Word comme un "DEVICE INDEPENDENT BITMAP".)

ÉCO AUDIT

L'outil Éco Audit calcule la quantité d'énergie utilisée et le CO2 rejeté au cours des 5 phases du cycle de vie d'un produit (matériaux, industrialisation, transport, utilisation et fin de vie) afin d'identifier les phases dominantes. C'est le point de départ de l'Éco-Conception car il permet d'identifier les paramètres à cibler pour réduire l'empreinte environnementale du produit.

Des exemples d'Éco-Audit sont disponibles (au format .prd) dans le dossier « Samples ».

Exercice 13. Exercice d'Éco Audit

Une bouteille d'eau d'1 litre est faite à partir de PET avec un bouchon en polypropylène. La bouteille pèse 40 grammes et le bouchon pèse 1 gramme. Les bouteilles et les bouchons sont moulés, remplis et transportés sur une distance de 550 km de France en Angleterre par camion de 14 tonnes. Les bouteilles sont ensuite réfrigérées pendant 2 jours. La durée de vie moyenne d'une bouteille est d'un an.



Définition du produit

Eco Audit Project

Product name:

(Vous pouvez obtenir des explications sur les calculs utilisés pour chaque étape en cliquant sur l'icône d'aide ⓘ située en face des titres)

1. Matériaux, industrialisation, et Fin de vie.

Nomenclature des Matériaux, Techniques de traitement primaire et Fin de vie

Quantity	Component name	Material	Recycle content	Primary process	Mass (kg)	End of life
100	Bouteille	PET	0%	Moulage	0.04	Recycle
		Univers de Matériaux Céramiques et verres Hybrides: composites etc Métaux et alliages Polymères and elastomères Elastomères Polymères Thermoplastiques PET	0% 100%	Moulage Extrusion		Landfill Combust Downcycle Recycle Re-manufacture Reuse
100	Bouchon	PP	0%	Moulage	0.001	Combust
100	L'eau				1	

2. Transport

Transport du lieu de transformation au point de vente

Stage name	Transport type	Distance (km)
Lieu de transformation au point de vente	14 tonne truck	550
	Sea freight Rail freight 14 tonne truck Air freight – long haul ...	

3. Utilisation

Vie du produit et mode d'utilisation

Product life: years

Country electricity mix: **United Kingdom**

France
Germany
United Kingdom
...

Mode Statique

Energie utilisée pour réfrigérer le produit dans le point de vente (énergie moyenne requise pour réfrigérer 100 bouteilles à 4 °C = 0.12 kW)

☒ Product uses the following energy:

Energy input and output: **Electric to mechanical (electric motors)**

Power rating: kW

Usage: days per year

Usage: hours per day

Fossil fuel to thermal, enclosed system
Fossil fuel to electric
Electric to thermal
Electric to mechanical (electric motors)
...

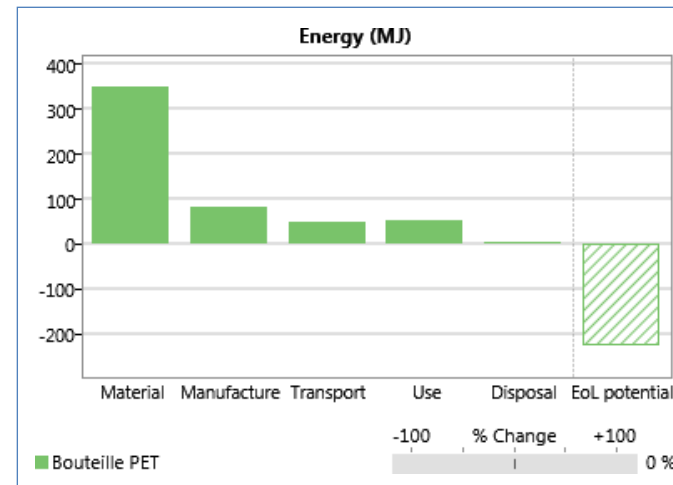
4. Rapport

Summary chart

Permet d'identifier rapidement la phase de vie dominante. Visualisation de la consommation d'énergie ou de l'empreinte carbone.

Energy

CO2



(Résultat: La phase matériaux est la phase dominante)

- Cliquez sur la colonne de la phase de vie Matériaux sur le graphique pour obtenir des conseils sur les stratégies à mettre en œuvre pour réduire cet impact.

Detailed report

Fournit la répartition détaillée de l'impact des composants pour chaque phase de vie, permettant ainsi d'identifier les contributeurs principaux de la phase dominante.

Exercice 14. COMPARER des Eco-Audits

- Comparer des Éco-Audits

(Dans l'onglet "Product definition", cliquez sur "Compare with" puis sélectionnez "Copy of current product")

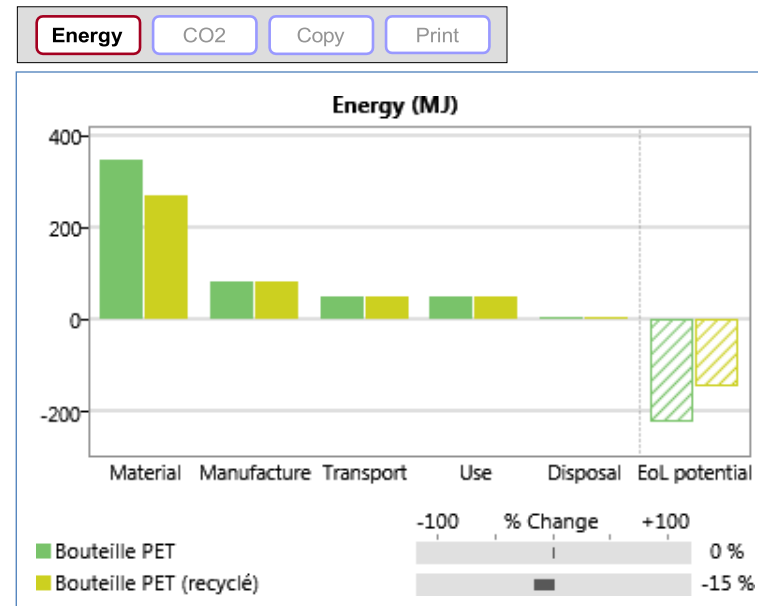
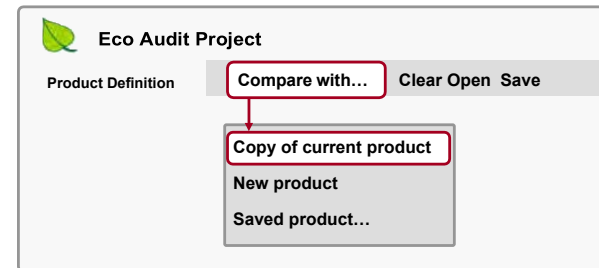
- Dans la copie, modifiez le nom du produit comme suit : 'Bouteille PET (recyclé)'

Pour le matériau PET

- Modifiez le pourcentage dans la colonne RECYCLED CONTENT : 35%

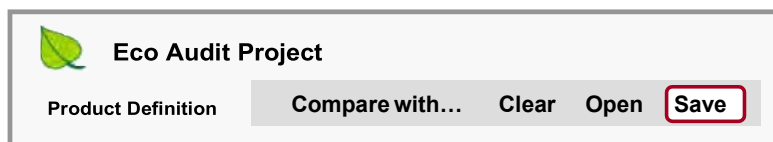
Remarquez que l'énergie consommée (sans prendre en compte le potentiel de récupération en fin de vie) est réduite de 15%

- Cliquez sur le bouton COPY pour copier le graphique puis le coller dans un document



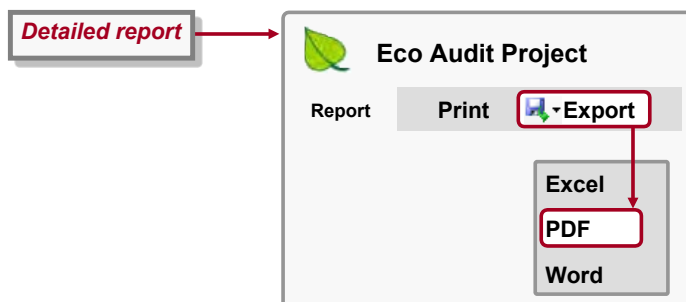
Exercice 15. Enregistrer un projet d'Éco Audit

Les projets d'Éco Audit ne font pas partie des projets de sélection et doivent être enregistrés séparément



- SAUVER le projet du produit (Nommez-le et localisez-le; les fichiers Éco Audit ont l'extension “.prd”)

Exercice 16. Enregistrer/Exporter un Rapport



- REALISEZ le rapport Éco Audit
- EXPORTEZ le rapport Éco Audit vers un fichier PDF

(Note: Vous aurez besoin de Microsoft Excel ou un lecteur de PDF tel que Adobe Reader pour voir le rapport exporté)

Annexes

Barres d'outils dans CES EduPack

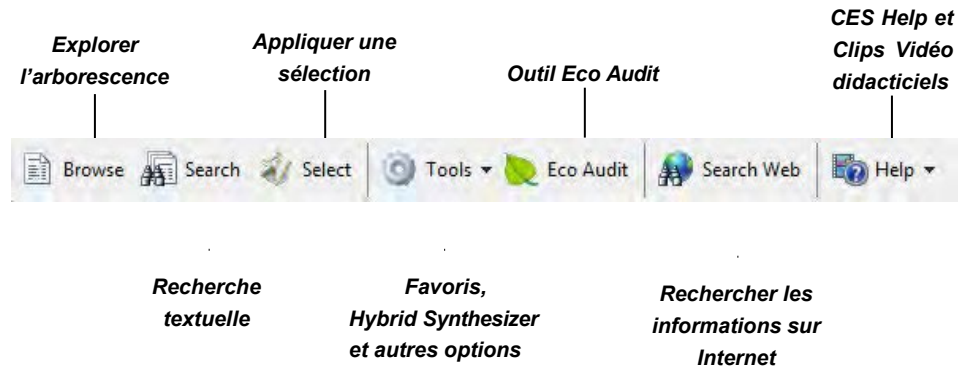


Figure A1. La barre d'outils standard dans CES EduPack

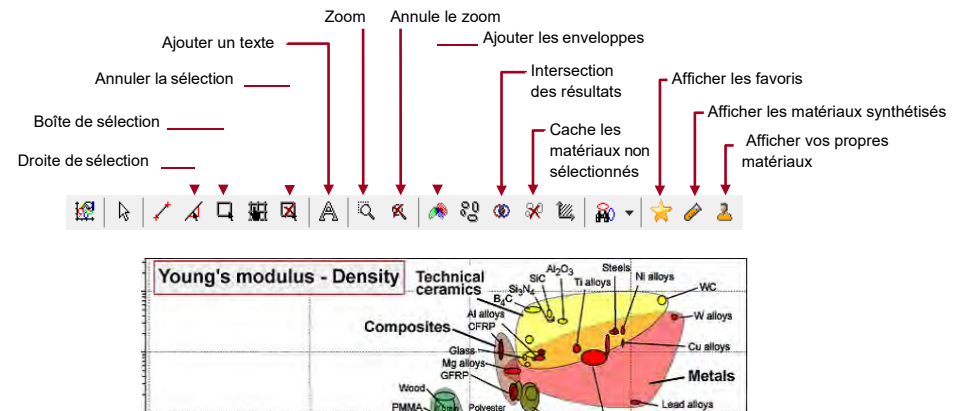


Figure A2. La barre d'outils des "Graph Stage" dans CES EduPack

Constantes physiques et conversion d'unités

Température zéro absolu	-273.2°C
Accélération de pesanteur, g	9.807m/s ²
Nombre d'Avogadro, N _A	6.022 x 10 ²³
Base des logarithmes Népériens, e	2.718
Constante de Boltzmann, k	1.381 x 10 ⁻²³ J/K
Constante de Faraday, k	9.648 x 10 ⁴ C/mol
Constante des gaz parfaits, $\bar{R}$	8.314 J/mol/K
Constante de Planck, h	6.626 x 10 ⁻³⁴ J/s
Célérité de la lumière dans le vide, c	2.998 x 10 ⁸ m/s
Volume molaire des gaz parfaits à PTS	22.41 x 10 ⁻³ m ³ /mol

Angle, θ	1 rad	57.30°
Masse volumique, ρ	1 lb/ft ³	16.03 kg/m ³
Coefficient de diffusion, D	1cm ² /s	1.0 x 10 ⁻⁴ m ² /s
Energie, U	Voir tableau	
Force, F	1 kgf	9.807 N
	1 lbf	4.448 N
	1 dyne	1.0 x 10 ⁻⁵ N
Longueur, L	1 ft	304.8 mm
	1 inch	25.40 mm
	1 Å	0.1 nm
Masse, M	1 tonne	1000 kg
	1 short ton	908 kg
	1 long ton	1107 kg
	1 lb mass	0.454 kg
Puissance, P	Voir tableau	
Contrainte, σ	Voir tableau	
Chaleur spécifique, Cp	1 cal/gal.°C	4.188 kJ/kg.°C
	Btu/lb.°F	4.187 kg/kg.°C
Intensité de contrainte critique, K _{1c}	1 ksi $\sqrt{\text{in}}$	1.10 MN/m ^{3/2}
Energie surfacique γ	1 erg/cm ²	1 mJ/m ²
Température, T	1°F	0.556°K
Conductivité thermique λ	1 cal/s.cm.°C	418.8 W/m.°C
	1 Btu/h.ft.°F	1.731 W/m.°C
Volume, V	1 Imperial gall	4.546 x 10 ⁻³ m ³
	1 US gall	3.785 x 10 ⁻³ m ³
Viscosité, η	1 poise	0.1 N.s/m ²
	1 lb ft.s	0.1517 N.s/m ²

Conversion d'unités– contraintes et pressions*

	MPa	dyn/cm ²	Lb.in ²	kgf/mm ²	bar	long ton/in ²
MPa	1	10 ⁷	1.45 x 10 ²	0.102	10	6.48 x 10 ⁻²
dyn/cm²	10 ⁻⁷	1	1.45 x 10 ⁻⁵	1.02 x 10 ⁻⁸	10 ⁻⁶ .48 x 10 ⁶	10 ⁻⁹
lb/in²	6.89 x 10 ⁻³	6.89 x 10 ⁴	1	703 x 10 ⁻⁴	6.89 x 10 ⁻²	4.46 x 10 ⁻⁴
kgf/mm²	9.81	9.81 x 10 ⁷	1.42 x 10 ³	1	98.1	63.5 x 10 ⁻²
bar	0.10	10 ⁶	14.48	1.02 x 10 ⁻²	1	6.48 x 10 ⁻³
long ton/ in²	15.44	1.54 x 10 ⁸	2.24 x 10 ³	1.54	1.54 x 10 ²	1

Conversion d'unités – énergie*

	J	erg	cal	eV	Btu	ft lbf
J	1	10 ⁷	0.239	6.24 x 10 ¹⁸	9.48 x 10 ⁻⁴	0.738
erg	10 ⁻⁷	1	2.39 x 10 ⁻⁸	6.24 x 10 ¹¹	9.48 x 10 ⁻¹¹	7.38 x 10 ⁻⁸
cal	4.19	4.19 x 10 ⁷	1	2.61 x 10 ¹⁹	3.97 x 10 ⁻³	3.09
eV	1.60 x 10 ⁻¹⁹	1.60 x 10 ⁻¹²	3.38 x 10 ⁻²⁰	1	1.52 x 10 ⁻²²	1.18 x 10 ⁻¹⁹
Btu	1.06 x 10 ³	1.06 x 10 ¹⁰	2.52 x 10 ²	6.59 x 10 ²¹	1	7.78 x 10 ²
ft lbf	1.36	1.36 x 10 ⁷	0.324	8.46 x 10 ¹⁸	1.29 x 10 ⁻³	1

Conversion d'unités – puissance*

	kW (kJ/s)	erg/s	hp	ft lbf/s
kW (kJ/s)	1	10 ⁻¹⁰	1.34	7.38 x 10 ²
erg/s	10 ⁻¹⁰	1	1.34 x 10 ⁻¹⁰	7.38 x 10 ⁻⁸
hp	7.46 x 10 ⁻¹	7.46 x 10 ⁹	1	15.50 x 10 ²
Ft lbf/s	1.36 x 10 ⁻³	1.36 x 10 ⁷	1.82 x 10 ⁻³	1

* Pour convertir les unités des rangées avec celles des colonnes, multipliez par le nombre à l'intersection des lignes, donc 1MPa = 10 bar

Author

Professor Mike Ashby and Granta Design
University of Cambridge, Granta Design Ltd.
www.grantadesign.com
www.eng.cam.ac.uk

Reproduction

This is part of Granta's Open Access Teaching Resources. You can reproduce these resources in order to use them with students. Please make sure that Mike Ashby and Granta Design are credited on any reproductions. You cannot use these resources for any commercial purposes.

Accuracy

We try hard to make sure these resources are of a high quality. If you have any suggestions for improvements, please contact us by email at teachingresources@grantadesign.com.

Open Access Resources include:

- Interactive Case Studies
- Getting Started Guides
- Materials Property Charts
- Engineering Data Booklets

You can register for a user name and password for these resources here:

www.grantadesign.com/education/resources

Other Resources Available:

- 24 PowerPoint lecture units
- Exercises with worked solutions
- Recorded webinars
- Posters
- White Papers
- Solution Manuals

