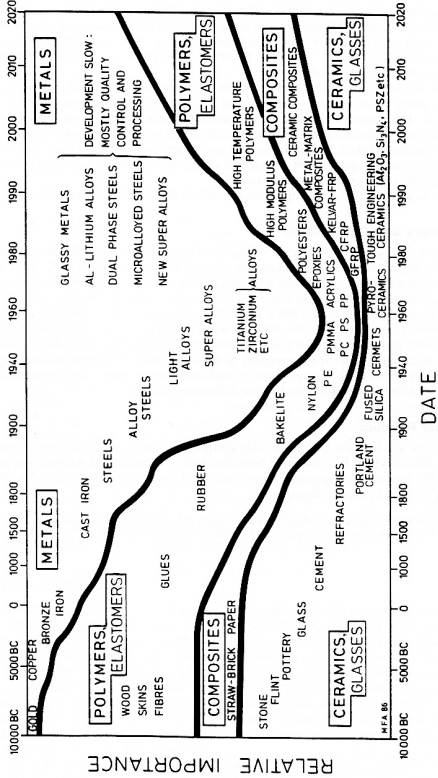


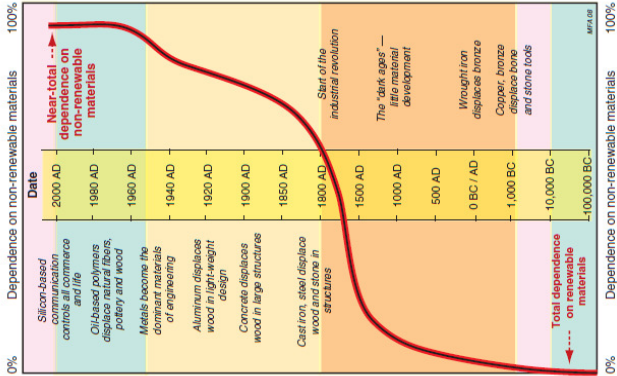
Partie « Matériaux et leur sélection

- (1) Architectures atomiques
- (2) Les liaisons interatomiques
- (3) L'état cristallin et l'état amorphe
- (4) La production d'aciers
- (5) La production des verres plats
- (6) La sélection des matériaux

Un petit peu d'histoire



Un petit peu d'histoire

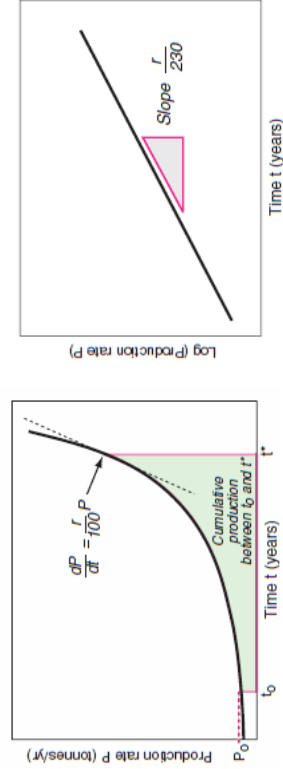


Ce que nous fournit Mère Nature

9 éléments = 99.4% de la croûte terrestre → recyclage

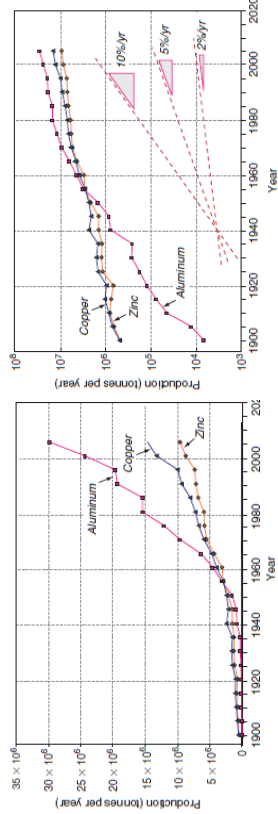
Ecorce continentale (1 km) masse ≈ 10 ¹⁸ tonnes (% poids)	Océans masse ≈ 10 ¹⁷ tonnes (% poids)	Atmosphère masse ≈ 10 ¹⁶ tonnes (% poids)
O ₂ 47 Si 27 Al 8 Fe 5 Ca 4 Na 3 K 3 Mg 2 Ti 0,4	O ₂ 85 H ₂ 10 Cl 2 Na 1	N ₂ 79 O ₂ 19 Ar 2

Evolution exponentielle de la production

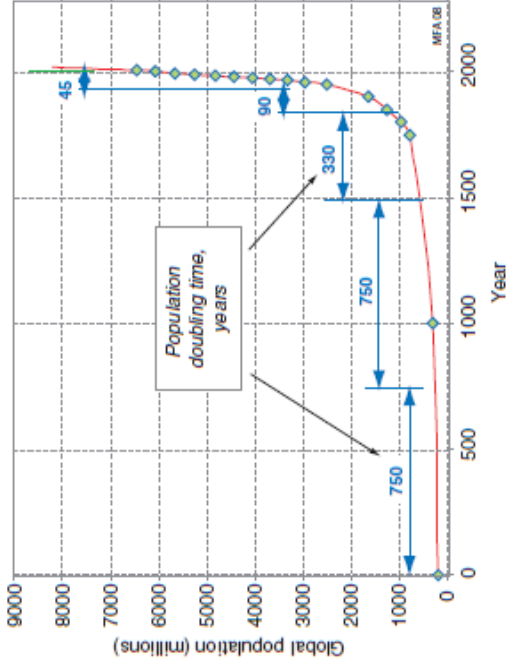


Pour une croissance exponentielle, la quantité est doublée toute les $(70/r)$ années.

Evolution exponentielle de la production



Evolution de la population du globe

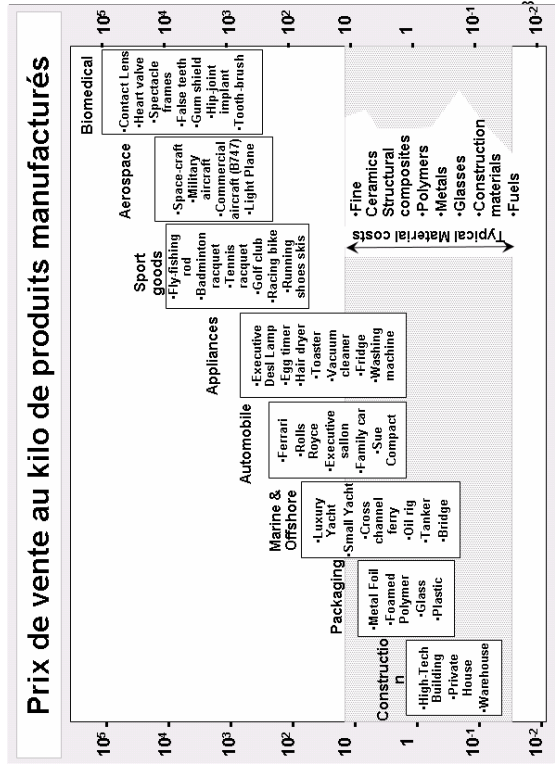


Croissance bien plus rapide qu'une « exponentielle »

Coûts matières premières

Matériau	Prix (US\$/tonne)
Diamant	6-9 10 ⁸
Or	8 10 ⁶
Argent	6 10 ⁵
CFRP	5-12 10 ⁴
Co carbures de W	5-7 10 ⁴
Alliages de Ni	8 10 ⁴
Nylon 66	4000-8000
Polycarbonate	4500
Alumine	1.5 10 ⁴
GFRP	2000-4500
Acier inox	3000
Aluminium (lingots)	1400
Verre	1000-2000
polypropylène	700-1000
Polyéthylène HD	1000
Acier doux	450
Béton	200
Charbon	100

Coût après mise en forme



Importance du consommateur

Valeur d'échange : ce que le consommateur est prêt à payer pour la performance...

Ex: gain de masse d'un vélo, d'un VTT, d'une paire de skis...

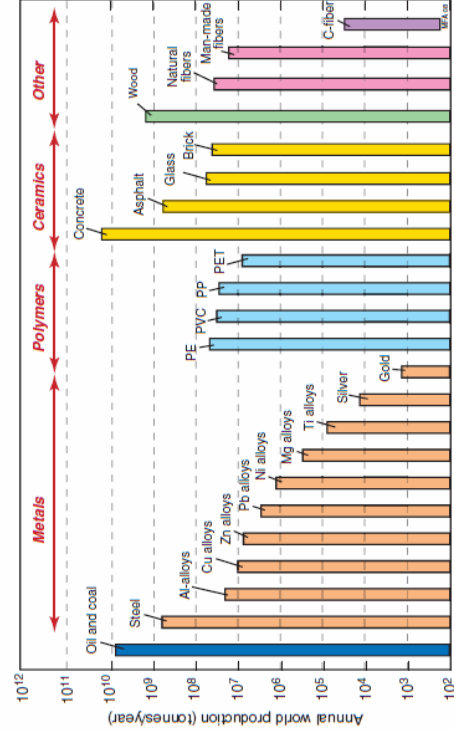
Quelques valeurs estimées des coefficients d'échange dans l'industrie du transport.

Moyen de transport	Surcoût acceptable par kg gagné (euro/kg)
voiture grand public	0,5 à 1,5
camion	5 à 10
avion civil	100 à 500
avion militaire	500 à 2000
véhicule spatial	3000 à 10 000
vélo	80 à 2000

Partie « Matériaux et leur sélection

- (1) Architectures atomiques
- (2) Les liaisons interatomiques
- (3) L'état cristallin et l'état amorphe
- (4) La production d'aciers
- (5) La production des verres plats
- (6) La sélection des matériaux

Pq s'intéresser à la production d'aciers et de verres?



! Echelle logarithmique!

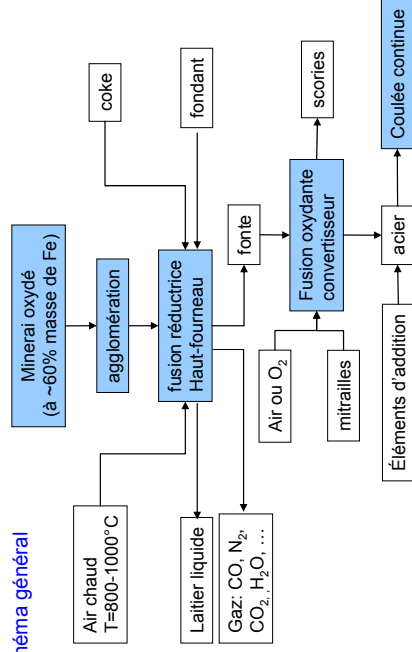
Production d'aciers: schéma de principe

Principe général :

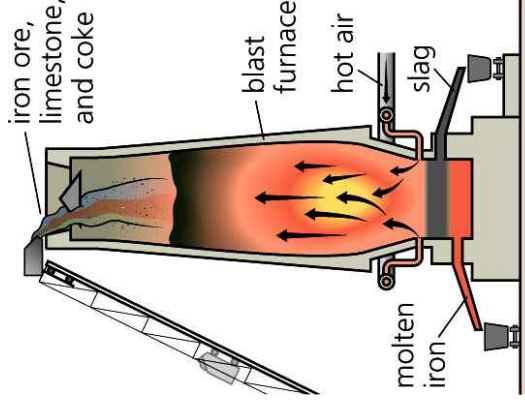
- Réduction du minerai de fer par le coke dans un haut fourneau $\Rightarrow$ fonte
- Affinage de la fonte dans un convertisseur (oxydation d'une partie du carbone) $\Rightarrow$ acier

Évolution importante de la technologie de production au cours du XX^{ème} siècle.

Schéma général



Le Haut-Fourneau



Le Haut-Fourneau

Matières premières ferreuses:

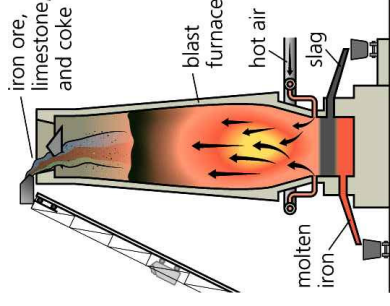
- Minerais:
 - l'hématite: Fe_2O_3
 - la magnétite: Fe_3O_4 , oxyde mixte de fer (II) et de fer (III)
 - la limonite: $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$
 - la sidérite: $FeCO_3$
- Teneur en Fe variant de 30 à 60 % en masse
- Les oxydes sont associés à une gangue formée d'oxydes d'aluminium, de calcium, de magnésium, de silicium...
- Ferrailles:

- récupération effectuée par les industries de transformation et du recyclage de biens d'équipement

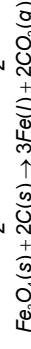
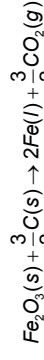
Le haut-fourneau

On charge le gueulard avec: le minerai aggloméré, le coke, des additions dont le fondant (dont la nature dépend de la gangue).

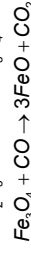
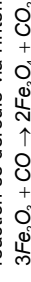
Le Haut-Fourneau: Réactions en jeu



En théorie:



Le contact entre solides est mauvais $\Rightarrow$ la réaction se déroule via l'intermédiaire de CO:



Rôle du coke:

- Le carbone est le combustible $\Rightarrow$ apport de chaleur au niveau des tuyères d'injection de l'air
- Réaction globale: $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$ (très exothermique)
- Réaction à $T > 1050^\circ C$ (bas du HF)
- réduction des oxydes de fer
- Assure la perméabilité et le soutien de la charge

A la sortie du haut-fourneau, on récolte de la fonte (concentration en C > 2%) contenant trop d'impuretés pour applications directes.

Oxydation sélective dans le convertisseur

Le convertisseur

Passage de la fonte à l'acier

Principe général: insuffler de l'oxygène dans un bain de fonte liquide ⇨ élimination totale ou partielle par oxydation de C, Si, S, P sous forme de gaz ou de scories. On passe de 1300°C (fonte liquide) à 1600°C (acier liquide), l'énergie nécessaire est fournie par les réactions d'oxydation.



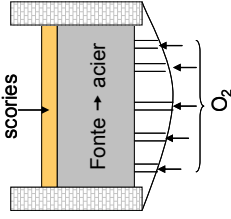
L'oxygène peut être injecté soit:

- directement dans le bain via le fond du convertisseur ⇨ procédés Thomas (air ou air enrichi), OBM, Q-BOP et LWS (oxygène)
- Seulement à la surface du bain ⇨ procédés LD, LDP, OLP (combine l'injection d'oxygène et de CaO pour favoriser la déphosphoration)

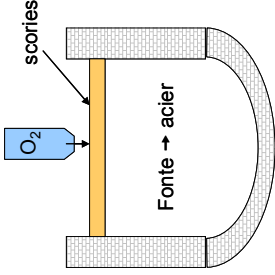
91

Oxydation sélective dans le convertisseur

Type OBM



Type LD



On peut également ajouter de la manganèse dans le convertisseur (jusqu'à 25% en masse). Cela permet de réguler la température et d'éviter la ré-oxydation du fer.

Refusion des manganèses

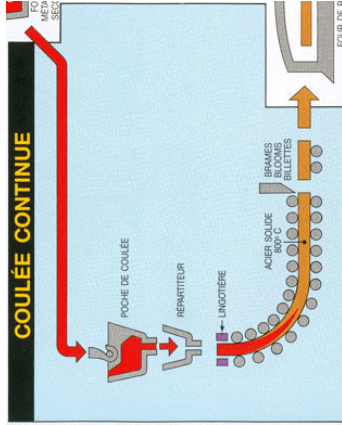
Économie de minerai, de coke et de chaux.

Actuellement se fait de plus en plus dans des fours à arc: l'énergie nécessaire à la fusion est fournie par des arcs électriques entre le bain et des électrodes consommables en graphite.

Ajustement de la composition de l'acier par addition de différents métaux sous forme d'alliages.

92

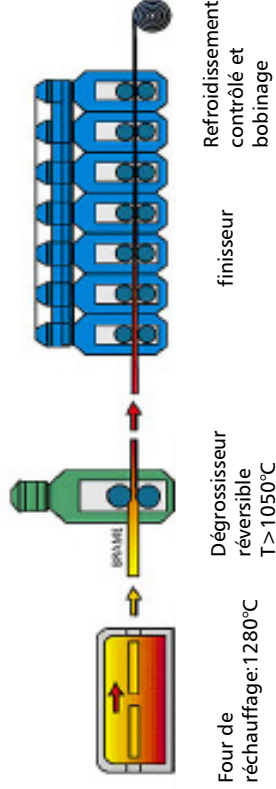
Et après?



93

Mise en forme par laminage à chaud

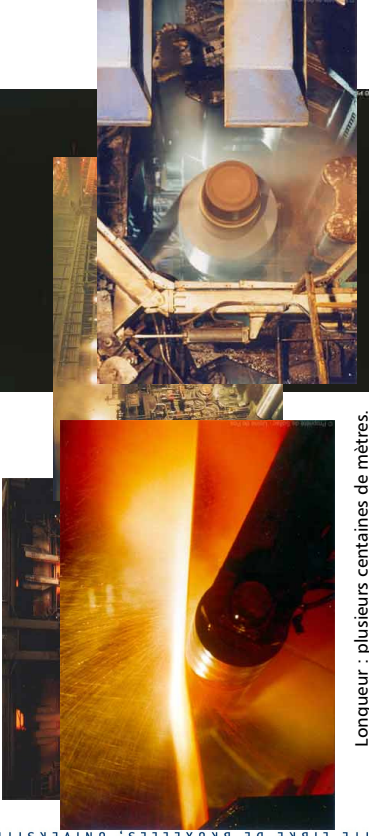
Le principe



94

Mise en œuvre par laminage à chaud

La réalité industrielle



Longueur : plusieurs centaines de mètres.
Puissance des cages cumulée : plus de 100 000 kW (puissance du Queen Mary 2)
Consommation électrique équivalente à celle de la ville de Lyon (hors industries)
Production annuelle : plus de 5 millions de tonnes
Longueur de la tôle: jusqu'à 3 Km.

<http://www.arcelormediteranee.com/phototheque/fos/default.htm>

Introduction

95

ULB

Partie « Matériaux et leur sélection

- (1) Architectures atomiques
- (2) Les liaisons interatomiques
- (3) L'état cristallin et l'état amorphe
- (4) La production d'aciers
- (5) La production des verres plats
- (6) La sélection des matériaux

96

Raw glass

What is Glass ?

Remerciements: Pierre Carleer,
AGC-FlatGlass

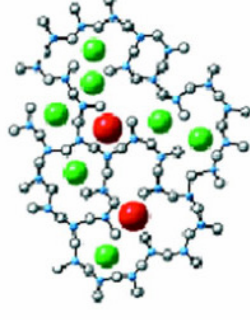
97

ULB

Raw glass – What is glass?

- Definition
 - The glass is an **amorphous material**
- ASTM-C162 (1983)
 - "Glass - an inorganic product of fusion that has cooled to a rigid condition without crystallization"
- Non crystalline material, **molecular character has no order**
- Physico-chemical point of view: frozen undercooled liquid

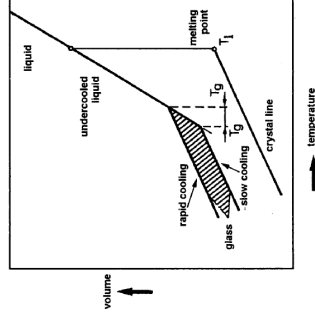
● Calcium: Ca^{2+}
● Sodium: Na^{+}
● Oxygen: O^{2-}
● Silicon: Si^{4+}



98

Raw glass – What is glass?

- Definition
 - The glass is an amorphous material
 - The transition liquid state - undercooled: liquidus temperature called $T_0 \sim 1000^\circ\text{C}$
 - The transition undercooled state - frozen state: T_g temperature $\sim 550^\circ\text{C}$



Raw glass – What is glass?

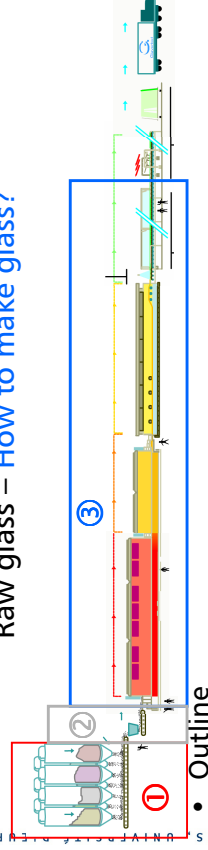
- Definition
 - The flat glass is a soda lime silicate
 - Typical composition indeed contents

	Clear glass	
SiO ₂	71.8%	Silicon oxide
Al ₂ O ₃	0.8%	Sodium oxide
Na ₂ O	14.0%	Calcium oxide
K ₂ O	0.3%	...
CaO	8.8%	
MgO	4.0%	
Fe ₂ O ₃	0.1%	
SO ₃	0.20%	
	Colored glass	
Fe ₂ O ₃	0.3% to 1.6%	
Co	0 to 200 ppm	
Se	0 to 40 ppm	
Cr ₂ O ₃	0 to 500 ppm	
V ₂ O ₅	0 to 500 ppm	
		+TiO ₂ , Cs ₂ O, NiO,...

Raw glass

How to make glass ?

Raw glass – How to make glass?

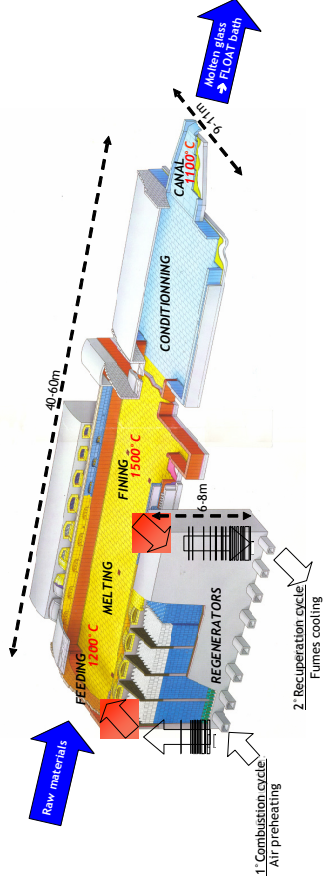


- Outline
 - Raw materials
 - Sources and analyses
 - Specifications
 - Batch
 - Elaboration and preparation
 - Glass production: float furnace
 - Raw materials charging
 - Tank
 - Tin bath
 - Lehr

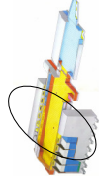
Raw glass – How to make glass?

• Glass production

- Float furnace



103



Raw glass – How to make glass?

• Glass production

- Float furnace:
 - The furnace tank contains molten glass. Three different zones:
 - charging end
 - melting and fining zone
 - conditioning end (thermic conditioning)
 - Oil or gas combustion for raw materials melting and glass fining: ~150 kg oil / ton glass

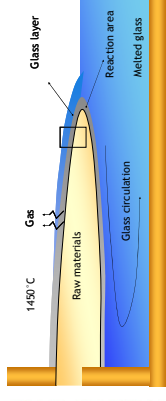


105

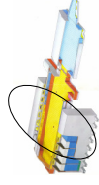
Raw glass – How to make glass?

• Glass production

- Float furnace: raw materials charging
 - Weighted separately, raw materials are mixed and poured into the charging hopper
 - Batch is inserted into the furnace by the batch chargers, moving slides (translation and rotation) that pour the batch on the melted glass surface



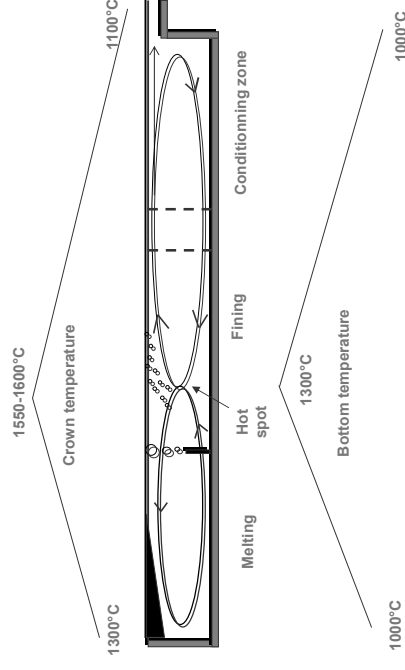
104



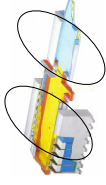
Raw glass – How to make glass?

• Glass production

- Float furnace: the tank



106



Raw glass – How to make glass?

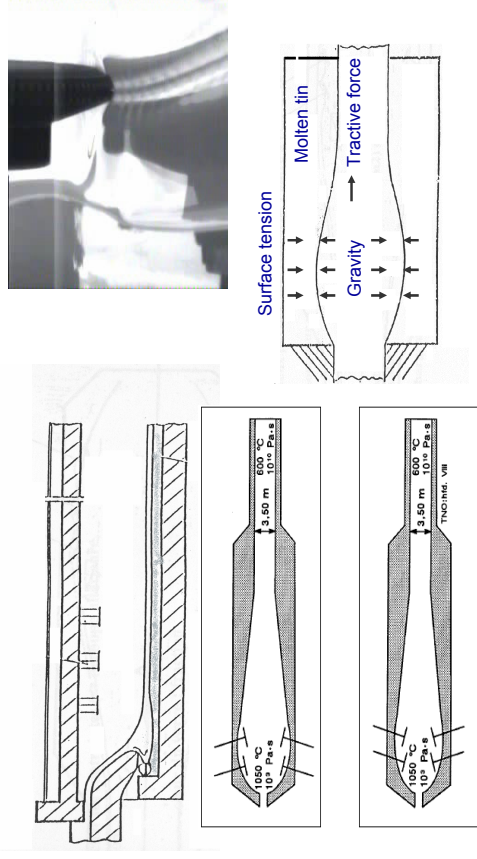
- **Glass production**
 - Float furnace: the tank
 - The melting and the fining occur in the first part, the heated part of the furnace
 - To obtain a glass without bubble and unmelted particle, 1500°C is needed
 - After the fining, the glass is thermically controlled to reach 1100°C at the exit lip of the furnace. It occurs in the conditioning zone (non heated).
 - Shadow wall separating the melting - fining zone and the conditioning zone: in the neck
 - Use of mixers for glass homogeneity
 - Use of skimbar to control glass currents (forward and back currents) and to control the glass temperature in the forward current
 - Air blowing into the conditioning zone for thermic control

Raw glass – How to make glass?

- **Glass production**
 - Float furnace: the tin bath
 - At the exit lip of the furnace (spout) the glass leaves the furnace at 1050-1100°C (10^4 poise) and is poured on a melted tin bath
 - Tin melting temperature: 230°C, density 6,5
 - Glass temperature 1050°C, density 2,4
 - The glass tends naturally to reach a thickness of ~6 mm
 - The top rollers in the float are used to control the glass width and its thickness by increasing or decreasing the glass speed
 - N_2 and H_2 atmosphere to avoid any tin oxydation (leading to typical float defects: SnO_2 drips, bloom...)
 - The glass leaves the tin bath, the float, at ~600°C (10^{11} poise)

Raw glass – How to make glass?

- **Glass production**
 - Float furnace: the tin bath



Raw glass – How to make glass?

- **Glass production**
 - Float furnace: the annealing lehr
 - At the float exit, the glass is lifted out by three lift-out rollers and brought into the lehr (at ~600°C)
 - The purpose of the lehr is to slowly cool down the glass to loosen its internal constraints. So, we avoid glass breakage induced by a potential fast cooling
 - The internal stresses appear during the cooling down of the glass in its transformation area/
 - The bulk of the glass cools down more slowly than its surfaces
 - The bulk is in contraction, the surface in compression
 - The glass leaves the lehr at ~70°C, ready to be cooled down to ambient temperature, treated and cut

Raw glass – How to make glass?

- Glass production
 - Float furnace: cutting
 - Different treatments applied to the glass, from the lehr exit to stock
 - Raw ribbon
 - Washing machine
 - Lazer defects detection
 - Surface protection
 - Cutting
 - Interlayer powder
 - Stacking
- PLF sizes: 600 - 510 - 450 by 321 cm
- DLF sizes: 150 - 255 by 321 cm



Partie « Matériaux et leur sélection

- (1) Architectures atomiques
- (2) Les liaisons interatomiques
- (3) L'état cristallin et l'état amorphe
- (4) La production d'aciers
- (5) La production des verres plats
- (6) La sélection des matériaux

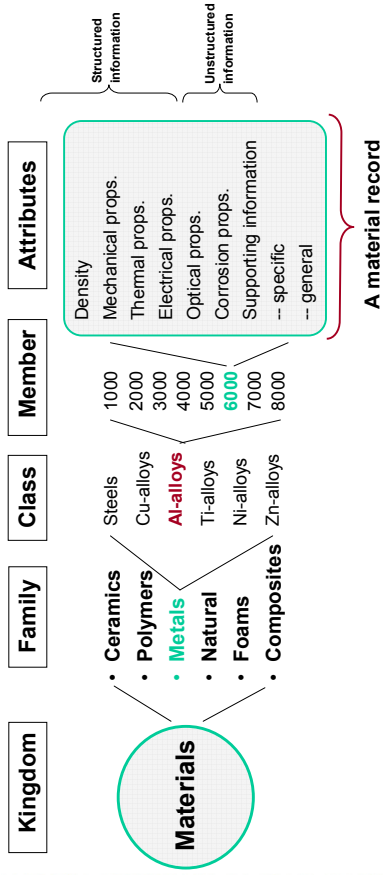
Pourquoi la sélection des matériaux

140 000 matériaux: nécessité d'une approche rationnelle
Approche rationnelle se doit d'être quantitative
La stratégie adoptée doit pouvoir être adaptée à différents cas

Nous avons besoin:

- 1. D'une base de données (matériaux et procédés)
- 2. D'une méthode rigoureuse pour naviguer à travers cette base de données.

Une base de données:CES



Dans CES: 3 niveaux dans la base de données

Une base de données:CES



Prof. Mike Ashby
Cambridge University



Prof. Yves Bréchet
INPGrenoble

Approche brutale

Supposons que l'on ait besoin d'un matériau avec une limite élastique $\sigma_y > 100\text{MPa}$ et un module de Young $E > 10\text{ GPa}$.

Une méthode possible consiste à rechercher les propriétés des différents matériaux dans des livres de références, internet, etc...

Cela prend du temps et est peu efficace...

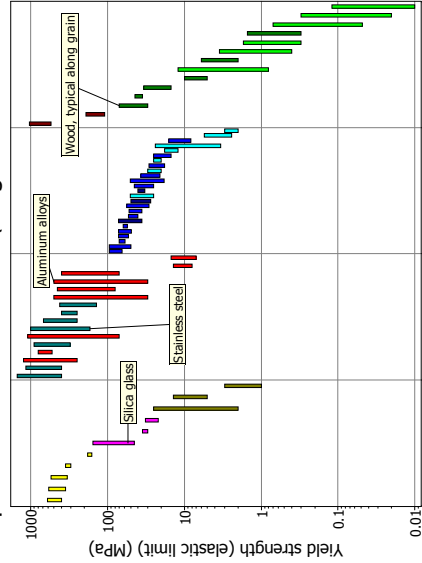
Example: Typical properties of wrought Al-alloys (extract)

Alloy and temper	Strength, ksi		Elongation, % in 2 in.		Brinell 100 kg ball 60 sec at 30 in. min	Ultimate tensile strength, ksi	Modulus of elasticity, ksi x 10 ⁶
	Ultimate	Yield	1/16 in. thick specimen	1/2 in. dia. specimen			
6062-H32	28	28	18	25	47	18	10.2
6062-H34	38	28	22	19	60	20	10.2
6062-H36	38	31	16	14	68	21	10.2
6062-H38	40	35	8	10	73	23	10.2
6062-H39	42	27	7	8	77	24	10.2
6062-H35	38	20	32	32	40	12	10.0
6062-H38, H39	28	24	7	7	59	15	10.0
6061-O	18	8	25	30	30	12	10.0
6061-T4, T481	35	21	22	25	65	24	10.0
6061-T6, T801	45	30	12	17	95	30	10.0
Alclad 6061-O	17	7	28	31	11	11	10.0
Alclad 6061-T4, T481	33	19	22	22	11	22	10.0
Alclad 6061-T6, T801	42	27	12	12	11	27	10.0

Approche moins brutale

Supposons que l'on ait besoin d'un matériau avec une limite élastique $\sigma_y > 100\text{MPa}$ et un module de Young $E > 10\text{ GPa}$.

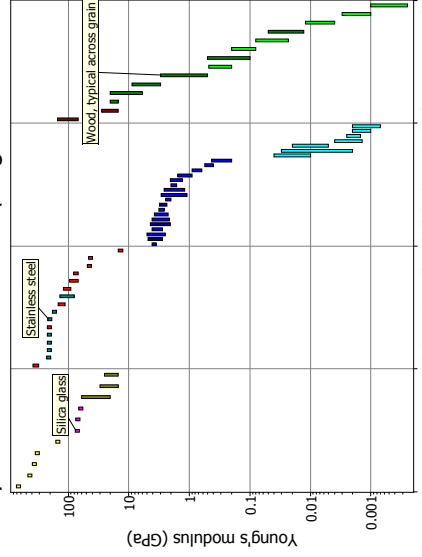
Une méthode plus élégante consiste à regarder les propriétés d'intérêt pour tous les matériaux (diagrammes à barres)



Approche moins brutale

Supposons que l'on ait besoin d'un matériau avec une limite élastique $\sigma_y > 100\text{MPa}$ et un module de Young $E > 10\text{ GPa}$.

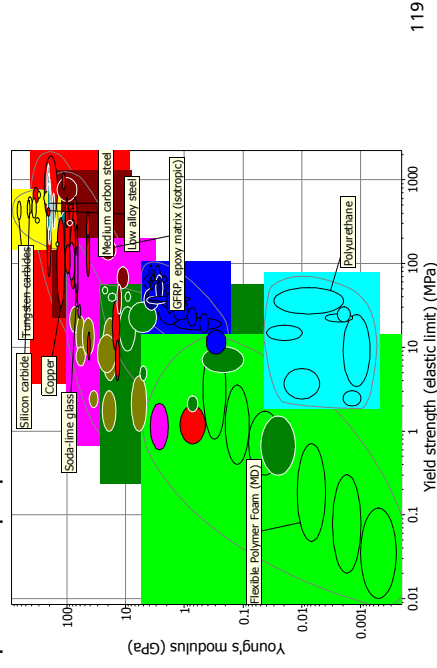
Une méthode plus élégante consiste à regarder les propriétés d'intérêt pour tous les matériaux (diagrammes à barres)



Les cartes de sélection

Supposons que l'on ait besoin d'un matériau avec une limite élastique $\sigma_y > 100\text{MPa}$ et un module de Young $E > 10\text{GPa}$.

Dès que la sélection doit se faire sur plus d'une propriété, il est utile de porter une propriété en fonction de l'autre

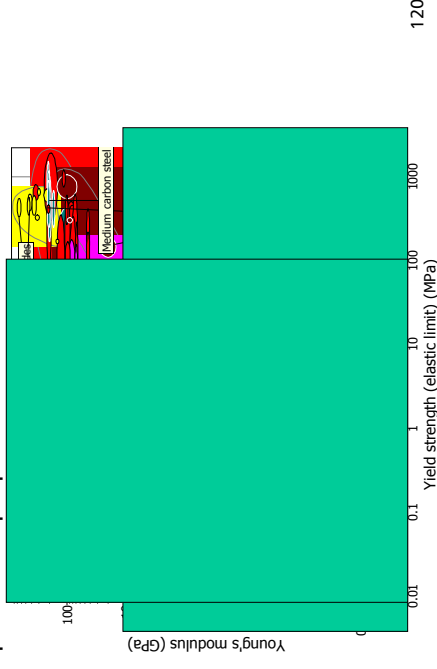


119

Les cartes de sélection

Supposons que l'on ait besoin d'un matériau avec une limite élastique $\sigma_y > 100\text{MPa}$ et un module de Young $E > 10\text{GPa}$.

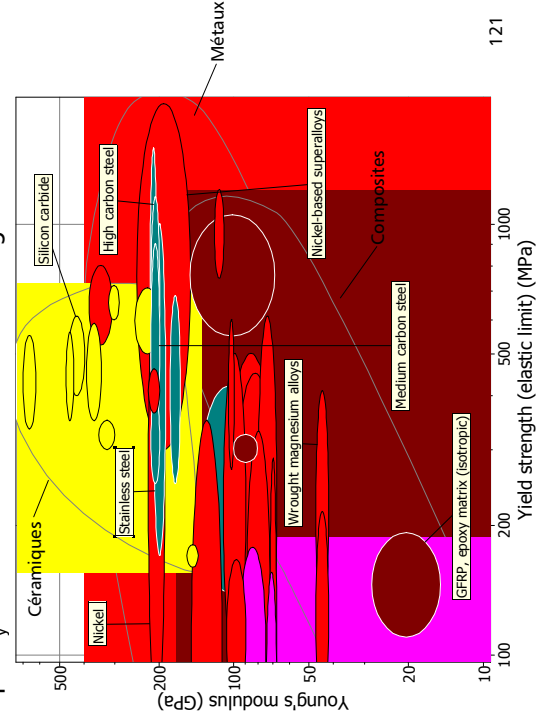
Dès que la sélection doit se faire sur plus d'une propriété, il est utile de porter une propriété en fonction de l'autre



120

Les cartes de sélection

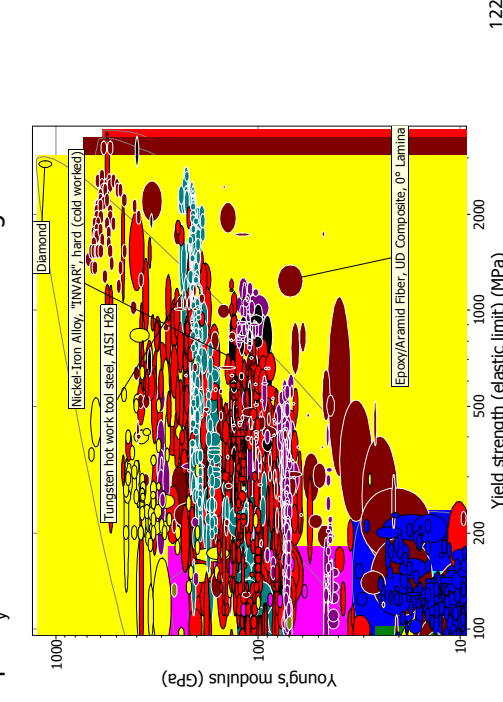
Supposons que l'on ait besoin d'un matériau avec une limite élastique $\sigma_y > 100\text{MPa}$ et un module de Young $E > 10\text{GPa}$.



121

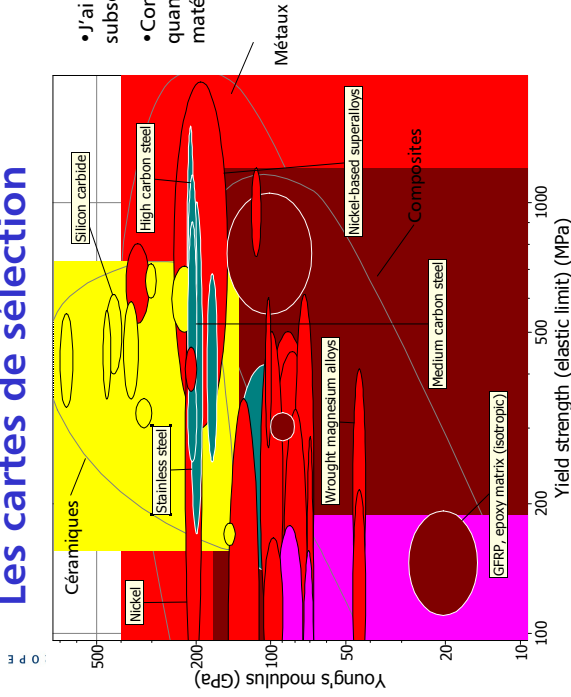
Les cartes de sélection

Supposons que l'on ait besoin d'un matériau avec une limite élastique $\sigma_y > 100\text{MPa}$ et un module de Young $E > 10\text{GPa}$.



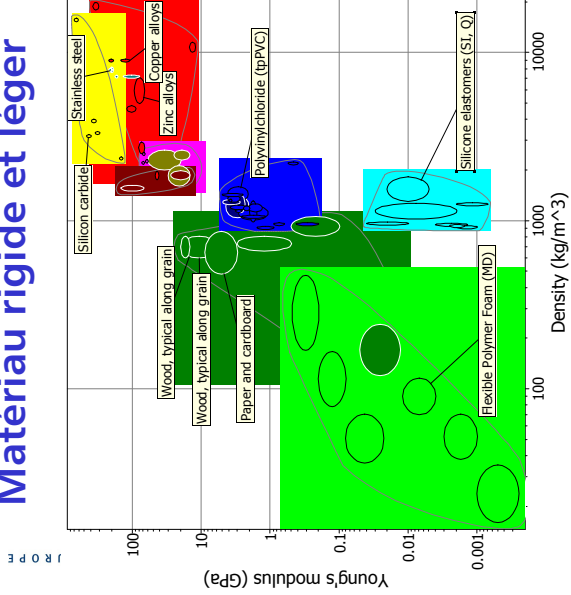
122

Les cartes de sélection



- J'ai maintenant un subset
- Comment comparer quantitativement les matériaux entre eux ?

Matériau rigide et léger



Combien suis-je prêt à perdre sur E pour gagner 1 sur ρ ?

N'est-on pas en train de comparer des poires et des pommes ?

Nous avons besoin de plus d'infos pour donner un INDICE DE PERFORMANCE.

La Démarche

TOUS LES MATERIAUX

FILTRAGE : appliquer des limites (éliminer les matériaux inadéquats)
CLASSEMENT : appliquer des indices (trouver les matériaux les plus adéquats)

Sous-ensemble de matériaux

Informations complémentaires
publications, CD-ROMs, WWW

Liste de candidats potentiels

Conditions locales (expertise)

MATERIAUX SELECTIONNES

La Démarche

Basic steps of materials selection :

same idea as selecting a candidate for a job

No discrimination at the start

Clear description of job Requirements

Screen the resumes

Interview the candidates

Check background of most promising candidates

Hire

L'étape de « traduction » est la clé

Une fois que l'on a défini un concept (par exemple pour un tire-bouchon, un aspirateur...), il est nécessaire de l'évaluer en se posant les questions suivantes:

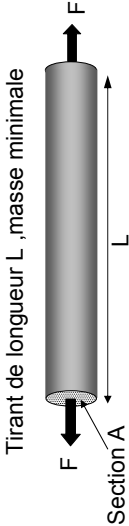
1. Que fait cet objet?
2. Que cherche-t-on à optimiser (minimiser ou maximiser)?
3. Quelles sont les contraintes?



Exemple : tirant solide et léger

Fonction

Tirant



Contraintes

- Longueur L is spécifiée
- ne doit pas rompre ,charge F

Equation pour la contrainte A:

$$F/A < \sigma_y \quad (1)$$

Objectif

Minimiser la masse m:

$$m = A L \rho \quad (2)$$

variables libres

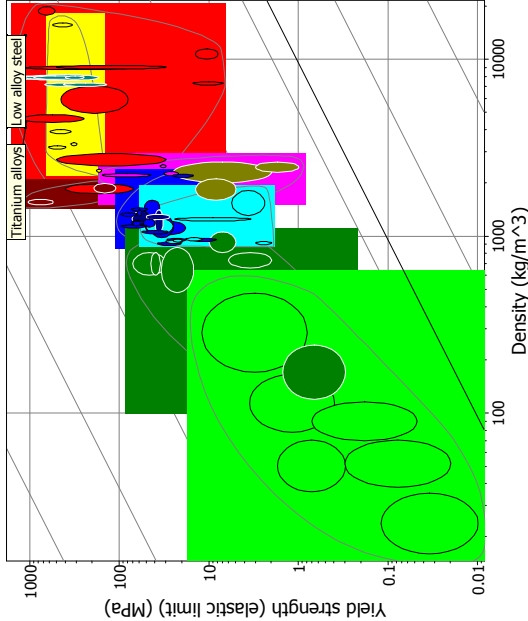
- Matériau
- Section A.

Eliminer A dans (2) avec (1):

Performance I

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

maximiser σ_y/ρ

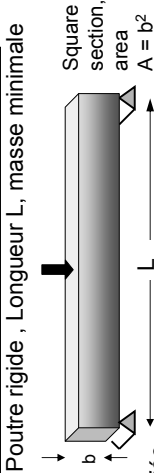


$$M = \left(\frac{\sigma_L}{\rho} \right)$$
$$\log M = \log \sigma_L - \log \rho$$
$$\log \sigma_L = \log M + \log \rho$$

Exemple 2: Poutre légère rigide

Fonction

Poutre



Contraintes

- Longueur L spécifiée
- Rigidité en flexion > S*

Equation pour A:

$$S = \frac{CEI}{L^3} = \frac{CEA^2}{12L^3} \quad (1)$$

Objectif

Minimiser la masse m:

$$m = A L \rho \quad (2)$$

variables

- Matériau
- Section A.

Eliminer A (2) +(1):

Indice de Performance

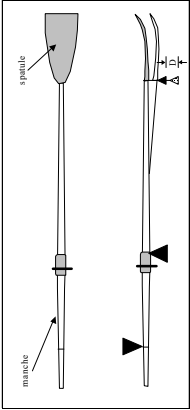
$$m = \left(\frac{12L^5 S^*}{C} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right)$$

Minimiser $\left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right)$

Exemple : la rame



Exemple : rame



Simplification géométrique

Sollicitation principale

flexion

Fonction	Rigidité et solidité
Objectif	Minimiser la masse
Section	
Variable libre	Longueur spécifiée
Astrescines de conception	Rigidité en flexion S spécifiée Résilience supérieure à 140/m² Coût massique < 600 F/kg

$$I = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho}$$

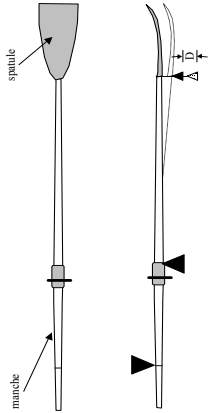
critère dominant

rigidité

$$G_s = \frac{K_s}{E}$$

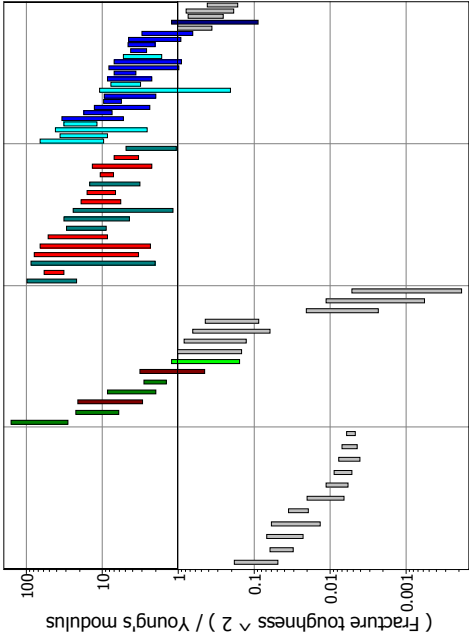
résilience

Exemple : la rame



Fonction	Rigidité et solidité
Objectif	Minimiser la masse
Variable libre	Longueur spécifiée
Astrescines de conception	Rigidité en flexion S spécifiée Résilience supérieure à 140/m² Coût massique < 600 F/kg

Exemple : rame



Verres et céramiques Hybrides Métaux polymères

Exemple : rame

