

Sélection des matériaux pour le prototypage



Loïc TADRIST
Enseignant-chercheur
IUT GMP – Laboratoire ISM UMR 7287

loic.tadrist@univ-amu.fr

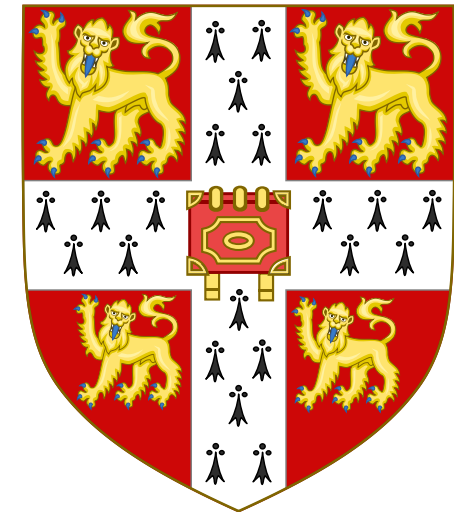
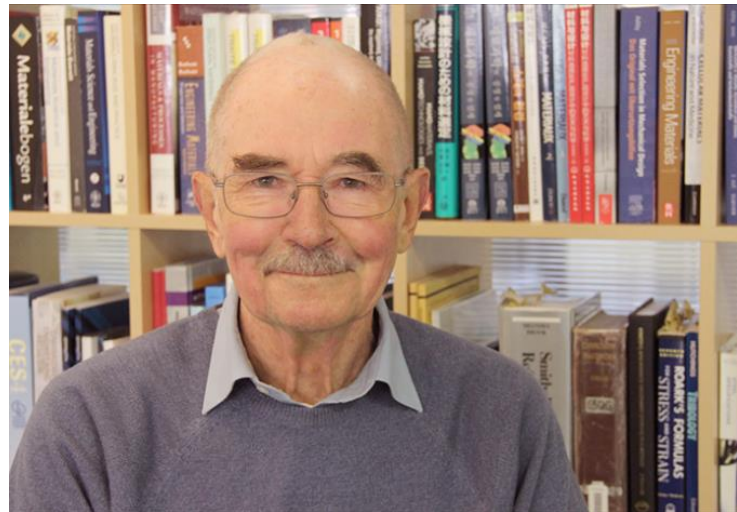
Plan du cours : **SÉLECTION DES MATÉRIAUX POUR LE PROTOTYPAGE**

1. **Outil pour les matériaux : logiciel de recherche et de classification CES GRANTA**
 - Faire un graphique
 - Recherche par contraintes
 - Représentations linéaires et logarithmiques
2. **Histoire des matériaux : de l'âge de pierre à l'âge moderne**
3. **Matériaux purs : Propriétés émergentes**
 - Les états de la matière
 - Lien avec le tableau de Mendeliev
4. **Propriétés mécaniques des matériaux solides**
 - Essai de traction
 - Essai en fatigue
5. **Les grandes classes de matériaux**
 - Métaux / Céramiques / Polymères / Composites / Naturels
6. **Utilisation de la méthode de sélection des matériaux**
7. **Travaux dirigés**

1. Outil pour les matériaux : logiciel de recherche et de classification CES GRANTA

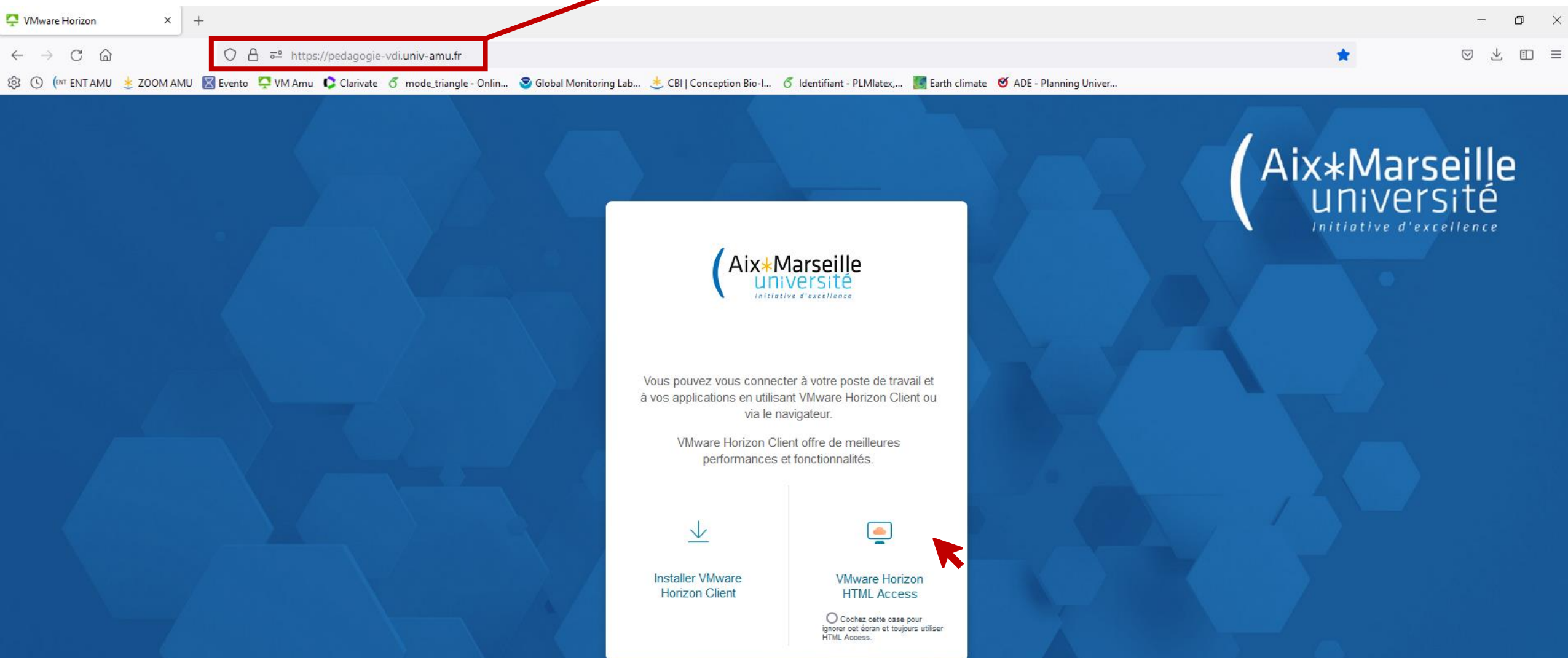
Base de donnée : 80 000 matériaux

Michael F. Ashby



University of Cambridge 

Préliminaire : Découverte du logiciel GRANTA



VMware Horizon

https://pedagogie-vdi.univ-amu.fr

Aix*Marseille
université
Initiative d'excellence

Aix*Marseille
université
Initiative d'excellence

Vous pouvez vous connecter à votre poste de travail et
à vos applications en utilisant VMware Horizon Client ou
via le navigateur.

VMware Horizon Client offre de meilleures
performances et fonctionnalités.

↓

Installer VMware
Horizon Client

VMware Horizon
HTML Access

☐ Cochez cette case pour
ignorer cet écran et toujours utiliser
HTML Access.

Préliminaire : Découverte du logiciel GRANTA



The screenshot shows a login window for Aix*Marseille Université. At the top center is the university logo with the tagline "Initiative d'excellence". In the top right corner, there is a gear icon and a partially visible button labeled "Param". The login form consists of three input fields: "Nom d'utilisateur", "Mot de passe", and "SALSA" (which has a dropdown arrow). Below these fields is a green "Connexion" button. At the bottom center is a link labeled "Annuler".


Initiative d'excellence

Param

Nom d'utilisateur

Mot de passe

SALSA

Connexion

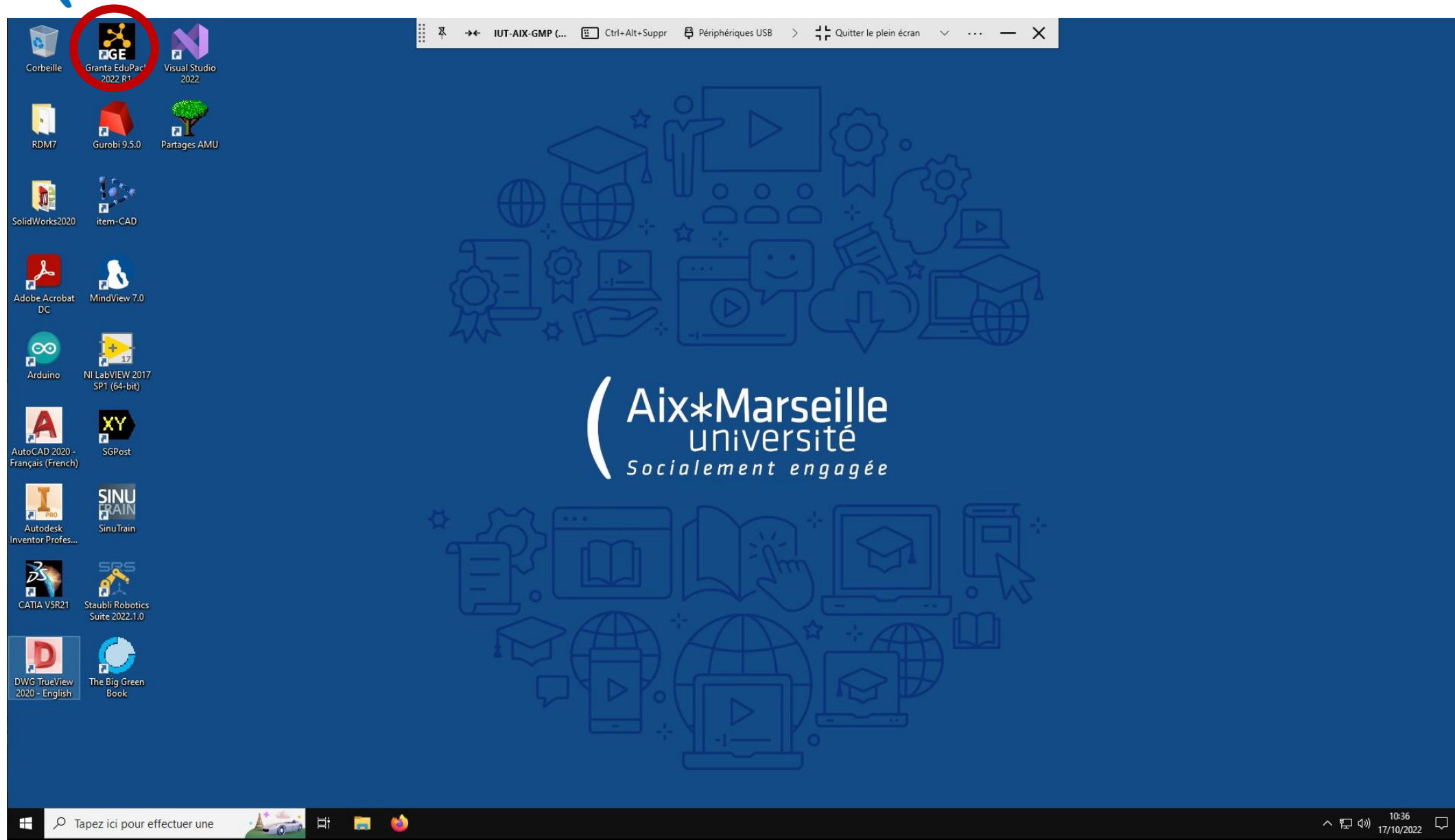
Annuler



Institut Universitaire
de Technologie

Aix*Marseille Université

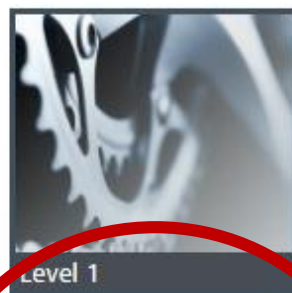
INNOVATION



[Bien démarrer](#) [★ Nouveautés](#) [+ Ajouter une base de données](#)

Bases de données

Introduction



Level 1



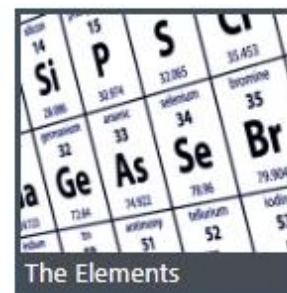
Niveau 1



Level 2 Bioengineering



Level 2 Sustainability



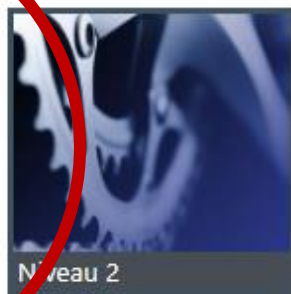
The Elements



Materials
Engine



Level 2



Niveau 2



Medical Devices



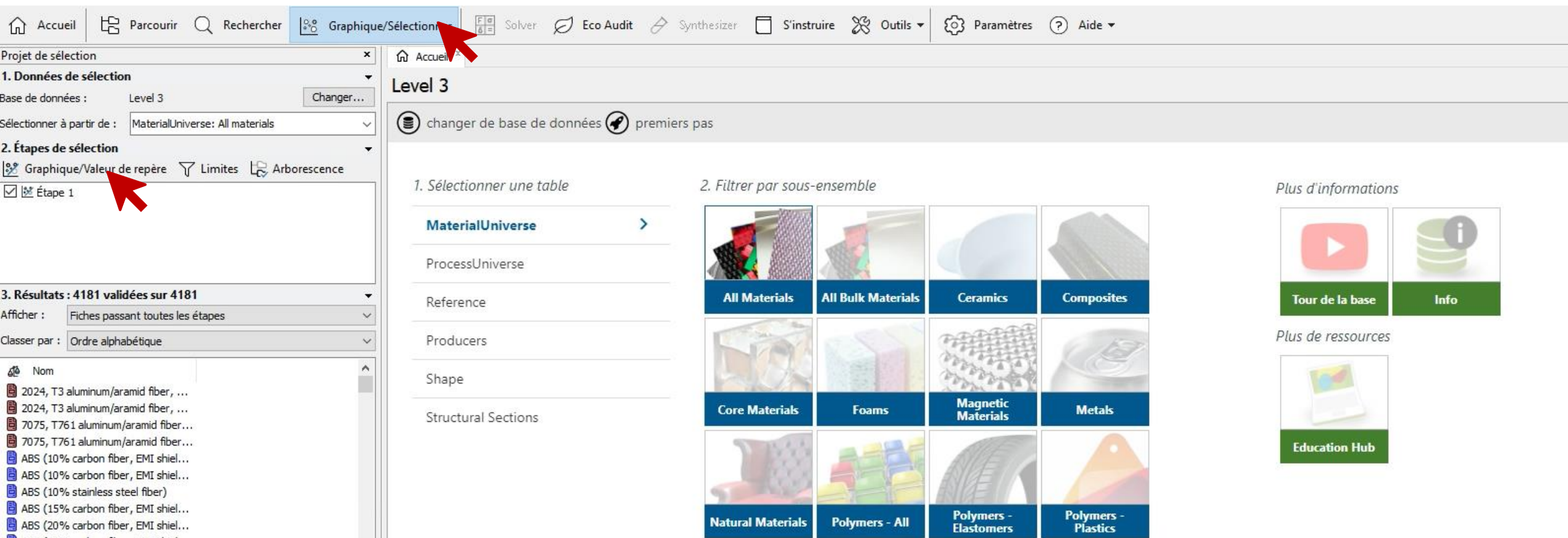
Built Environment



Design

Utilisation du logiciel : faire un graphique

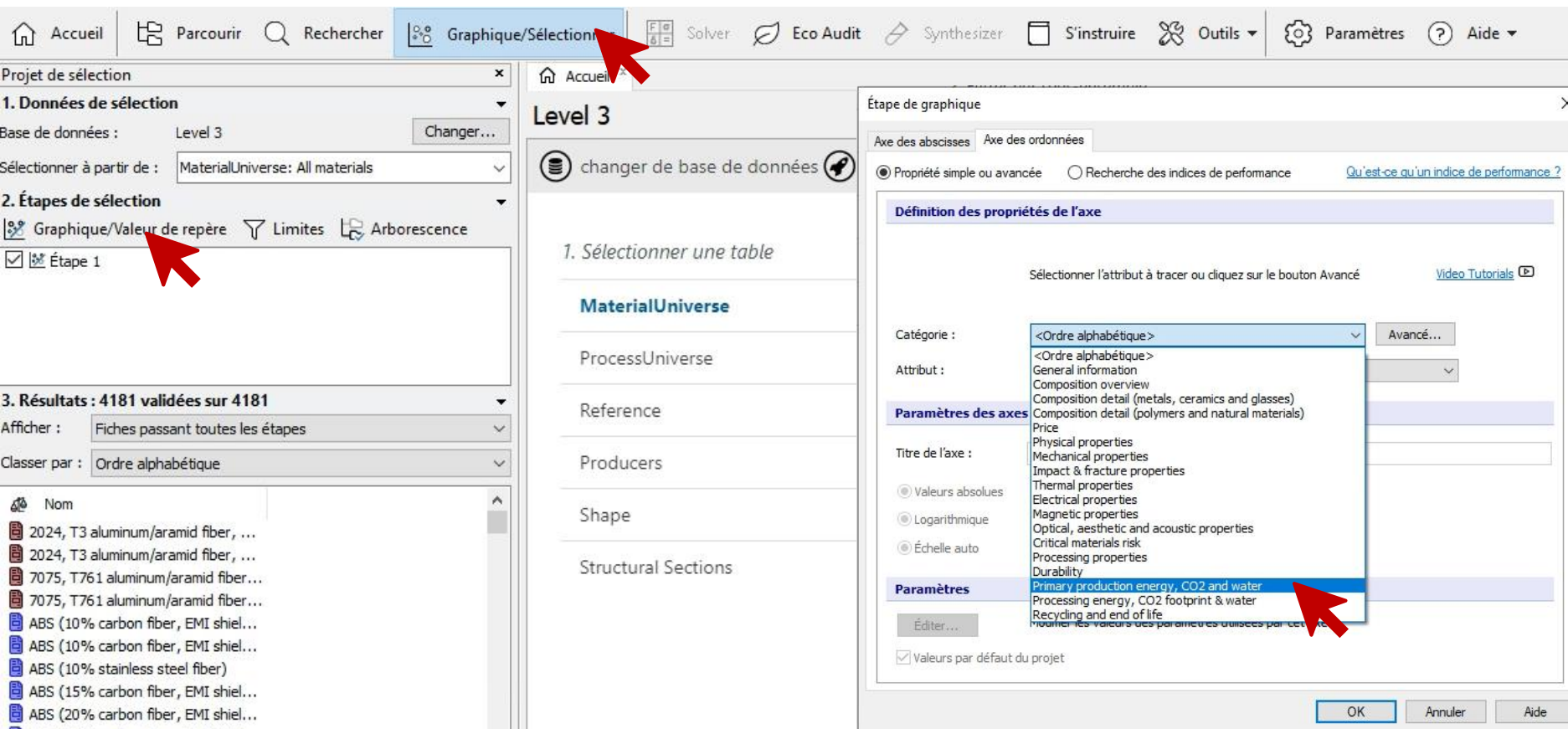
Exemple : Quel matériaux est le plus polluant à produire ?



The screenshot displays the MaterialUniverse software interface. The top navigation bar includes icons for Accueil, Parcourir, Rechercher, Graphique/Sélection (highlighted with a red arrow), Solver, Eco Audit, Synthesizer, S'instruire, Outils, Paramètres, and Aide. The left sidebar shows the 'Projet de sélection' section with '1. Données de sélection' (Base de données: Level 3, Sélectionner à partir de: MaterialUniverse: All materials) and '2. Étapes de sélection' (Graphique/Valeur de repère, Limites, Arborescence, with 'Étape 1' checked and highlighted by a red arrow). The main area is titled 'Level 3' and contains a 'changer de base de données' button and a 'premiers pas' link. Below this, there are two sections: '1. Sélectionner une table' (listing MaterialUniverse, ProcessUniverse, Reference, Producers, Shape, and Structural Sections) and '2. Filtrer par sous-ensemble' (a grid of material categories: All Materials, All Bulk Materials, Ceramics, Composites, Core Materials, Foams, Magnetic Materials, Metals, Natural Materials, Polymers - All, Polymers - Elastomers, and Polymers - Plastics). On the right, there are links for 'Plus d'informations' (Tour de la base, Info) and 'Plus de ressources' (Education Hub).

Utilisation du logiciel : faire un graphique

Exemple : Quel matériaux est le plus polluant à produire ?



The screenshot displays the software interface for creating a graph. The main menu bar includes 'Accueil', 'Parcourir', 'Rechercher', 'Graphique/Sélection', 'Solveur', 'Eco Audit', 'Synthesizer', 'S'instruire', 'Outils', 'Paramètres', and 'Aide'. The 'Graphique/Sélection' menu is highlighted, and a red arrow points to it. Below the menu bar, the 'Projet de sélection' panel shows '1. Données de sélection' with 'Level 3' as the base of data and 'MaterialUniverse: All materials' as the selection source. The '2. Étapes de sélection' panel shows 'Graphique/Valeur de repère' and 'Étape 1' selected. The '3. Résultats : 4181 validées sur 4181' panel shows a list of materials. The 'Étape de graphique' dialog box is open, showing the 'Définition des propriétés de l'axe' section. The 'Catégorie' dropdown is set to '<Ordre alphabétique>' and the 'Attribut' dropdown is set to 'Primary production energy, CO2 and water'. A red arrow points to the 'Primary production energy, CO2 and water' option in the 'Attribut' dropdown. The 'Paramètres' section is also visible, with 'Valeurs par défaut du projet' checked.

Plus d'informations

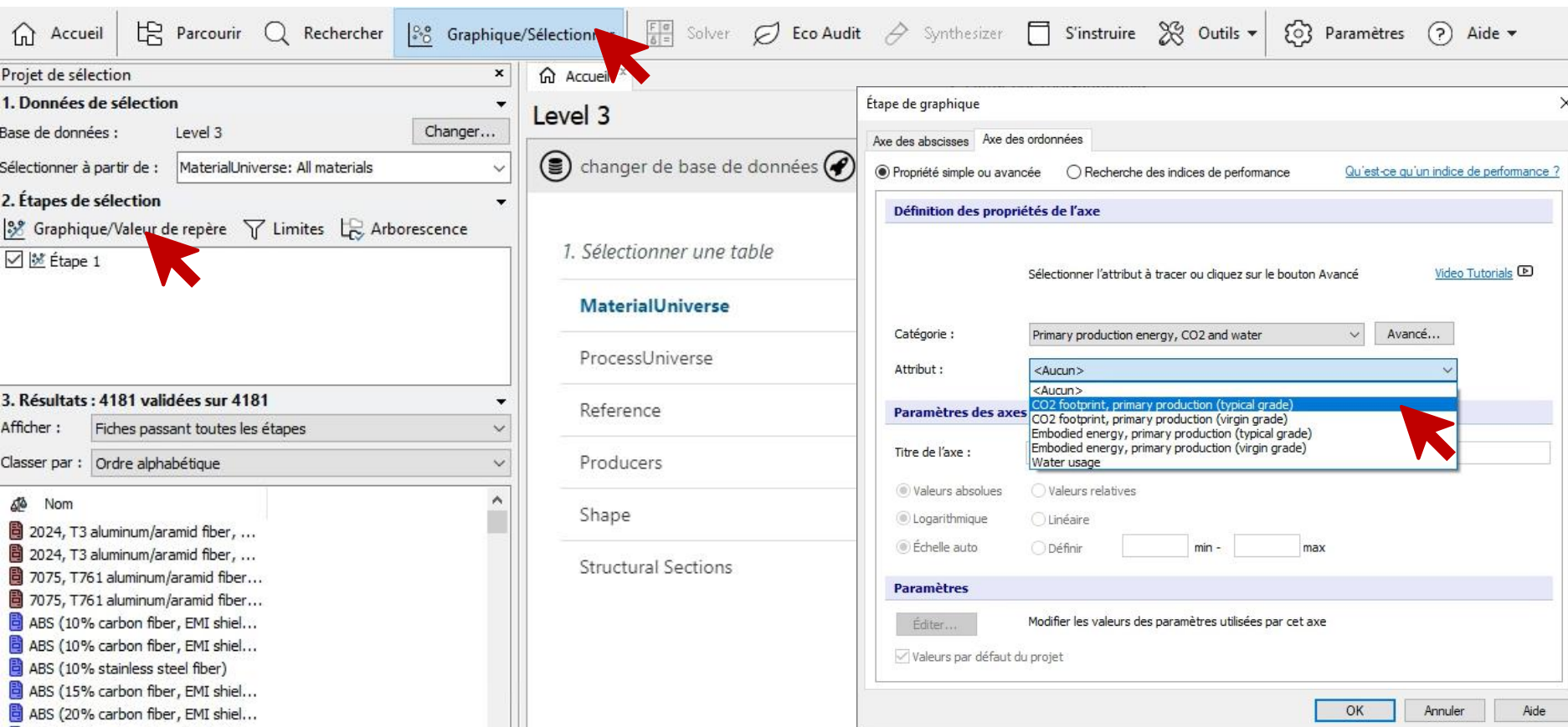


Plus de ressources



Utilisation du logiciel : faire un graphique

Exemple : Quel matériaux est le plus polluant à produire ?



The screenshot displays the software interface for creating a graph. The main menu bar includes options like 'Accueil', 'Parcourir', 'Rechercher', 'Graphique/Sélection', 'Solver', 'Eco Audit', 'Synthesizer', 'S'instruire', 'Outils', 'Paramètres', and 'Aide'. The 'Graphique/Sélection' menu is highlighted, and a red arrow points to it.

The 'Étape de graphique' dialog box is open, showing the 'Axe des ordonnées' (Y-axis) tab. The 'Définition des propriétés de l'axe' section is active, with the 'Catégorie' set to 'Primary production energy, CO2 and water' and the 'Attribut' set to 'CO2 footprint, primary production (typical grade)'. A red arrow points to the 'Attribut' dropdown menu.

The 'Paramètres des axes' section shows the 'Titre de l'axe' field and the 'Valeurs absolues' radio button selected. The 'Paramètres' section at the bottom has the 'Valeurs par défaut du projet' checkbox checked.

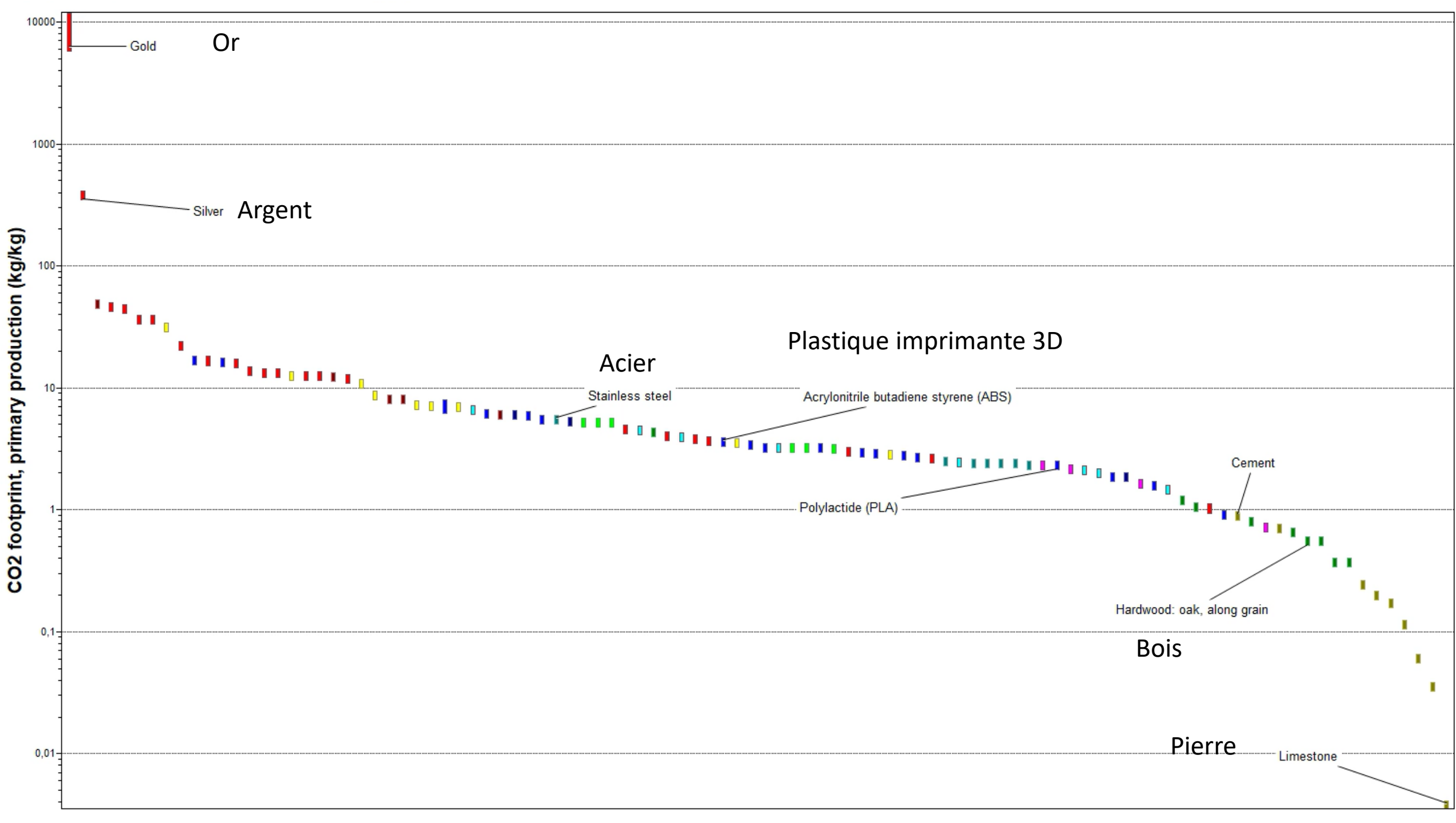
On the left side, the 'Projet de sélection' panel shows '1. Données de sélection' with 'Base de données : Level 3' and 'Sélectionner à partir de : MaterialUniverse: All materials'. The '2. Étapes de sélection' panel shows 'Graphique/Valeur de repère' and 'Étape 1' selected. The '3. Résultats : 4181 validées sur 4181' panel shows a list of materials.

Plus d'informations



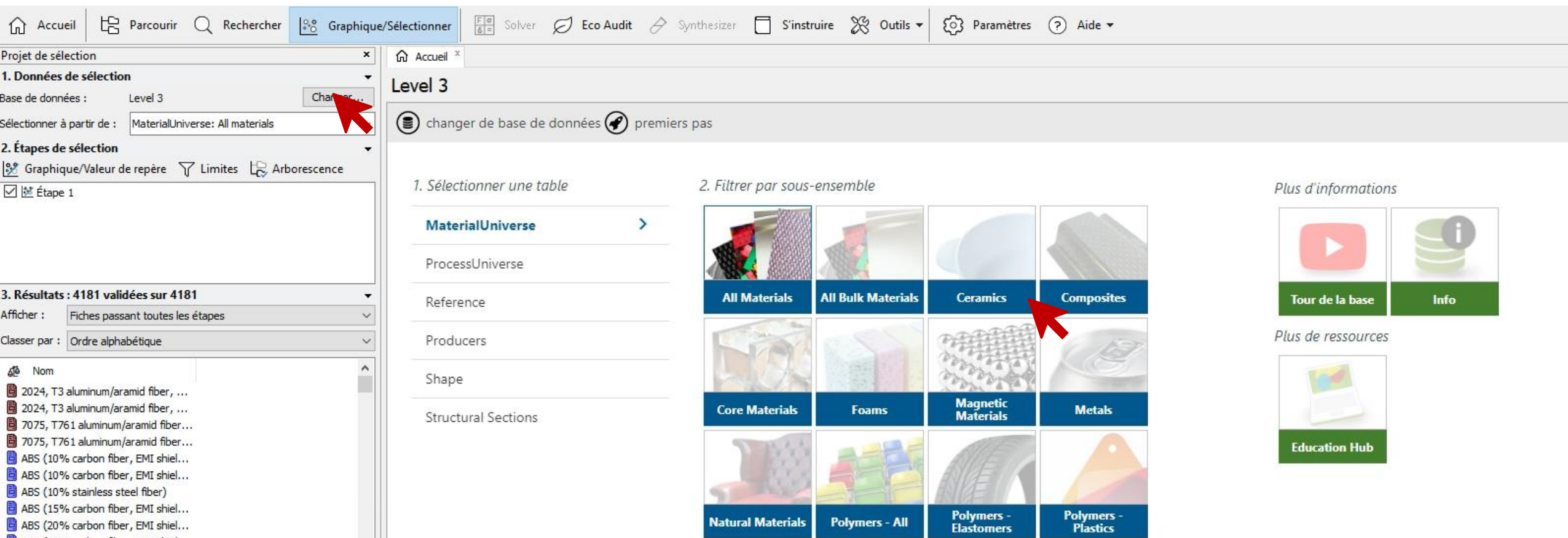
Plus de ressources





Utilisation du logiciel : faire un graphique

Exemple : Quel matériaux est le plus polluant à produire ?



The screenshot displays the MaterialUniverse software interface. The top navigation bar includes icons for Accueil, Parcourir, Rechercher, Graphique/Sélectionner (active), Solver, Eco Audit, Synthesizer, S'instruire, Outils, Paramètres, and Aide. The left sidebar shows the 'Projet de sélection' with three steps: 1. Données de sélection (selected), 2. Étapes de sélection, and 3. Résultats: 4181 validées sur 4181. A red arrow points to the 'Charger...' button in the 'Données de sélection' step. The main area is titled 'Level 3' and contains a 'changer de base de données' button and a 'premiers pas' link. Below this, there are two sections: '1. Sélectionner une table' with a list of tables (MaterialUniverse, ProcessUniverse, Reference, Producers, Shape, Structural Sections) and '2. Filtrer par sous-ensemble' with a grid of material categories. A red arrow points to the 'Ceramics' category in the grid. The right sidebar contains links for 'Plus d'informations' (Tour de la base, Info) and 'Plus de ressources' (Education Hub).

1. Données de sélection

Base de données : Level 3

Sélectionner à partir de : MaterialUniverse: All materials

2. Étapes de sélection

Graphique/Valeur de repère Limites Arborescence

☒ Étape 1

3. Résultats : 4181 validées sur 4181

Afficher : Fiches passant toutes les étapes

Classer par : Ordre alphabétique

Level 3

changer de base de données premiers pas

1. Sélectionner une table

- MaterialUniverse
- ProcessUniverse
- Reference
- Producers
- Shape
- Structural Sections

2. Filtrer par sous-ensemble

- All Materials
- All Bulk Materials
- Ceramics
- Composites
- Core Materials
- Foams
- Magnetic Materials
- Metals
- Natural Materials
- Polymers - All
- Polymers - Elastomers
- Polymers - Plastics

Plus d'informations

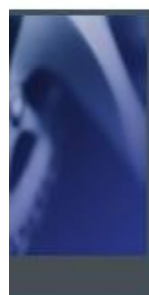
- Tour de la base
- Info

Plus de ressources

- Education Hub

 Bien démarrer  Nouveautés  Ajouter une base de données

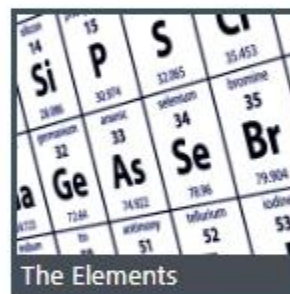
données



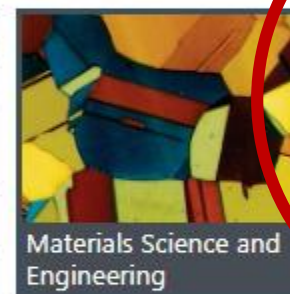
Level 2 Bioengineering



Level 2 Sustainability

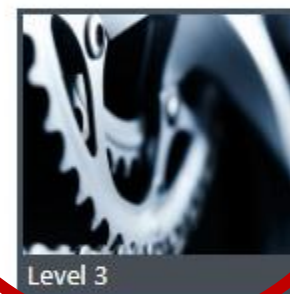


The Elements



Materials Science and
Engineering

Avancé



Level 3



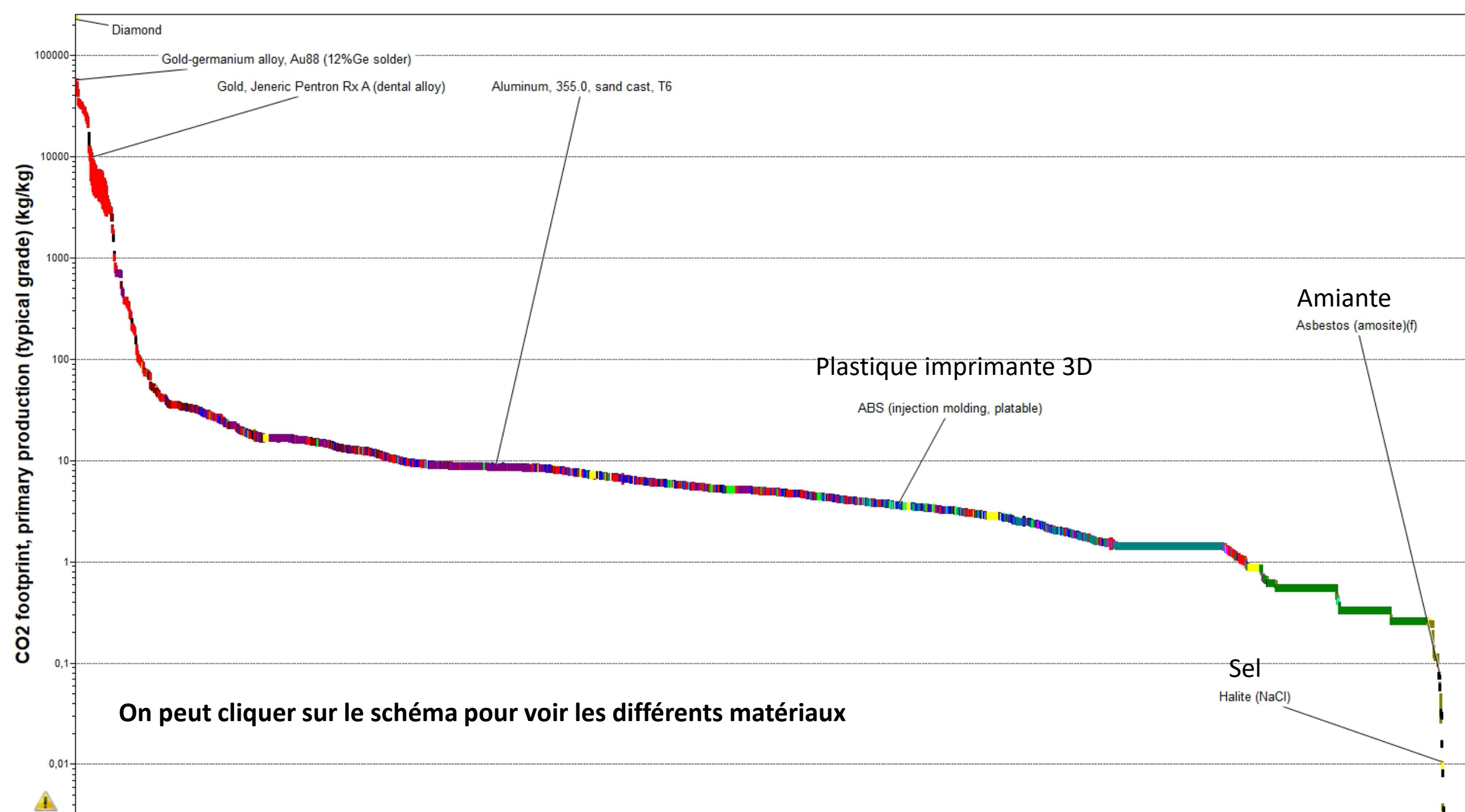
Medical Devices



Built Environment



Design



Raffiner selon les types de matériau

Projet de sélection

1. Données de sélection

Base de données : Level 2 Changer...

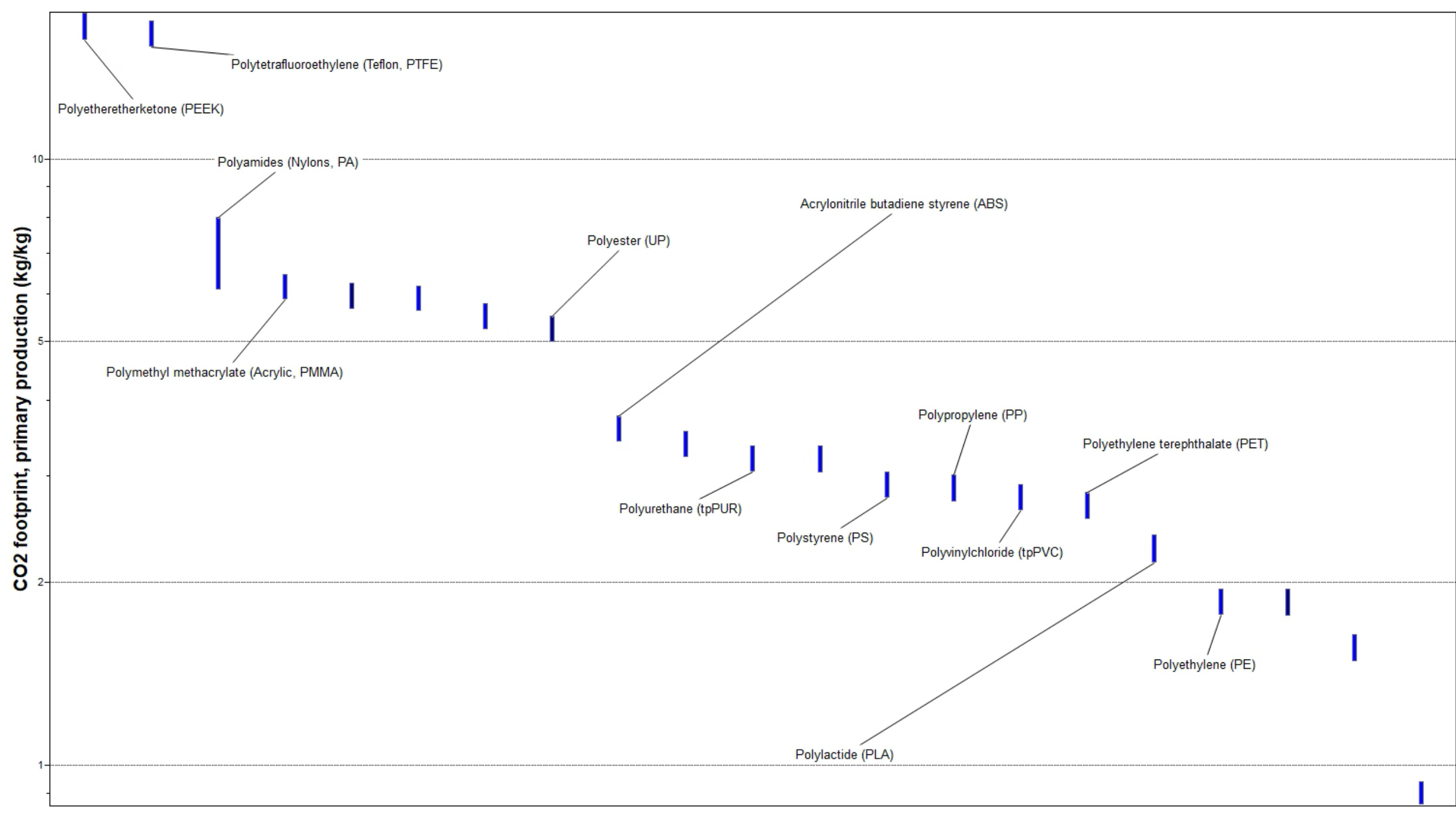
Sélectionner à partir de : MaterialUniverse: Polymers

2. Étapes de sélection

☒ Graphique/Valeur de repère ☐ Limites ☐ Arborescence

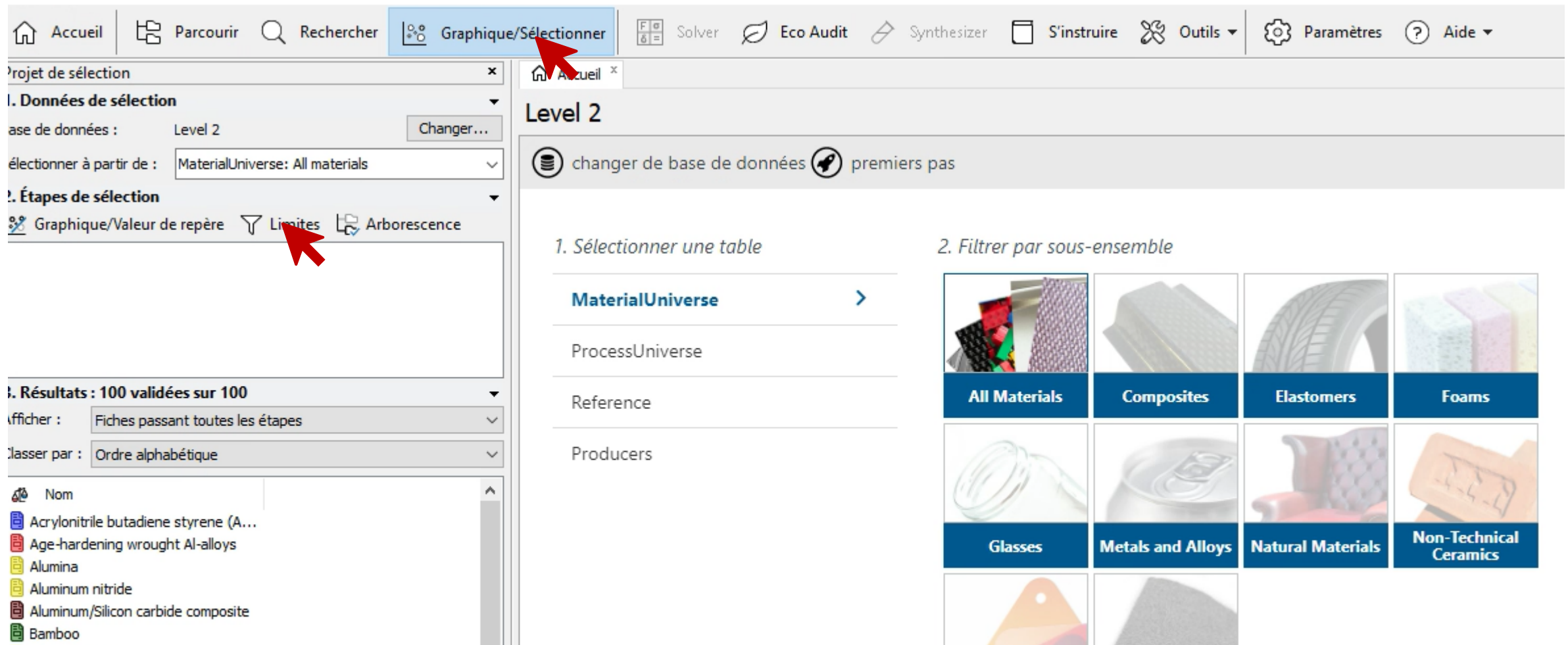
☒ Étape 1

☒ Étape 2: CO2 footprint, primary production (kg/kg)



Utilisation du logiciel : recherche par contraintes

On recherche un matériau avec : $E > 100$ GPa de densité supérieure à 3000 kg/m^3 , et qui soit conducteur.



The screenshot displays the MaterialUniverse software interface. The top navigation bar includes tabs for Accueil, Parcourir, Rechercher, Graphique/Sélectionner (highlighted with a red arrow), Solver, Eco Audit, Synthesizer, S'instruire, Outils, Paramètres, and Aide. The left sidebar shows the 'Projet de sélection' section with 'Level 2' as the data base. Below this, the 'Étapes de sélection' section shows 'Graphique/Valeur de repère', 'Limites' (highlighted with a red arrow), and 'Arborescence'. The 'Résultats' section indicates '100 validées sur 100' and shows a list of materials including Acrylonitrile butadiene styrene (A...), Age-hardening wrought Al-alloys, Alumina, Aluminum nitride, Aluminum/Silicon carbide composite, and Bamboo.

The main workspace is titled 'Level 2' and contains two sections: '1. Sélectionner une table' and '2. Filtrer par sous-ensemble'. The 'Sélectionner une table' section lists 'MaterialUniverse' (highlighted with a blue bar and a right arrow), 'ProcessUniverse', 'Reference', and 'Producers'. The 'Filtrer par sous-ensemble' section displays a grid of material categories with corresponding images: All Materials, Composites, Elastomers, Foams, Glasses, Metals and Alloys, Natural Materials, and Non-Technical Ceramics.

Utilisation du logiciel : recherche par contraintes

On recherche un matériau avec : $E > 100$ GPa de densité supérieure à 3000 kg/m^3 , et qui soit conducteur.

1. Données de sélection

Base de données : Level 2 Changer...

Sélectionner à partir de : MaterialUniverse: All materials

2. Étapes de sélection

Graphique Valeur de repère Limites Arborescence

☒ Étape 1: Limites

3. Résultats : 100 validées sur 100

Afficher : Fiches passant toutes les étapes

Classer par : Ordre alphabétique

- Nom
- Acrylonitrile butadiene styrene (A...
- Age-hardening wrought Al-alloys
- Alumina
- Aluminum nitride
- Aluminum/Silicon carbide composite
- Bamboo
- Boron carbide
- Borosilicate glass
- Brass
- Brick
- Bronze
- Butyl rubber (IIR)
- Carbon black reinforced styrene b...
- Cast Al-alloys
- Cast iron, ductile (nodular)
- Cast iron, gray
- Cast magnesium alloys
- Cellulose polymers (CA)
- Cement
- Ceramic foam
- CFRP, epoxy matrix (isotropic)
- Commercially pure lead
- Commercially pure titanium

Limites

Paramètres Appliquer Effacer

[Impossible de trouver la propriété recherchée ?](#)

General properties

	Minimum	Maximum	
Density	<input type="text" value="3000"/>	<input type="text"/>	kg/m ³
Price	<input type="text"/>	<input type="text"/>	EUR/kg
Date first used	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

Mechanical properties

	Minimum	Maximum	
Young's modulus	<input type="text" value="100"/>	<input type="text"/>	GPa
Shear modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Bulk modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Poisson's ratio	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Yield strength (elastic limit)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Tensile strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Compressive strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Elongation	<input type="text"/>	<input type="text"/>	% strain
Hardness - Vickers	<input type="text"/>	<input type="text"/>	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Fracture toughness	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

Thermal properties

Electrical properties

	Minimum	Maximum	
Electrical conductor or insulator?	<input type="text" value="Good conductor; Poor conductor"/>		
Electrical resistivity	<input type="text"/>	<input type="text"/>	μohm.cm

Utilisation du logiciel : recherche par contraintes

On recherche un matériau avec : $E > 100$ GPa de densité supérieure à 3000 kg/m^3 , et qui soit conducteur.

Étape de graphique

Axe des abscisses | Axe des ordonnées

☒ Propriété simple ou avancée ☐ Recherche des indices de performance [Qu'est-ce qu'un indice de performance ?](#)

Définition des propriétés de l'axe

Sélectionner l'attribut à tracer ou cliquez sur le bouton Avancé [Video Tutorials](#)

Catégorie : General properties

Attribut : Price

Paramètres des axes

Titre de l'axe : Price (EUR/kg)

☒ Valeurs absolues ☐ Valeurs relatives

☒ Logarithmique ☐ Linéaire

☒ Échelle auto ☐ Définir min - max

Paramètres

Modifier les valeurs des paramètres utilisés par cet axe

Utilisation du logiciel : recherche par contraintes


On recherche un matériau avec : $E > 100$ GPa de densité supérieure à 3000 kg/m^3 , et qui soit conducteur.

Étape de graphique ×

Axe des abscisses Axe des ordonnées

☒ Propriété simple ou avancée ☐ Recherche des indices de performance [Qu'est-ce qu'un indice de performance ?](#)

Définition des propriétés de l'axe

Sélectionner l'attribut à tracer ou cliquez sur le bouton Avancé [Video Tutorials](#) 

Catégorie : Mechanical properties ▼ Avancé...

Attribut : Young's modulus ▼

Paramètres des axes

Titre de l'axe : Young's modulus (GPa)

☒ Valeurs absolues ☐ Valeurs relatives

☒ Logarithmique ☐ Linéaire

☒ Échelle auto ☐ Définir min - max

Paramètres

Éditer Modifier les valeurs des paramètres utilisés par cet axe

Utilisation du logiciel : recherche par contraintes


On recherche un matériau avec : $E > 100$ GPa de densité supérieure à 3000 kg/m^3 , et qui soit conducteur.

Étape de graphique ×

Axe des abscisses Axe des ordonnées

☒ Propriété simple ou avancée ☐ Recherche des indices de performance [Qu'est-ce qu'un indice de performance ?](#)

Définition des propriétés de l'axe

Sélectionner l'attribut à tracer ou cliquez sur le bouton Avancé [Video Tutorials](#) 

Catégorie : Mechanical properties Avancé...

Attribut : Young's modulus

Paramètres des axes

Titre de l'axe : Young's modulus (GPa)

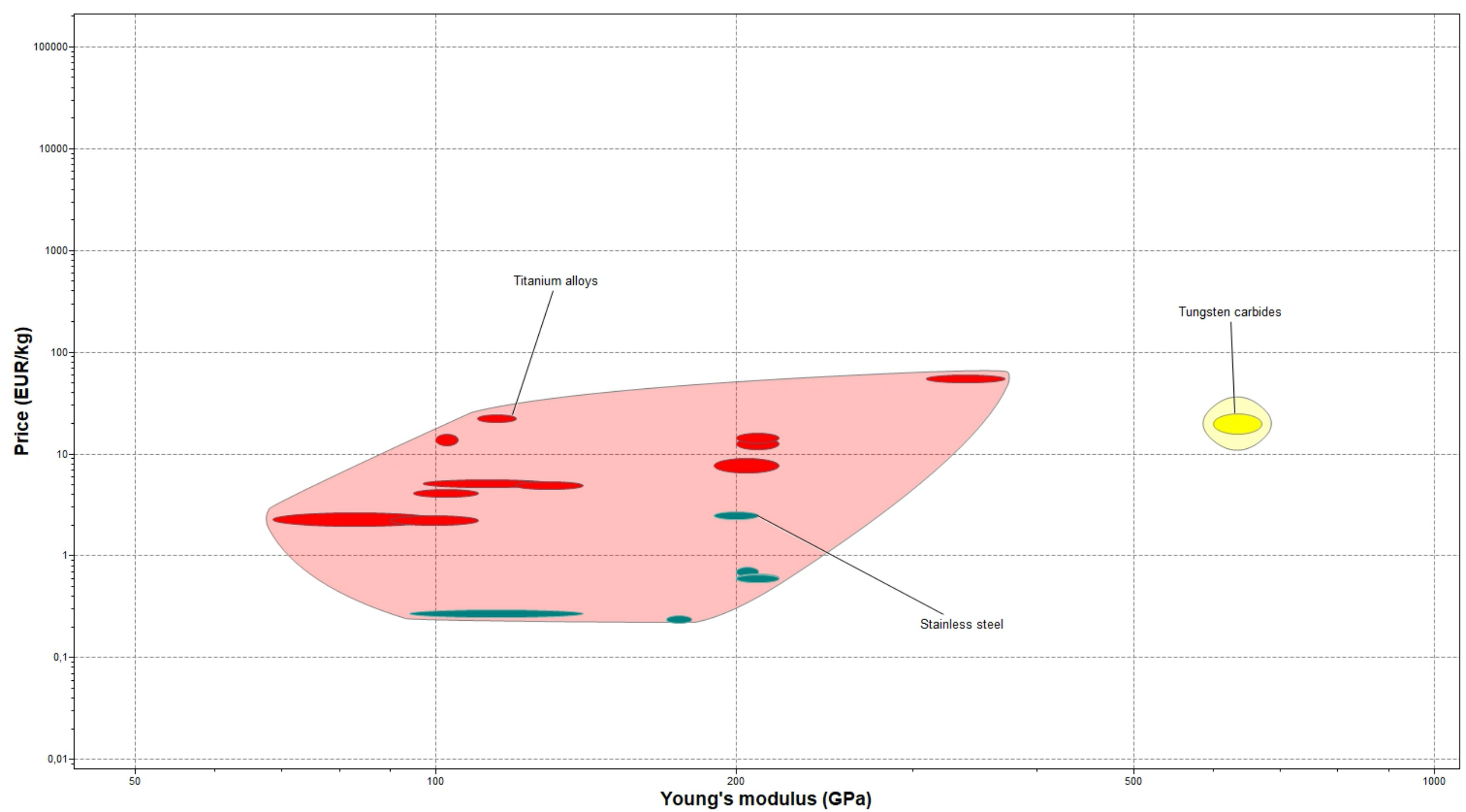
☒ Valeurs absolues ☐ Valeurs relatives

☒ Logarithmique ☐ Linéaire

☒ Échelle auto ☐ Définir min - max

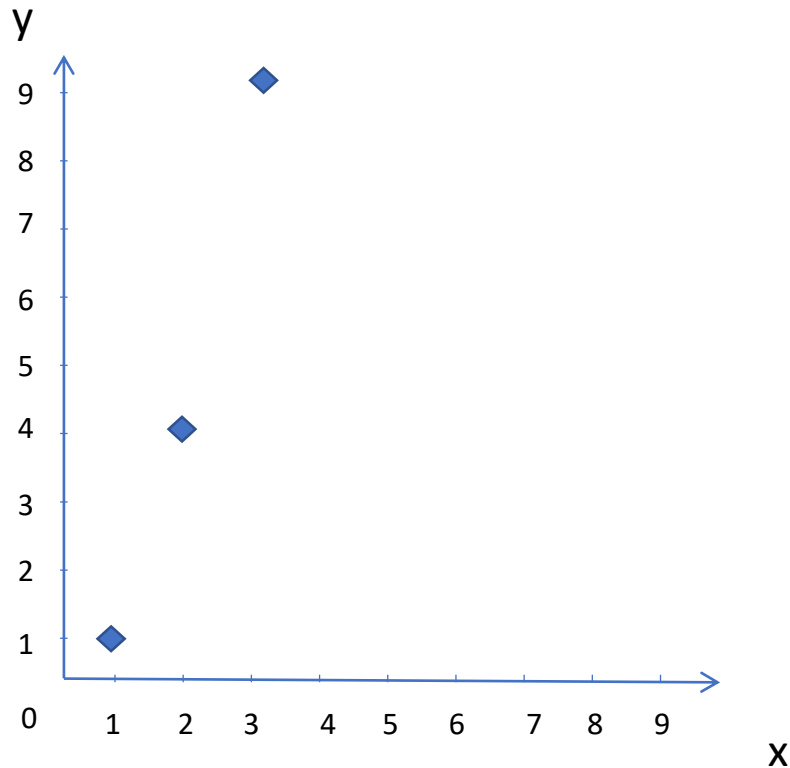
Paramètres

Éditer Modifier les valeurs des paramètres utilisés par cet axe



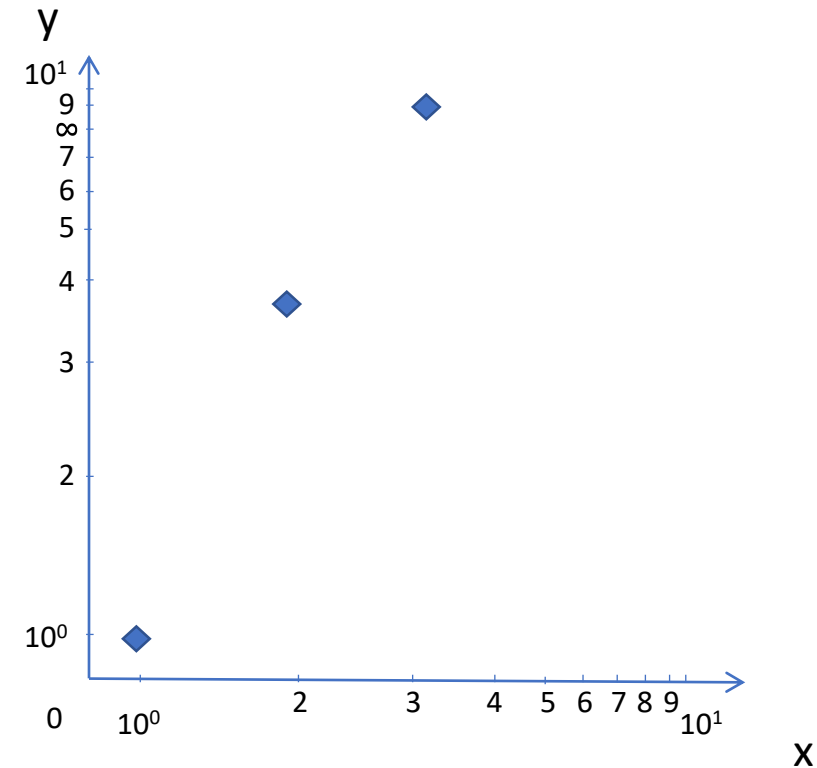
Représentations linéaires et logarithmiques :

Représentation linéaire : $(x,y) : (1,1) ; (2,4) ; (3,9)$



En représentation linéaire l'écart entre les nombres est conservé

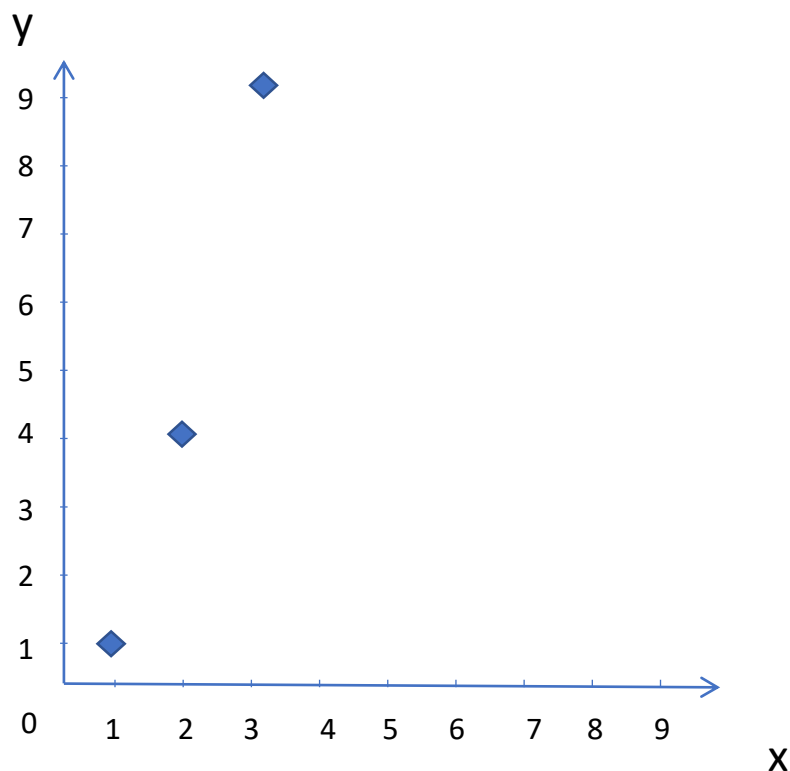
Représentation logarithmique :



En représentation logarithmique l'écart entre les nombres n'est pas conservé. C'est l'écart entre les logarithmes qui est conservé !

Représentations linéaires et logarithmiques :

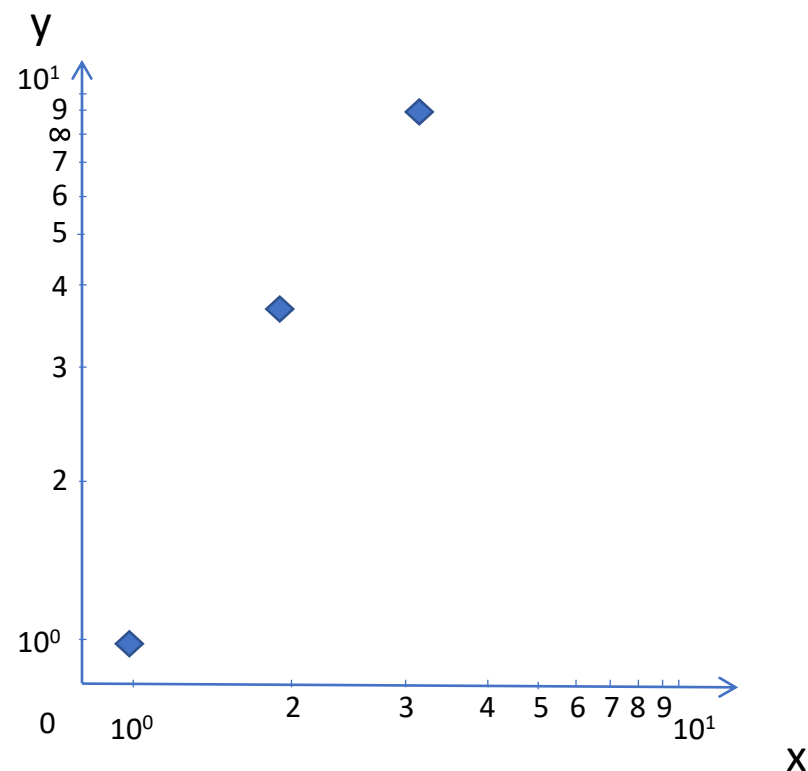
Représentation linéaire : $(x,y) : (1,1) ; (2,4) ; (3,9)$



Comment
passer de l'une
à l'autre ?



Représentation logarithmique :

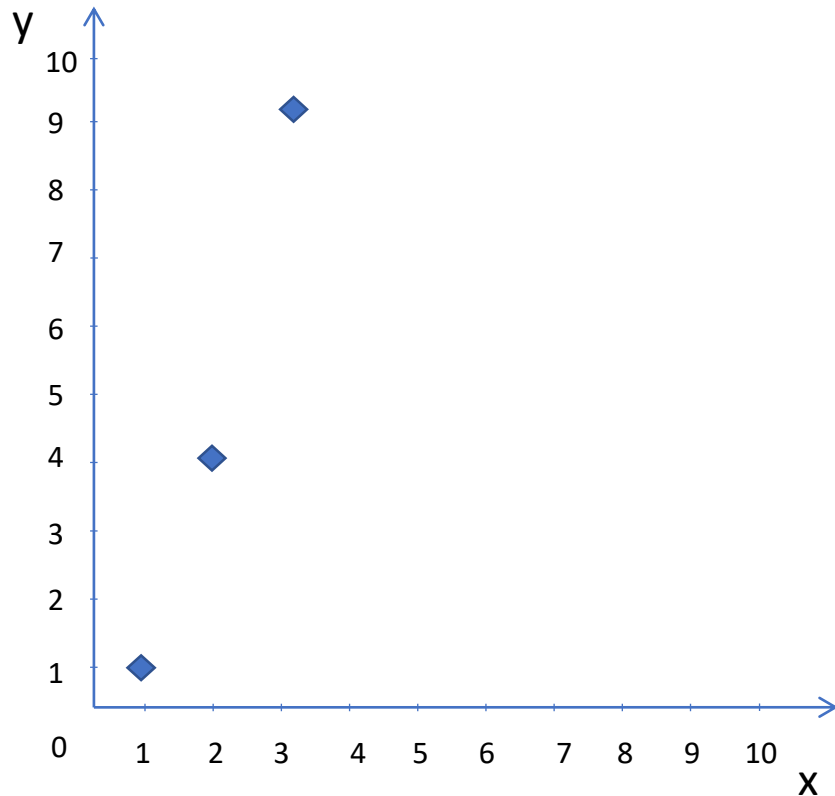


En représentation linéaire l'écart entre les nombres est conservé

En représentation logarithmique l'écart entre les nombres n'est pas conservé. C'est l'écart entre les logarithmes qui est conservé !

Représentations linéaires et logarithmiques :

Représentation linéaire : $(x,y) : (1,1) ; (2,4) ; (3,9)$



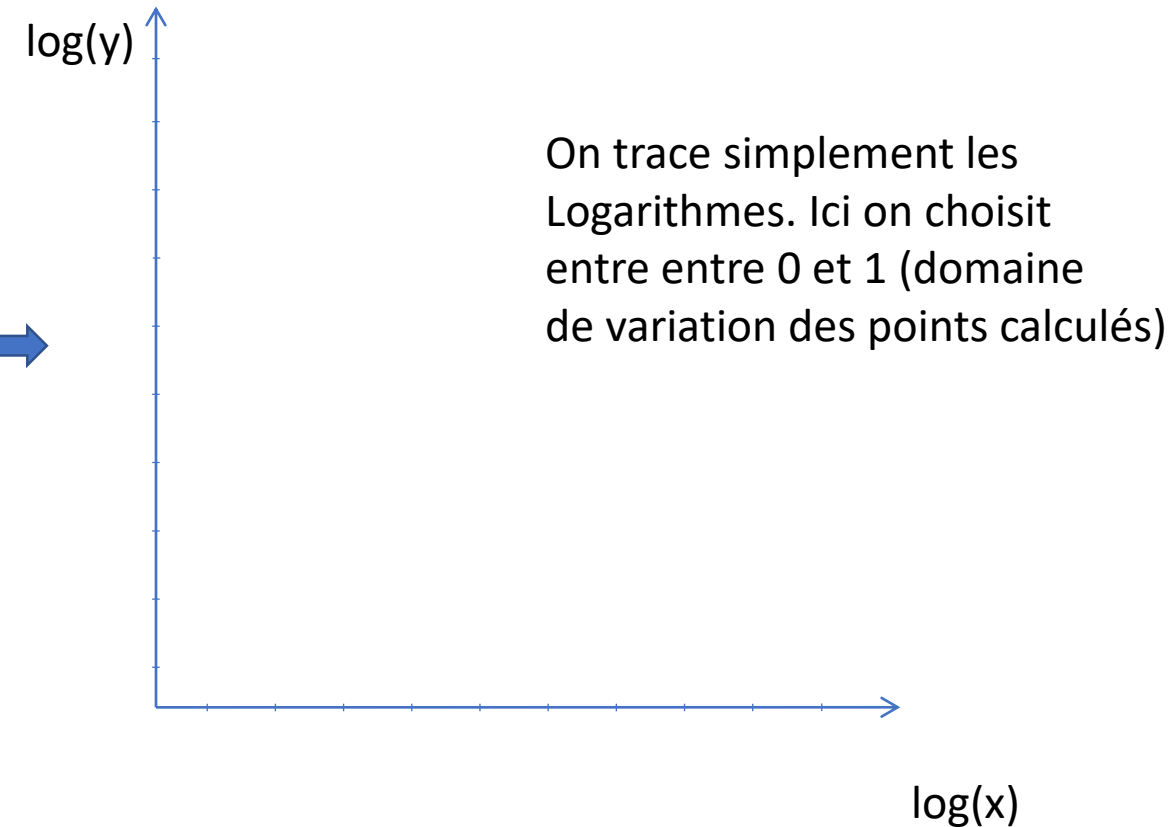
Comment
passer de l'une
à l'autre ?



Étape 1 : On passe tout au logarithme en base 10

$(\log(x), \log(y)) : (\log(1), \log(1)) ; (\log(2), \log(4)) ; (\log(3), \log(9))$

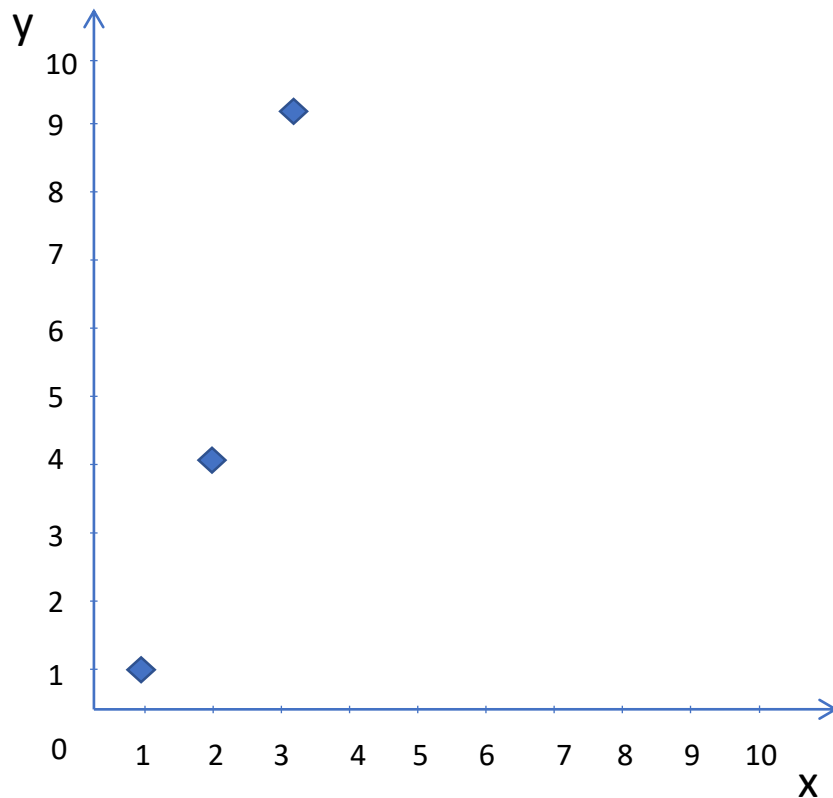
$(\log(x), \log(y)) : (0;0) ; (0,3;0,6) ; (0,47;0,95)$



En représentation linéaire l'écart entre les nombres est conservé

Représentations linéaires et logarithmiques :

Représentation linéaire : $(x,y) : (1,1) ; (2,4) ; (3,9)$



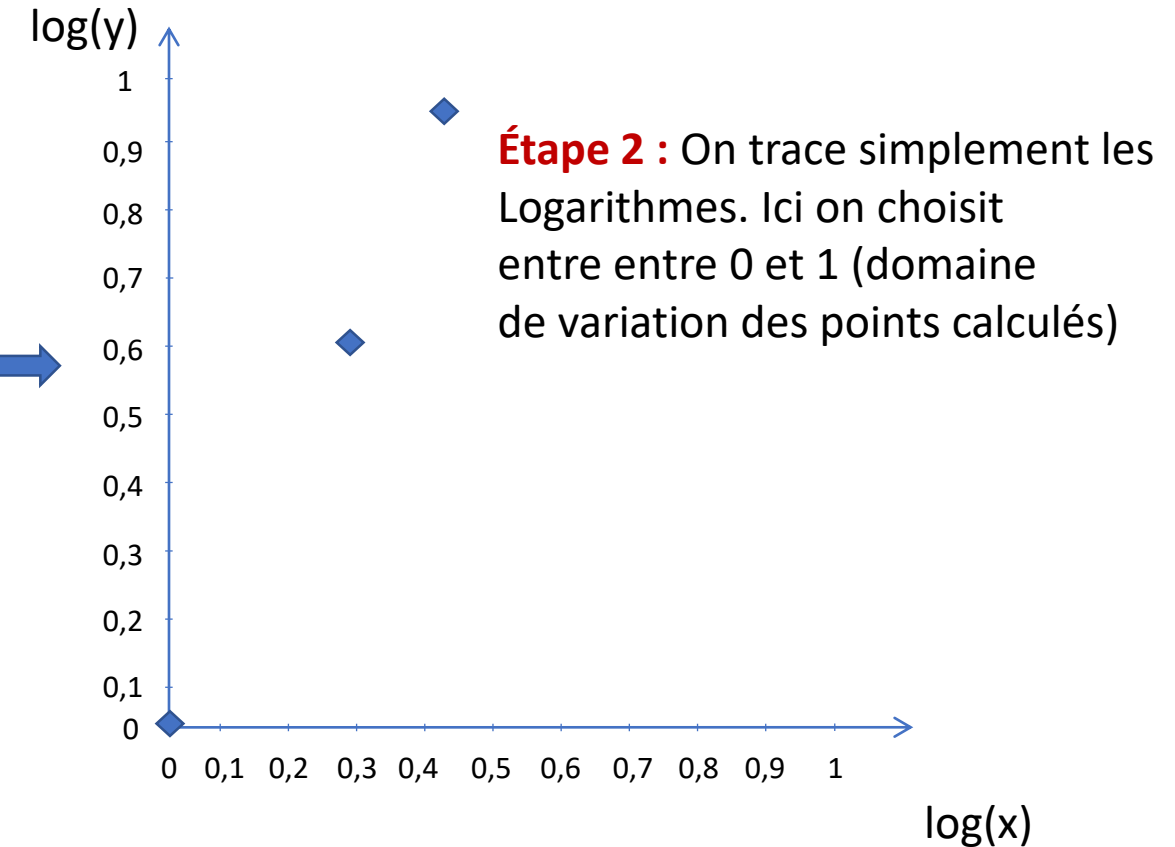
Comment
passer de l'une
à l'autre ?



Étape 1 : On passe tout au logarithme en base 10

$(\log(x), \log(y)) : (\log(1), \log(1)) ; (\log(2), \log(4)) ; (\log(3), \log(9))$

$(\log(x), \log(y)) : (0;0) ; (0,3;0,6) ; (0,47;0,95)$

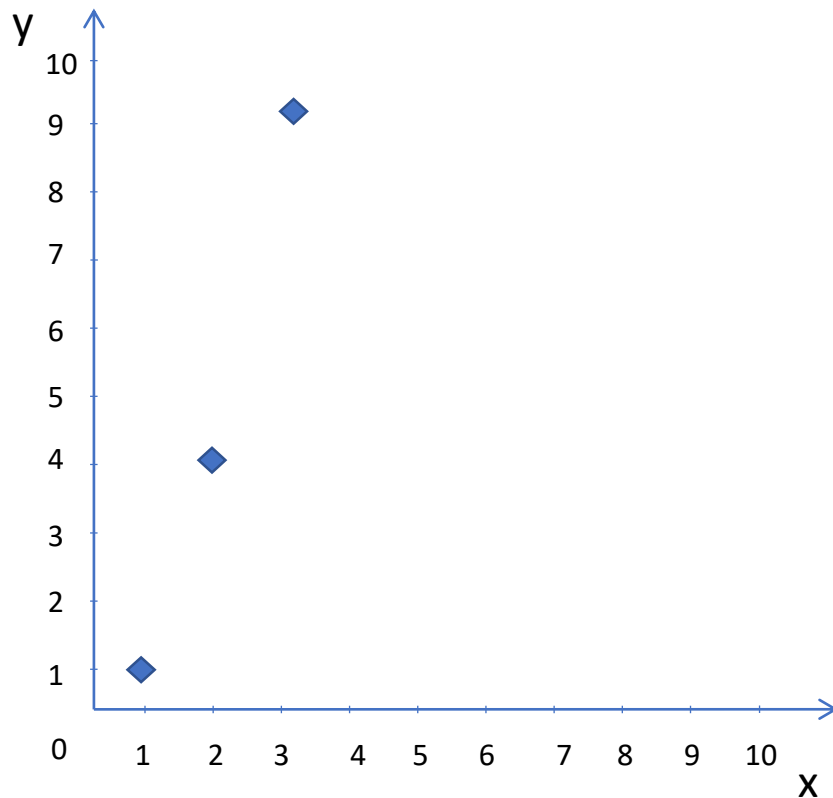


Étape 2 : On trace simplement les Logarithmes. Ici on choisit entre 0 et 1 (domaine de variation des points calculés)

En représentation linéaire l'écart entre les nombres est conservé

Représentations linéaires et logarithmiques :

Représentation linéaire : $(x,y) : (1,1) ; (2,4) ; (3,9)$



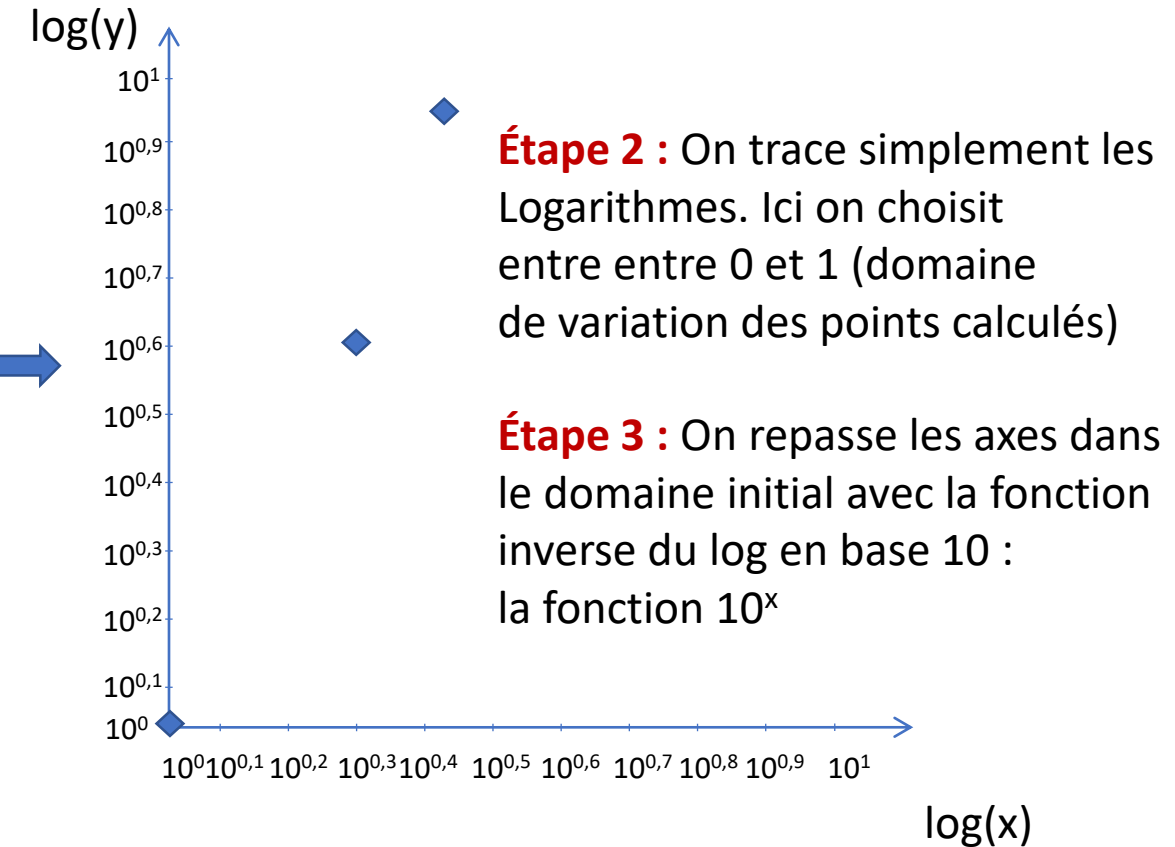
Comment
passer de l'une
à l'autre ?



Étape 1 : On passe tout au logarithme en base 10

$(\log(x), \log(y)) : (\log(1), \log(1)) ; (\log(2), \log(4)) ; (\log(3), \log(9))$

$(\log(x), \log(y)) : (0;0) ; (0,3;0,6) ; (0,47;0,95)$



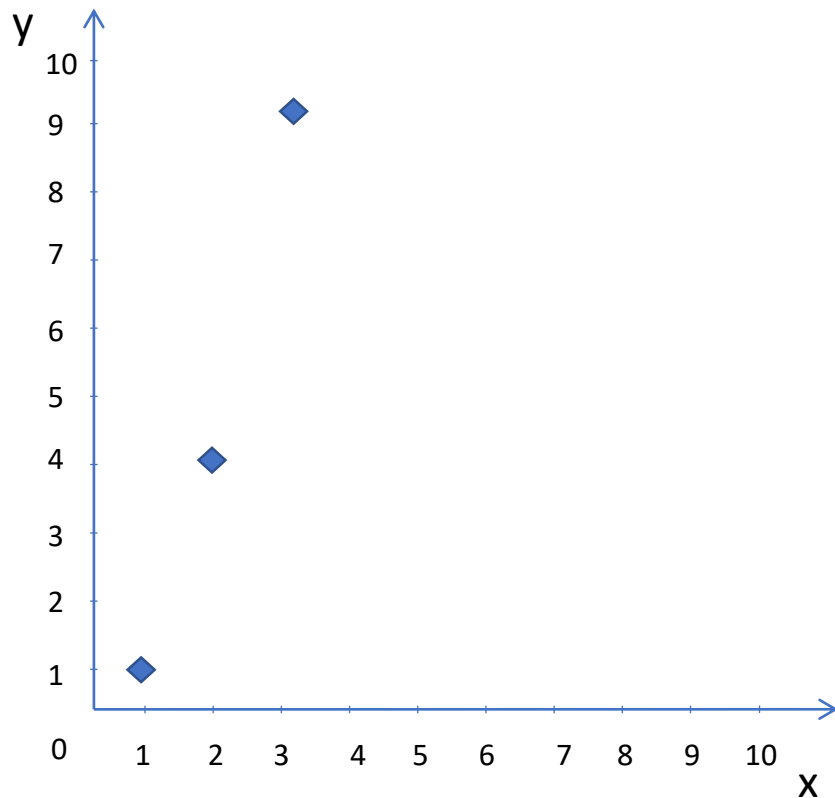
Étape 2 : On trace simplement les Logarithmes. Ici on choisit entre 0 et 1 (domaine de variation des points calculés)

Étape 3 : On repasse les axes dans le domaine initial avec la fonction inverse du log en base 10 : la fonction 10^x

En représentation linéaire l'écart entre les nombres est conservé

Représentations linéaires et logarithmiques :

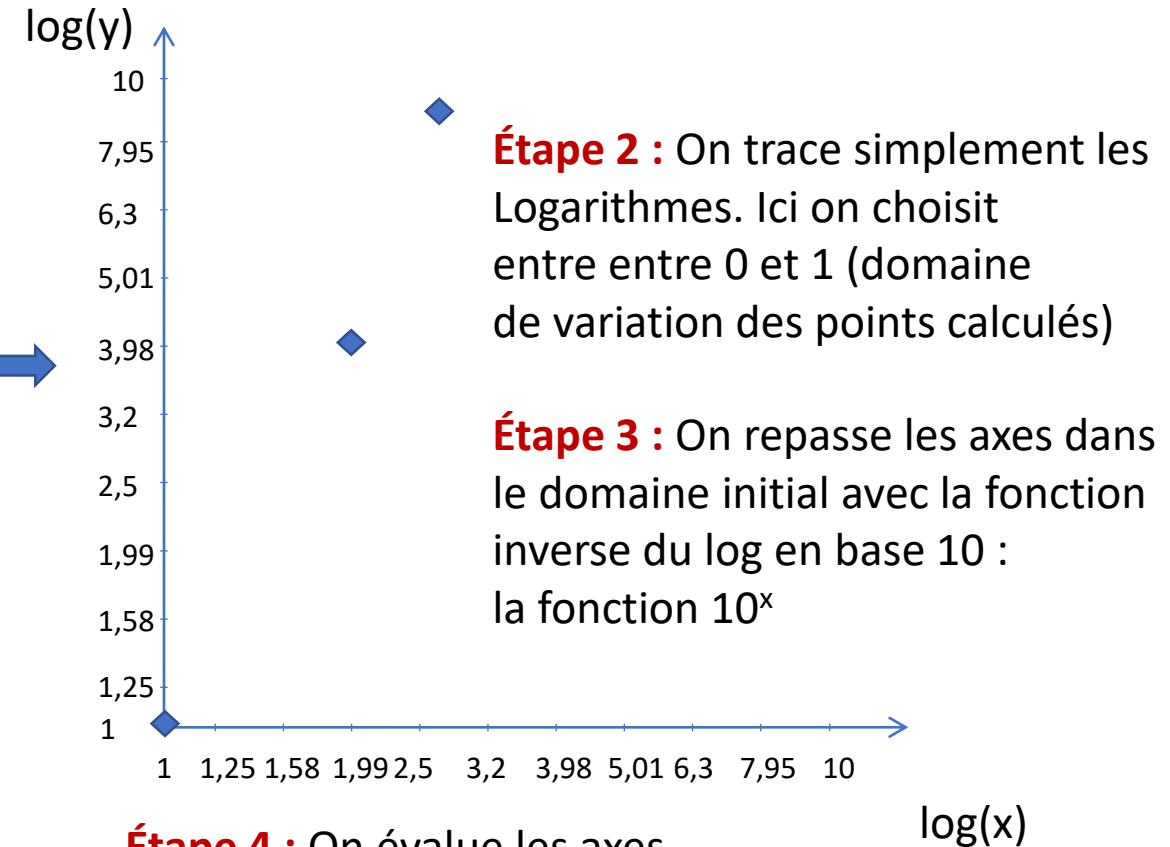
Représentation linéaire : $(x,y) : (1,1) ; (2,4) ; (3,9)$



Comment
passer de l'une
à l'autre ?



Étape 1 : On passe tout au logarithme en base 10
 $(\log(x), \log(y)) : (\log(1), \log(1)) ; (\log(2), \log(4)) ; (\log(3), \log(9))$
 $(\log(x), \log(y)) : (0;0) ; (0,3;0,6) ; (0,47;0,95)$



Étape 2 : On trace simplement les Logarithmes. Ici on choisit entre 0 et 1 (domaine de variation des points calculés)

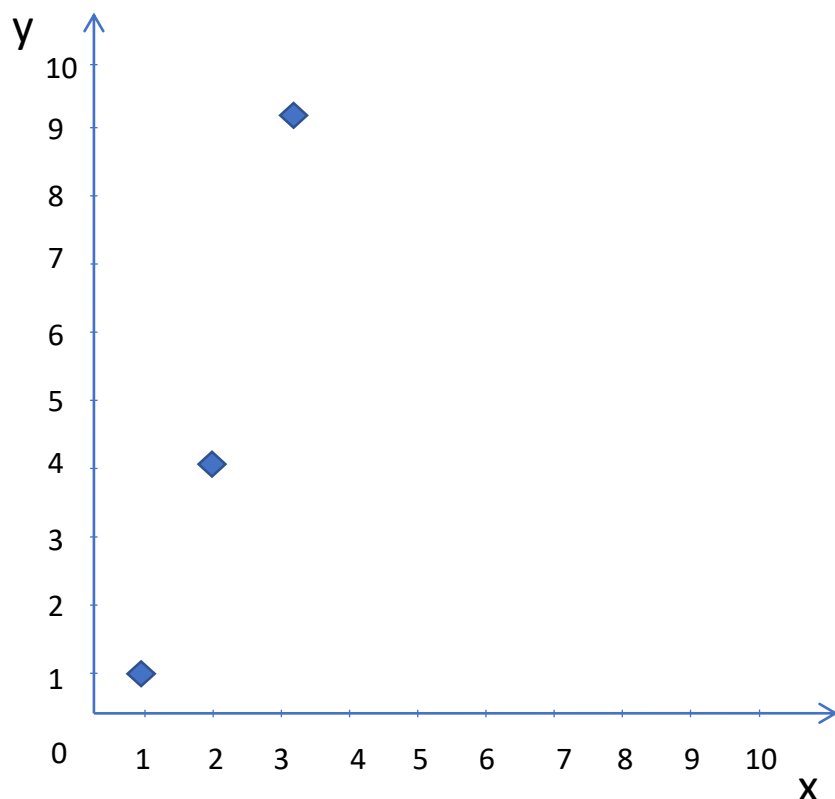
Étape 3 : On repasse les axes dans le domaine initial avec la fonction inverse du log en base 10 : la fonction 10^x

Étape 4 : On évalue les axes.
 $10^0=1; 10^{0,1}=1,25; 10^{0,2}=1,58; 10^{0,3}=2; \dots;$
 $10^{0,9}=7,95; 10^1=10$

En représentation linéaire l'écart entre les nombres est conservé

Représentations linéaires et logarithmiques :

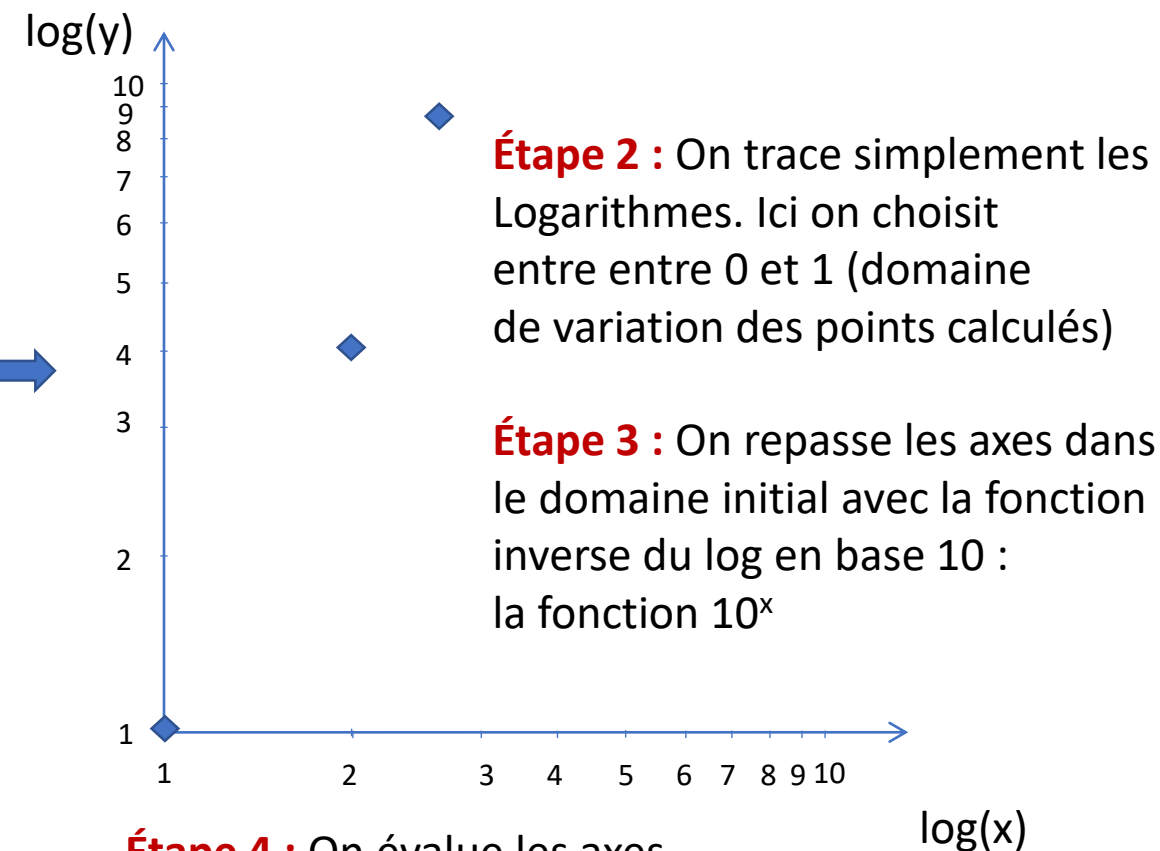
Représentation linéaire : $(x,y) : (1,1) ; (2,4) ; (3,9)$



Comment
passer de l'une
à l'autre ?



Étape 1 : On passe tout au logarithme en base 10
 $(\log(x), \log(y)) : (\log(1), \log(1)) ; (\log(2), \log(4)) ; (\log(3), \log(9))$
 $(\log(x), \log(y)) : (0;0) ; (0,3;0,6) ; (0,47;0,95)$



Étape 2 : On trace simplement les Logarithmes. Ici on choisit entre 0 et 1 (domaine de variation des points calculés)

Étape 3 : On repasse les axes dans le domaine initial avec la fonction inverse du log en base 10 : la fonction 10^x

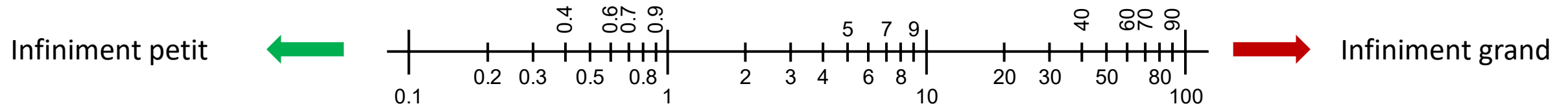
Étape 4 : On évalue les axes.

Étape 5 : On gradue simplement avec des valeurs exactes. $(\log(2), \log(3), \dots, \log(9))$

En représentation linéaire l'écart entre les nombres est conservé

Propriétés des échelles logarithmiques :

- 1) Elles permettent de représenter des points expérimentaux ou des fonctions dont l'amplitude est très grande.
- 2) On ne peut pas représenter des valeurs négatives ou nulles.

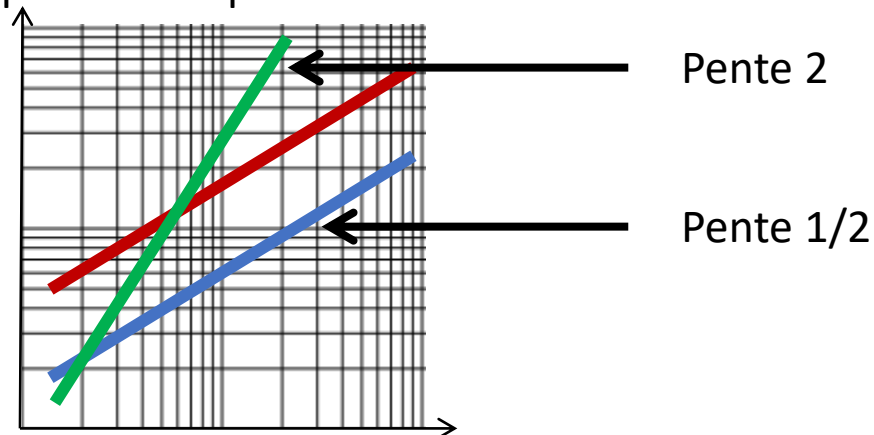


- 3) Un graphique avec les 2 axes en échelles logarithmique est appelé graphique log-log. Si un seul axe est en échelle logarithmique, on appelle un graphique semi-logarithmique (lin-log ou log-lin)
- 4) Une droite dans graphique en représentation log-log correspond à une fonction puissance. La pente de la droite correspond à la valeur de l'exposant.
- 5) Le préfacteur ne fait que décaler parallèlement vers le haut ou vers le bas la courbe.

$$f(x) = \sqrt{x}$$

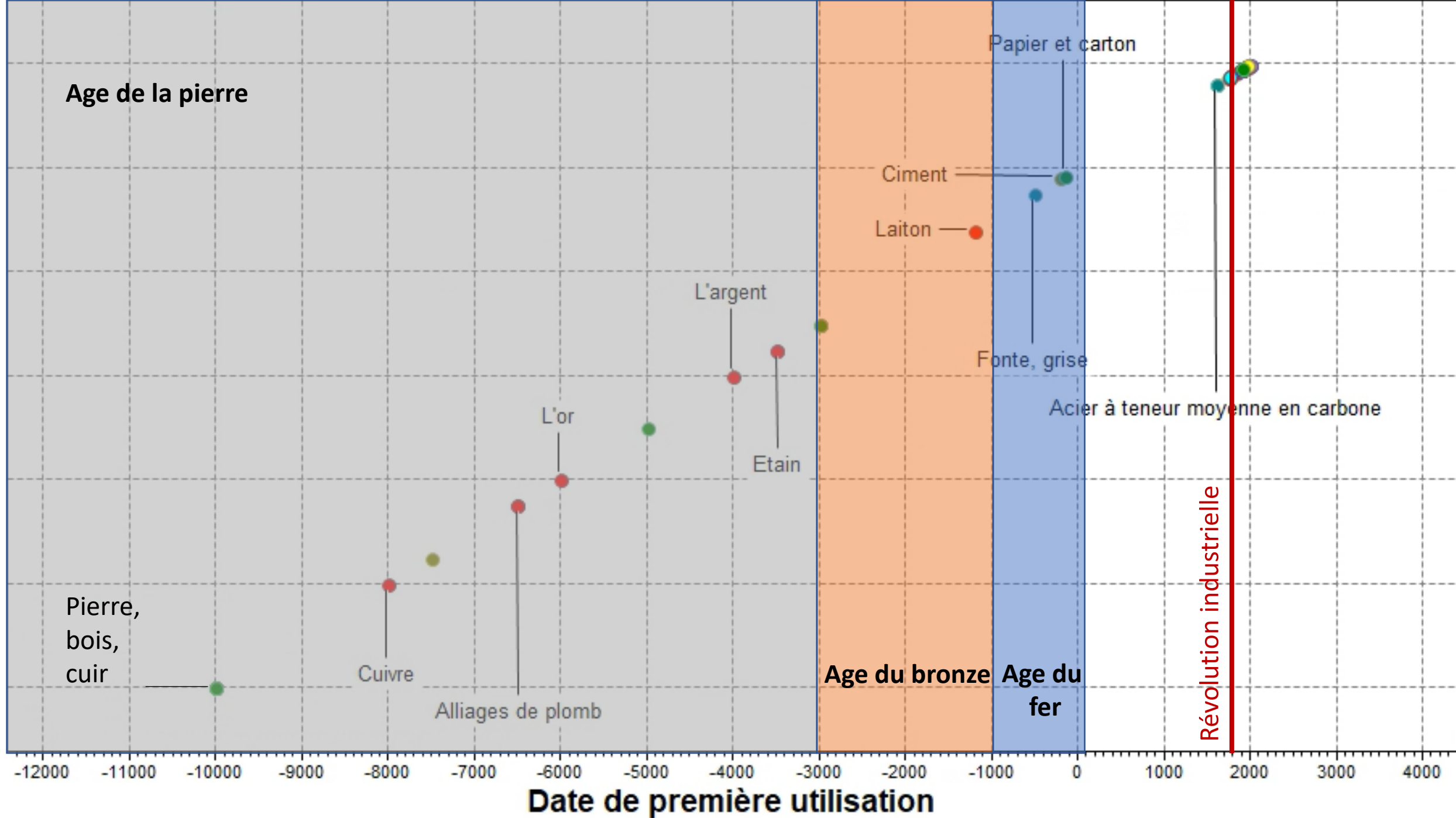
$$g(x) = 2\sqrt{x}$$

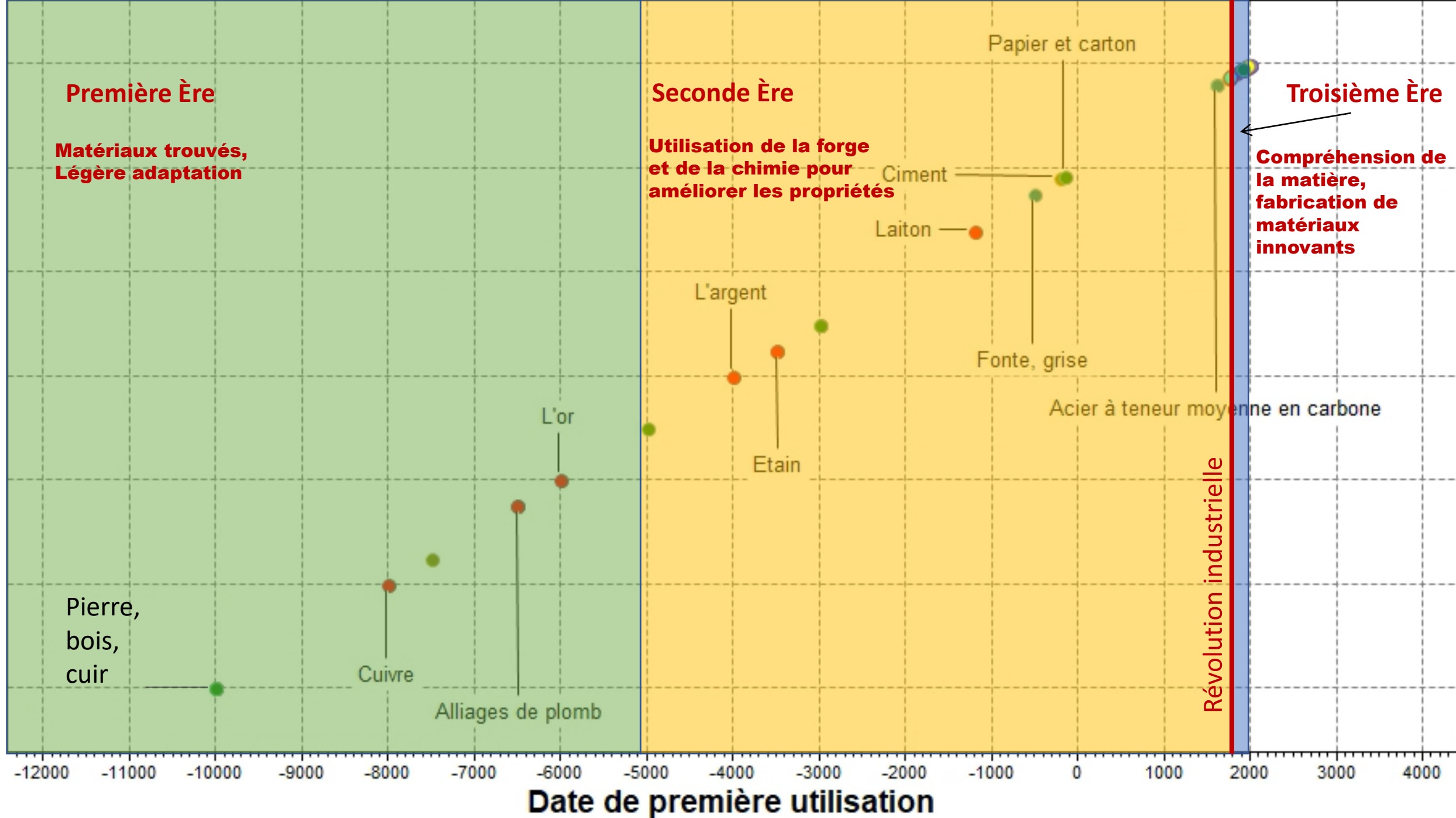
$$h(x) = x^2$$

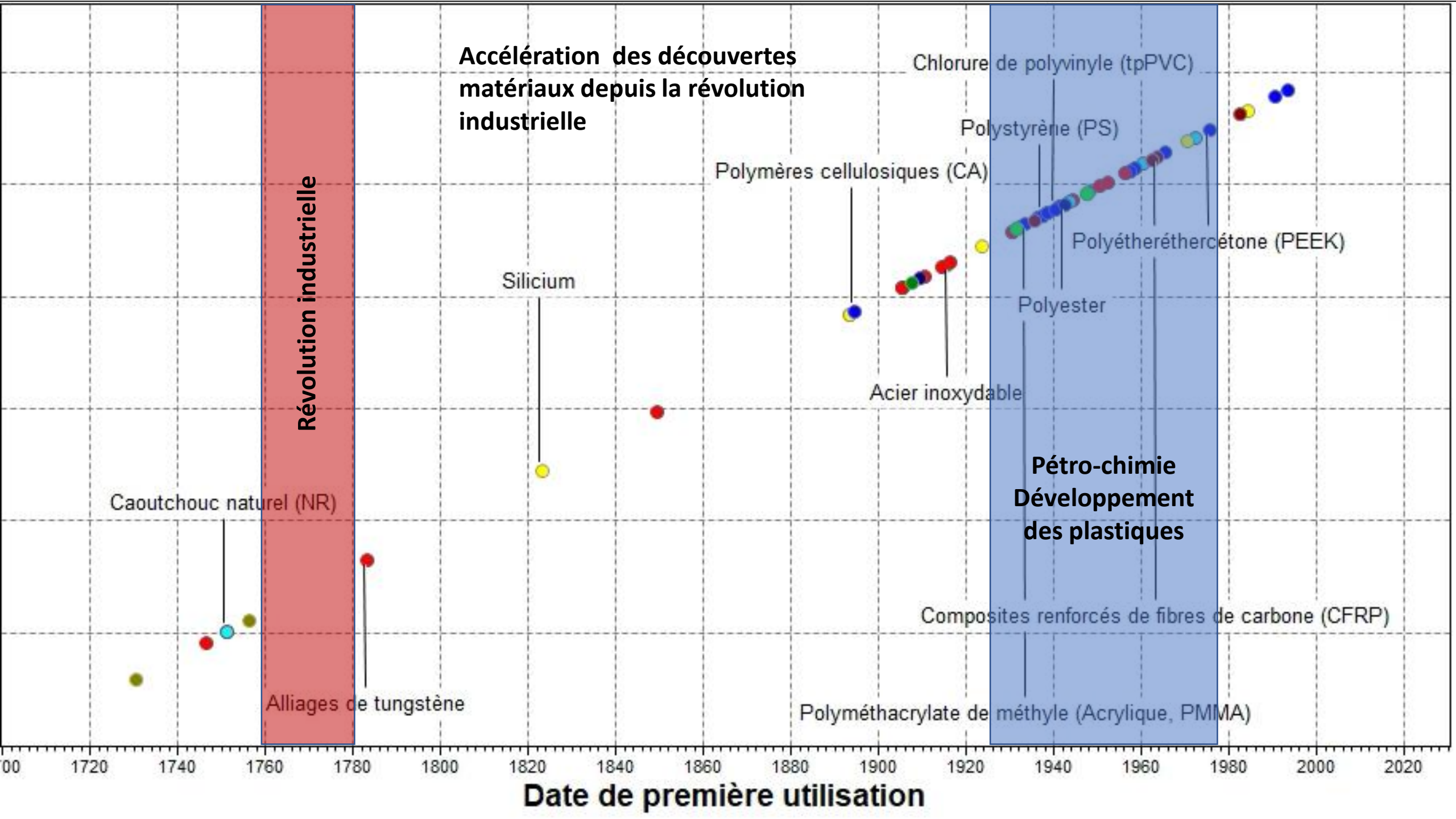


2. Histoire des matériaux : de l'âge de pierre à l'âge moderne

La maîtrise des **matériaux** s'accompagne d'une maîtrise de la **technique** de production. Par exemple le forgeage des alliages de cuivre (bronze), se fait à plus basse température que les alliages de fer. Le forgeage du fer a du donc attendre la maîtrise de fours plus chauds que ceux utilisés pour le bronze.





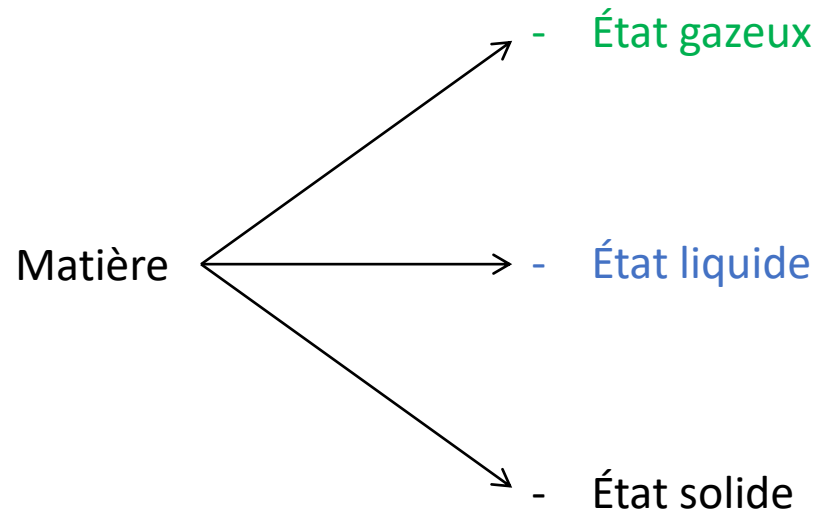


2. Histoire des matériaux : de l'âge de pierre à l'âge moderne

La maîtrise des **matériaux** s'accompagne d'une maîtrise de la **technique** de production. Par exemple le forgeage des alliages de cuivre (bronze), se fait à plus basse température que les alliages de fer. Le forgeage du fer a dû donc attendre la maîtrise de fours plus chauds que ceux utilisés pour le bronze.

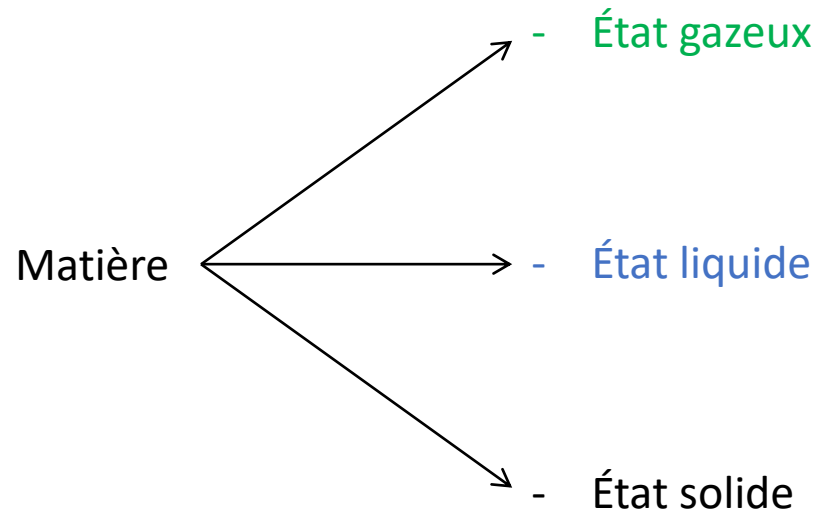
Les matériaux sont parfois les verrous des révolutions techniques : par exemple, le principal problème du projet ITER (Cadarache) est de fabriquer des matériaux pouvant résister à des températures extrêmes (1200°C sur les parois du Tokamak et -270 °C sur les bobines supraconductrices).

3. Matériaux purs : Propriétés émergentes



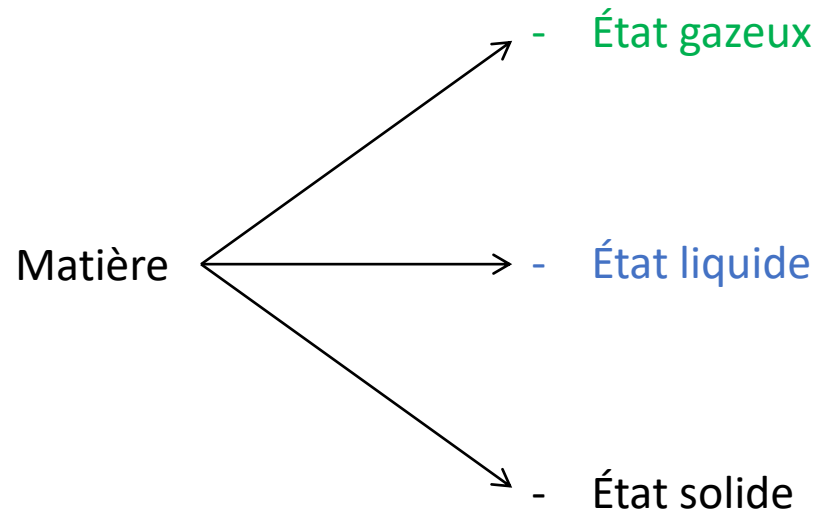
Molécules indépendantes. Pas de forme propre, ni de volume propre.
Pression faible, température élevée.

3. Matériaux purs : Propriétés émergentes



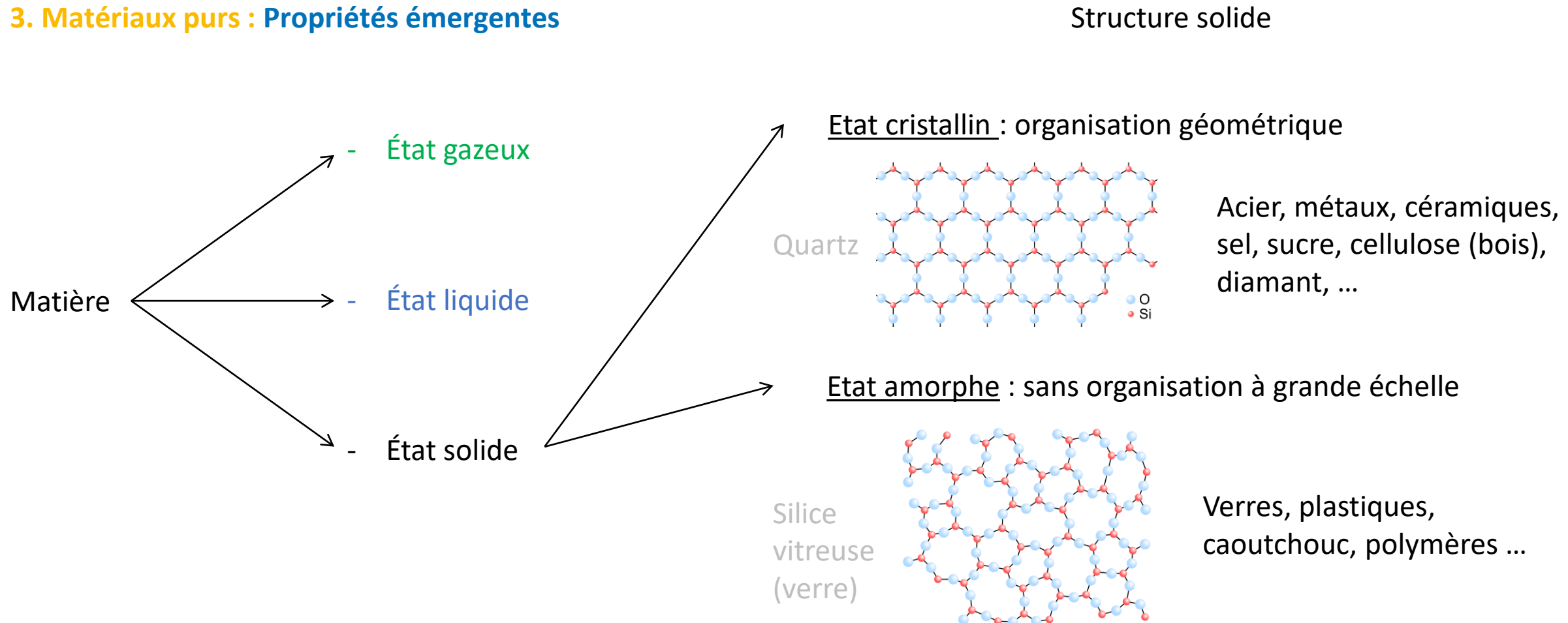
Molécules faiblement liées, difficilement compressibles.
Pressions et températures moyennes

3. Matériaux purs : Propriétés émergentes



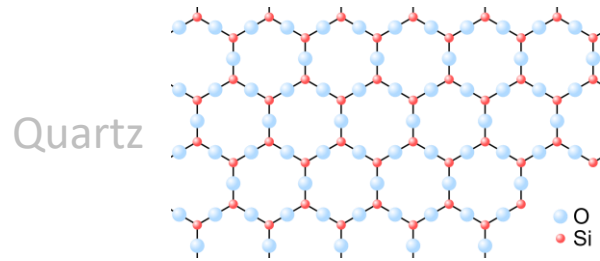
Molécules élastiquement liées.
Pressions élevées et températures faibles.

3. Matériaux purs : Propriétés émergentes



3. Matériaux purs : Propriétés émergentes

Etat cristallin : organisation géométrique



Acier, métaux, céramiques,
sel, sucre, cellulose (bois),
diamant, ...

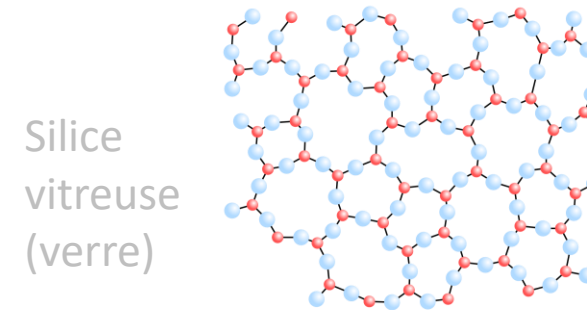
Solides très peu visco-élastiques

Elastiques, mais avec une limite d'élasticité faible

Coefficient de Poisson typique : 0,3

Attention dépend de la structure cristalline
et des interactions atomiques

Etat amorphe : sans organisation à grande échelle



Verres, plastiques,
caoutchouc, polymères ...

Solides visco-élastiques

Elastiques ou hyperélastiques , avec des limites
d'hyperélasticité importantes pour les caoutchoucs et
certains plastiques

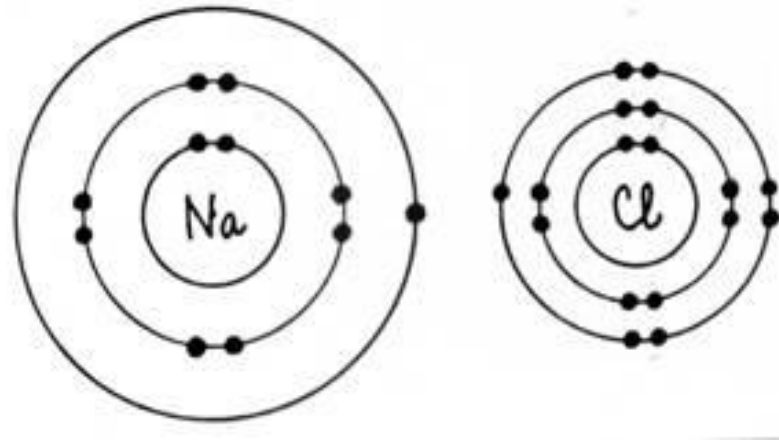
Coefficient de Poisson typique :

Verre : 0,2

Caoutchouc : 0,5 (incompressible)

3. Matériaux purs : Lien entre propriétés chimiques, thermiques et électriques avec le tableau de Mendeliev

Modèle de Bohr : Les électrons orbitent autour d'un noyau de protons et de neutrons

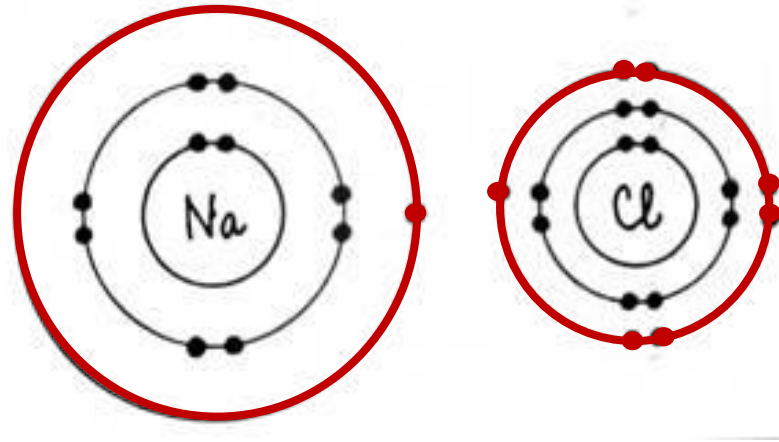


Atome de Sodium

Atome de Chlore

La couche électronique externe s'appelle la **bande de valence**. Les électrons de la bande de valence peuvent être mutualisés entre 2 atomes pour « compléter » les bandes de valence.

Modèle de Bohr : Les électrons orbitent autour d'un noyau de protons et de neutrons

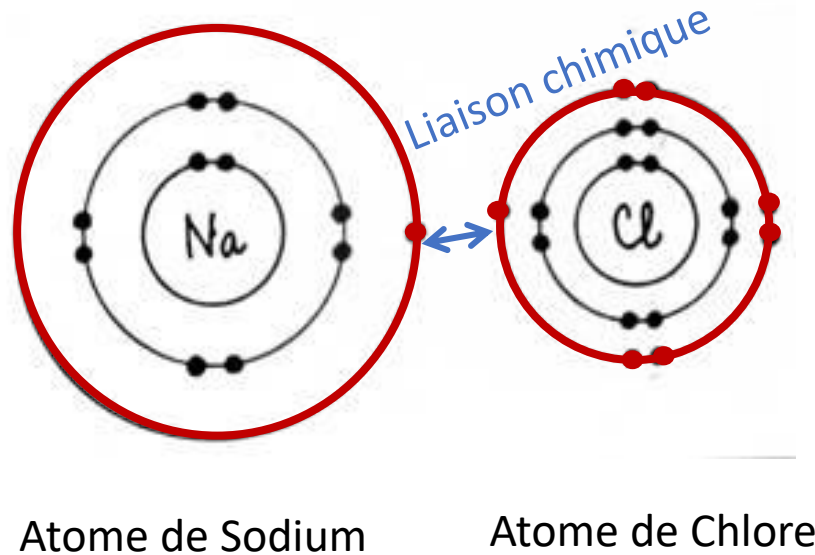


Atome de Sodium

Atome de Chlore

La couche électronique externe s'appelle la **bande de valence**. Les électrons de la bande de valence peuvent être mutualisés entre 2 atomes pour « compléter » les bandes de valence.

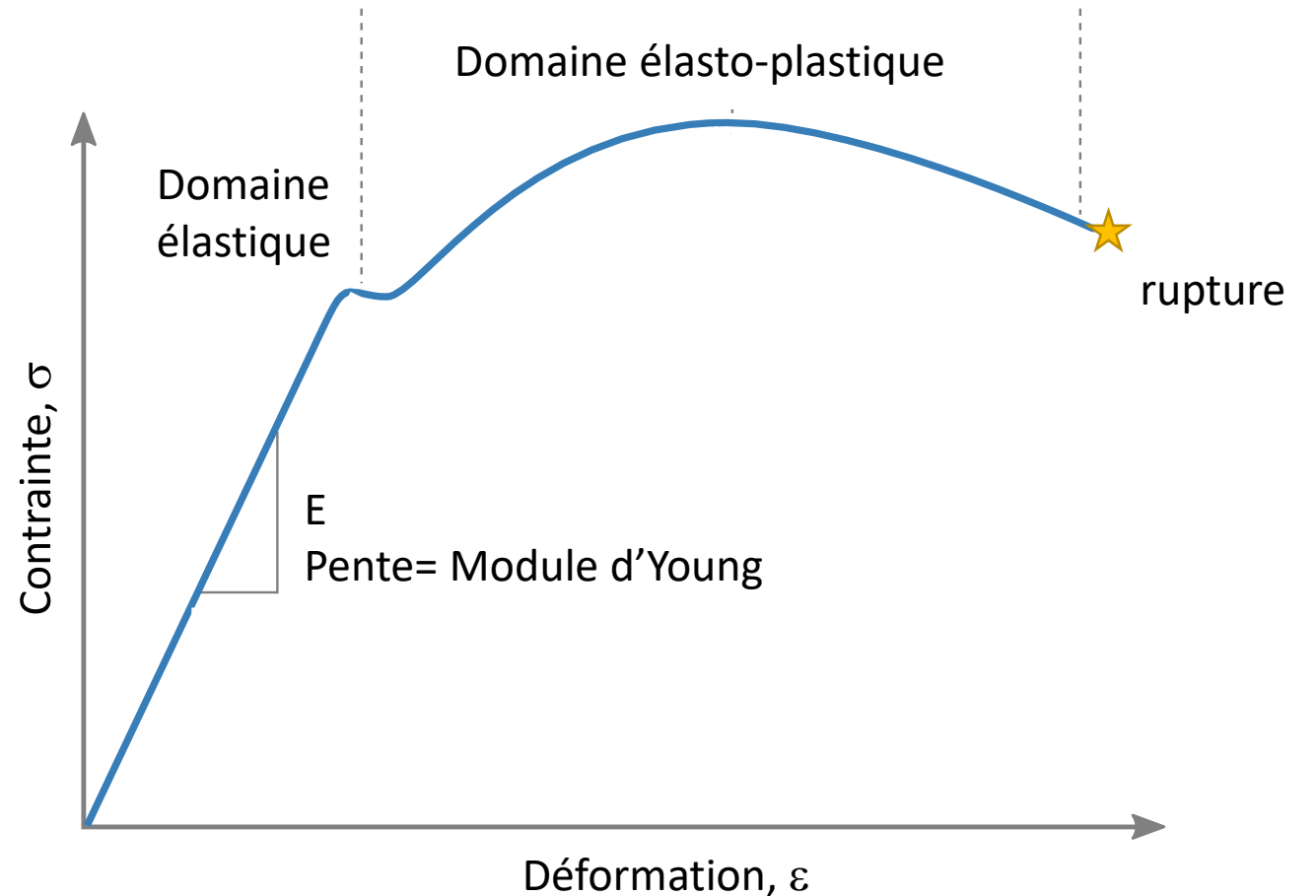
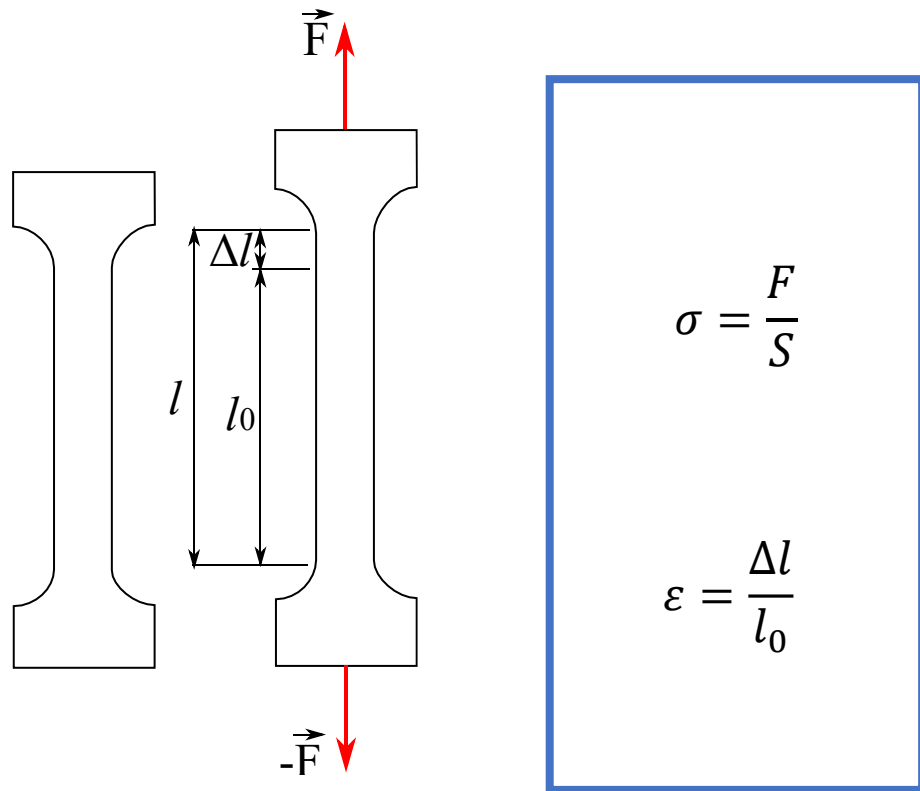
Modèle de Bohr : Les électrons orbitent autour d'un noyau de protons et de neutrons



La couche électronique externe s'appelle la **bande de valence**. Les électrons de la bande de valence peuvent être mutualisés entre 2 atomes pour « compléter » les bandes de valence.

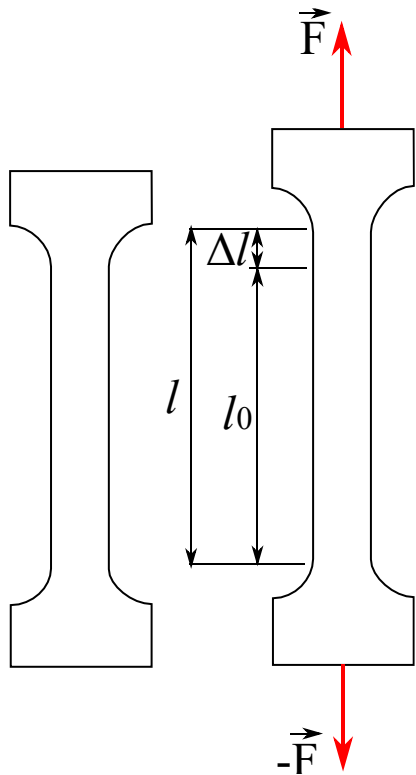
4. Propriétés mécaniques des matériaux solides

Essai de traction



2. Propriétés mécaniques des matériaux solides

Essai de traction



Contrainte maximale σ_r

Limite élastique σ_e

Contrainte, σ

E
Pente= Module d'Young

rupture

Déformation, ε

A%: Allongement à
la rupture

Matériau	Allongement à la rupture
Fonte	0,3 – 18%
Acier au carbone	8 – 25 %
Acier inoxydable	30 – 45%
Alliages de cuivre (bronze)	3 - 50%
PVC (rigide)	5-80%
Polyester	250-1500%

Les déformation des matériaux cristallins se limitent généralement à quelques pourcents.

Les déformation des matériaux amorphes sont-elles beaucoup plus variables et peuvent atteindre des valeurs de plusieurs centaines de pourcents.

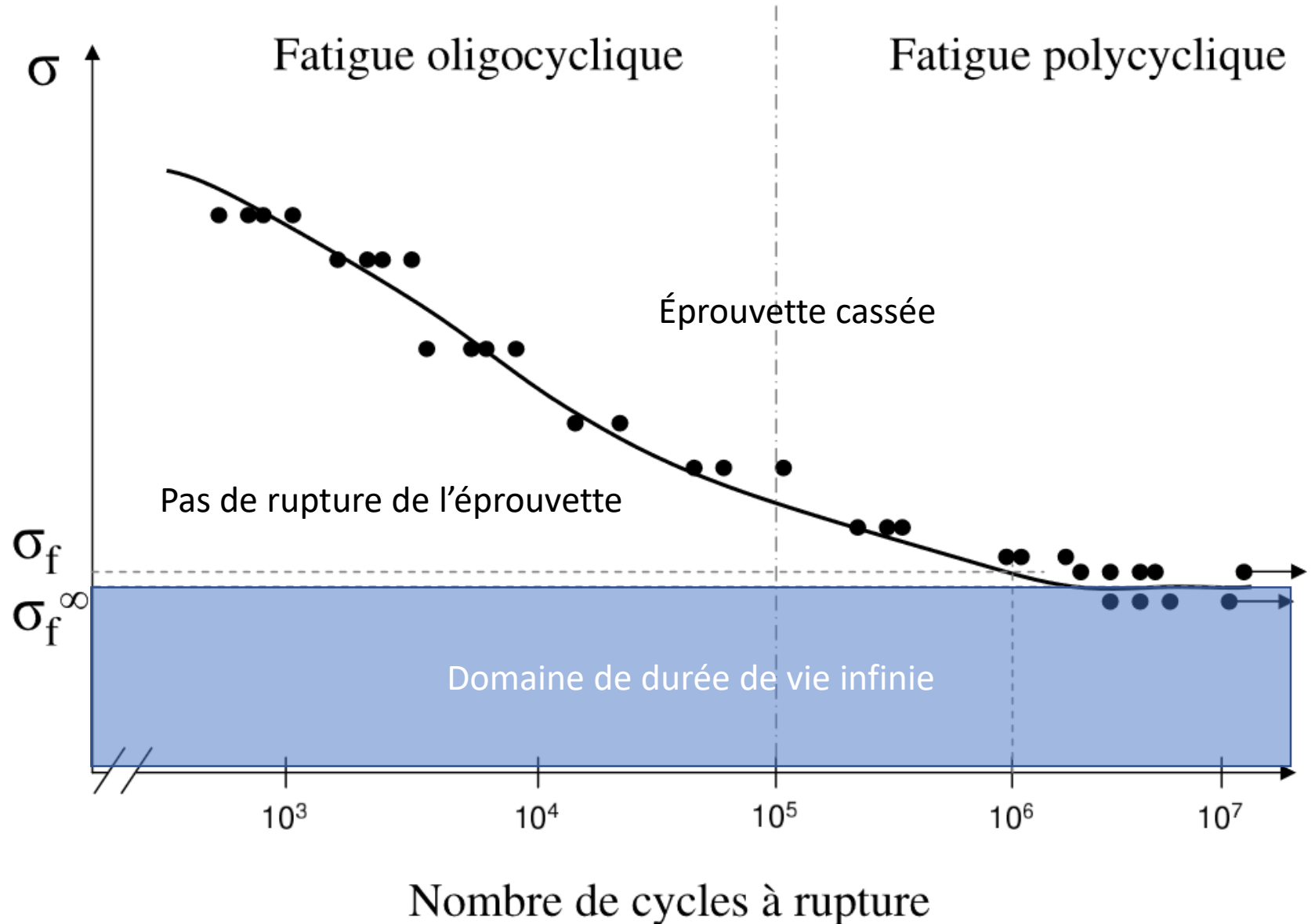
4. Propriétés mécaniques des matériaux solides

Fatigue

La fatigue d'un matériau
est déterminé via une
courbe de Wöhler

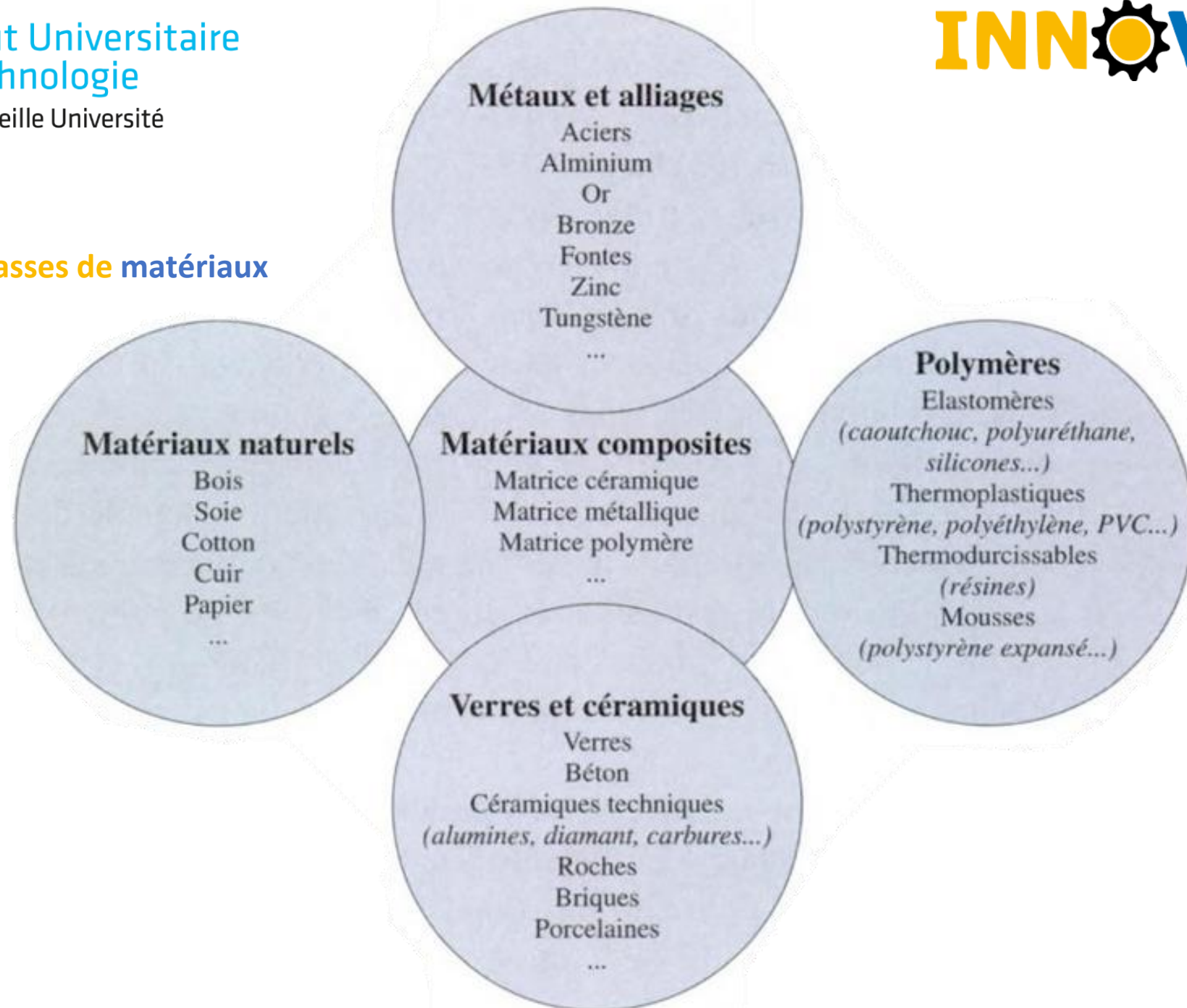
Limite de fatigue en torsion
 Limite de fatigue en traction

σ_f^∞ : Contrainte limite de
durée de vie infinie



Exercice : Trier les matériaux par leur résistance en fatigue et leur module d'Young. Quels sont les meilleurs matériaux pour la fatigue ?

5. Les grandes classes de matériaux



MÉTAUX ET ALLIAGES

	Métaux		Exemples d'applications
Métaux Ferreux	Aciers	Aciers haut carbone	Outils de coupe, roulements, arbres de transmission...
		Aciers moyen carbone	Construction mécanique, industrie automobile, structures, engrenages, bielles
		Aciers bas carbone	Construction mécanique, structures
		Aciers alliés	Automobile, structures, réservoirs de pression, tubes...
	Aciers inoxydables	Aciers inoxydables austénitiques	Structures en environnement corrosifs, structures off shore, canalisations, construction navale, génie chimique...
		Aciers inoxydables ferritiques	Structures en environnement corrosif, génie chimique
		Aciers inoxydables martensitiques	Structures en environnement corrosif, génie chimique
		Aciers inoxydables durcis par précipitation	Structures en environnement corrosif, génie chimique
	Fontes	Fontes grises	Cylindres, pistons, blocs moteurs...
		Fontes malléables	Constructions mécaniques
		Fontes nodulaires	Tubes, pompes, broyeurs...
		Fontes austénitiques	Industrie chimique
		Fontes alliées	Constructions mécaniques résistantes à l'abrasion

MÉTAUX ET ALLIAGES

Métaux		Exemples d'applications
Alliages légers	Alliages d'aluminium	Alliages de corroyage Aéronautique, emballage, bâtiment, transport
		Alliages de moulage Construction mécanique, automobile
	Alliages de magnésium	Alliages de moulage Automobile, aéronautique
	Alliages de titane	Alliages de corroyage Sports, automobile, aéronautique Aéronautique, industrie chimique
Alliages de cuivre	Cuivre	Conducteurs électriques
	Bronzes	Echangeurs de chaleur, industrie chimique, moules, environnement maritime
	Laitons	Connecteurs de tubes, ressorts, réservoir de pression
Alliages de nickel		Aéronautique (moteurs) outillage, monnaie

VERRES ET CÉRAMIQUES

	Céramiques		Exemples d'applications
Céramiques de grande diffusion	Céramiques hydratées	Ciment, plâtre, bétons,	Bâtiment
	Roches	Granites, marbre, calcaires	Bâtiment
	Céramiques cuites	Brique, poteries porcelaines	Bâtiment, isolation électrique, habitat
Céramiques dispersées	Fibres de renfort	Fibre de verre fibre de carbone	Renfort dans les composites polymères
	Particules de renfort	Alumine, carbure de silicium, magnésie	Renfort dans les composites polymères et métalliques, ignifugeants
	Particules abrasives	Alumine, carbure de silicium, sialons, carbure de tungstène, diamant...	Polissage, outils de coupe
Céramiques techniques massives		Alumine nitrure de silicium carbure de silicium zircone	Pièces de fours à haute température Applications envisagées dans les moteurs
Verres		Verre de silice verre de silice	Fenêtres Equipement de la cuisine

POLYMÈRES

	Polymères		Exemples d'applications
Thermo-plastiques	Acrylobutadiene styrène	ABS	Appareils électroménagers,
	Acétal		Mécanique (visserie)
	Acryliques		Lentilles, emballage
	Acétate de cellulose	AC	Films transparents
	Fluoroéthylène	PTFE	Revêtements à faible friction
	Polyamide	Nylons	Pièces mécaniques moulées
	Polycarbonates		Fenêtres, visières de casques
	Polyéther éther Ketone	PEEK	Revêtements, radomes, grilles de four microondes
	Polyéthylène téréphtalate	PET	Films transparents, habillement, bouteilles
	Polyéthersulfone	PES	Composants électriques
	Polyéthylène		Emballages, tuyauterie...
	Polypropylène		Tuyauterie, chaises, cordes
	Polystyrène		Récipients jetables, corps de stylos...
	Polysulfone		Composants médicaux à stériliser
	Polychlorure de vinyle	PVC	Tubes, huisseries de fenêtres, cartes de crédits, bouteilles...

POLYMÈRES

	Polymères		Exemples d'applications
Thermo-durcissables	Epoxy		Connecteurs, prises, pièces moulées de précision, colles
	Phénoliques		Composants électriques
	Polyesters		Eléments d'intérieur
	Polyimides		Supports de circuits intégrés, revêtement de composants électriques
	Silicone		Encapsulation de composants électroniques, applications structurales jusqu'à 200°C
Elastomères	Butyl		Pneus, joints
	Polyéthylène chlore	CPE	Pneus, semelles
	Ethyl vinyl acétate	EVA	Semelles de chaussure, équipement médical
	Isoprène		Pneus, tuyaux
	Caoutchouc naturel		Pneus
	Polyuréthane	PU	Roues, semelles, pare-chocs, coussins
	Polychlorure de vinyle plastifié		Cuirs artificiels, revêtement de sols, tubes
Mousses	Mousses flexibles		Ameublement, intérieur des automobiles
	Mousses rigides		Absorption de chocs, isolation thermique, âme de structures sandwiches
	Mousses élastomères		Isolation thermique ou acoustique

MATÉRIAUX COMPOSITES

	Composites		Exemples d'applications
Base polymères	Matrice thermoplastique	ABS fibre de verre	Appareils ménagers
			Composants mécaniques
		Acétal fibre de carbone	Ecrans de protection
		Polycarbonate fibre de carbone ou fibre de verre	
	Matrice thermodurcissable	Polypropylène fibre de verre ou renfort minéral	Pièces mécanique, ameublement
		Epoxy fibre de verre ou fibre de carbone, Kevlar, tissées	Aéronautique, sport
		Polyester fibre de verre SMC	Composants carrosserie automobile
		Polyester à charges minérales	Appareils ménagers
	Matrice élastomère		
		Renfort métallique ou renfort polymère, charges particulières alumine, silice...	Pneus

MATÉRIAUX COMPOSITES

Composites			Exemples d'applications
Base métallique	Matrice aluminium	Renfort alumine, carbure de silicium, nitrure d'aluminium	Aéronautique Sport Pièces de frottement dans l'automobile Emballage électronique
	Matrice titane	Carbure de silicium	Pièces de moteur aéronautique
	Matrice cuivre	Fibre Nb ou Ag Particule alumine	Conducteurs électriques à haute tenue mécanique
Base céramique	Matrice carbone	Carbone/carbone	Freins
	Matrice alumine	B4C, TiC, Si3N4	Tenue mécanique à haute température
	Cermet	WC/cobalt TiC/Nickel	Outils de coupe, polissage

MATÉRIAUX NATURELS

Matériaux naturels		Exemples d'applications
Matériau d'origine végétale	Bois dense Bois aggloméré	Ameublement, bâtiment
	Liège	Isolation, bouchage
	Fibres naturelles (coton, lin, soie...)	Tissus
	Papier, carton (cellulose)	Emballage, administration
Matériau d'origine animale	Cuir	Habillement, chaussures
	Laine	Habillement, revêtements de sols

Retour sur la représentation logarithmique : lois complexes

Commençons par une question : en quel matériau faut-il construire une tour cylindrique pleine la plus haute possible ?

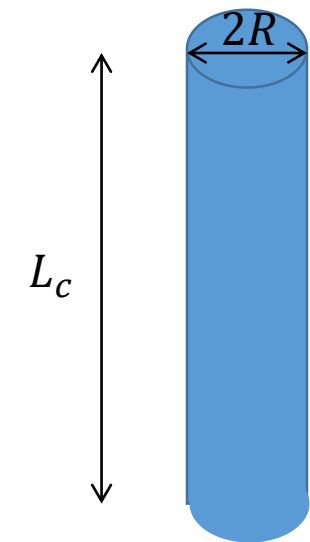
Critère de flambage sous poids propre :

Pour une poutre massive (en tenant compte maintenant du poids de la poutre), la condition de non-flambement est plus compliquée à obtenir. La condition de non-flambement devient,

$$L_c \leq \left(1.95 \frac{ER^2}{\rho g} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

Je vous encourage à vous référer à la publication de Greenhill (1881) pour en avoir la démonstration exacte.

E : Module d'Young ρ : Masse volumique g : Accélération de la gravité



$R = 10 \text{ cm}$

Retour sur la représentation logarithmique : lois complexes

Commençons par une question : en quel matériau faut-il construire une tour cylindrique pleine la plus haute possible ?



Utilisez le Logiel GRANTA (base de donnée niveau 2) pour déterminer s'il vaut mieux faire une poutre en acier ou en bambou.

Étape de graphique

Axe des abscisses Axe des ordonnées

☒ Propriété simple ou avancée ☐ Recherche des indices de performance

[Qu'est-ce qu'un indice de](#)

Définition des propriétés de l'axe

Sélectionner l'attribut à tracer ou cliquez sur le bouton Avancé

[Video Tu](#)

Catégorie : <Ordre alphabétique>

Avancé...

Attribut : <Avancé>

Paramètres des axes

Titre de l'axe : (1,95 * Module de Young / Masse Volumique / Constant:Standard Accel. of Gravity)

☐ Valeurs absolues ☐ Valeurs relatives

☒ Logarithmique ☐ Linéaire

☒ Échelle auto ☐ Définir min - max

Paramètres

Éditer...

Modifier les valeurs des paramètres utilisées par cet axe

☒ Valeurs par défaut du projet

OK

Annuler

Aide

Définir un axe

(1,95 * [Module de Young]*0,1^2 / [Masse Volumique] / [Constant:Standard Accel. of Gravity])^(1 / 3)

+ - / * ^ ()

Attributs Arborescences Constantes/Paramètres

<Tous les attributs>

Insérer

Nom	Détails
Acide acétique (10%)	Durabilité
Acide acétique (glacial)	Durabilité
Acide chlorhydrique (10%)	Durabilité
Acide chlorhydrique (36%)	Durabilité
Acide citrique (10%)	Durabilité
Acide fluorhydrique (40%)	Durabilité
Acide nitrique (10%)	Durabilité
Acide nitrique (70%)	Durabilité

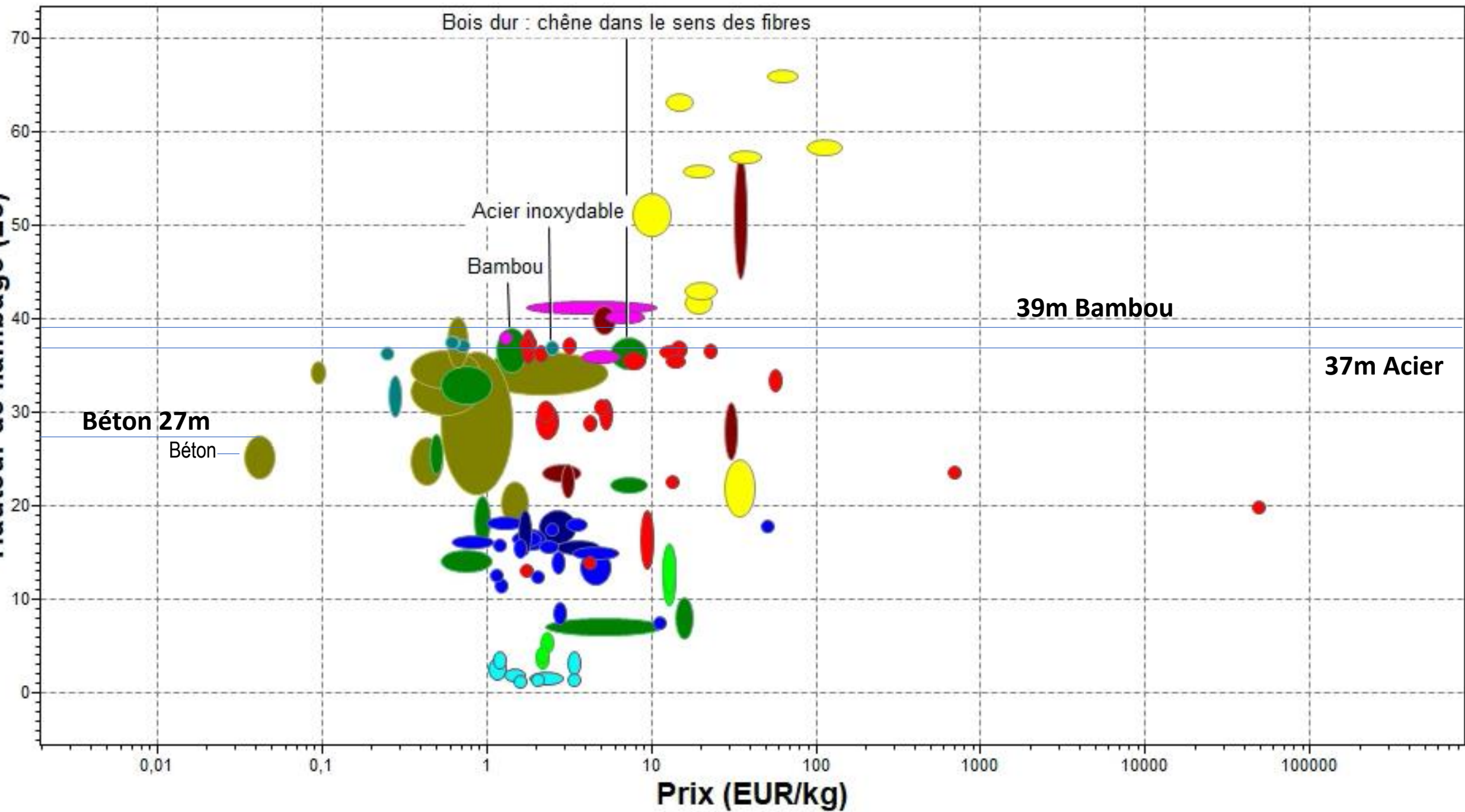
OK

Annuler

Aide

Matériaux naturels

Hauteur de flambage (Lc)



Retour sur la représentation logarithmique : lois complexes

Commençons par une question : en quel matériau faut-il construire une tour cylindrique pleine la plus haute possible ?

Critère de flambage sous poids propre calculs moyens :

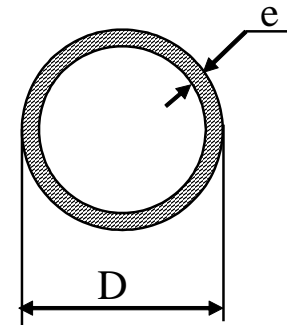
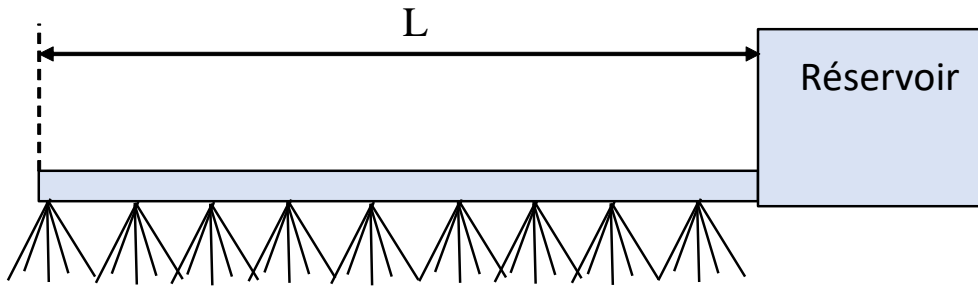
$$L_c \leq \left(1.95 \frac{ER^2}{\rho g} \right)^{1/3}.$$

	BOIS	ACIER	BÉTON
ρ (kg.m ⁻³)	450-1200	7500-8100	2200-2500
E (GPa)	10-20	210	20-50
R (m)	0.1	0.1	0.1
L_c (m)	31	37	27

TD Spécification matériau : Pulvérisateur agricole

Objectif :

Minimiser la masse de la rampe de pulvérisation tout en assurant de rester dans le domaine élastique (masse de produit dans la rampe), à l'éclatement (pression interne) et une flèche maîtrisée (longueur de la rampe importante).



Spécifications :

$L = 5\text{m}$, $e = 3\text{mm}$, $D = 10\text{ cm}$, $P = 10^6\text{ Pa}$,

Flèche maximale = 20 cm

Liquide embarqué : eau

Rappels :

Poutre encastée-libre avec charge répartie w :

Moment quadratique : $I = \frac{\pi}{16} D^3 e$;

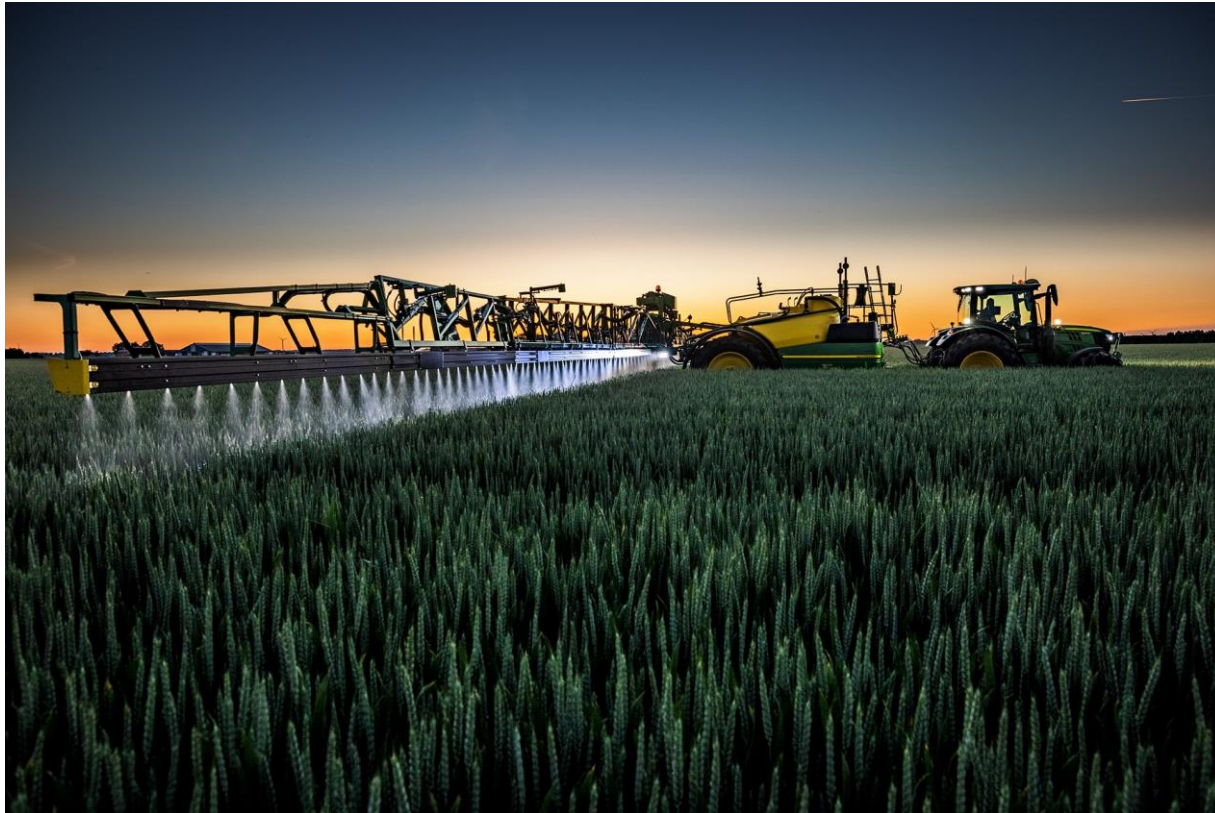
Flèche : $\Delta y = \frac{wL^4}{8EI}$;

Contraintes de flexion : $\sigma = \frac{D w L^2}{4 I}$;

Contraintes dans un tube pressurisé (Formule du chaudronnier) :

$$\sigma = \frac{PD}{2e}$$

- 1) Déterminer des contraintes liant E , ρ et σ_e
- 2) Déterminer les matériaux possibles : $\sigma < \sigma_e$ et $\Delta y < 20\text{cm}$.





- Contrainte en flexion

$$w = \frac{\pi D^2}{4} \rho_{eau} g + \pi D e g \rho$$

- Contrainte sur la flèche :

$$\Delta y^* = \frac{w L^4}{8 E I} = \frac{2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \rho_{eau} g + \pi D e g \rho \right) L^4}{\pi D^3 e E}$$

$$E > \frac{\rho_{eau} g L^4}{2 D e \Delta y^*} + \frac{2 g L^4}{D^2 \Delta y^*} \rho$$



- Contrainte :

$$\sigma_e > \frac{PD}{2e}$$



- Calcul du poids linéique :

$$w = \frac{\pi D^2}{4} \rho_{eau} g + \pi D e g \rho$$

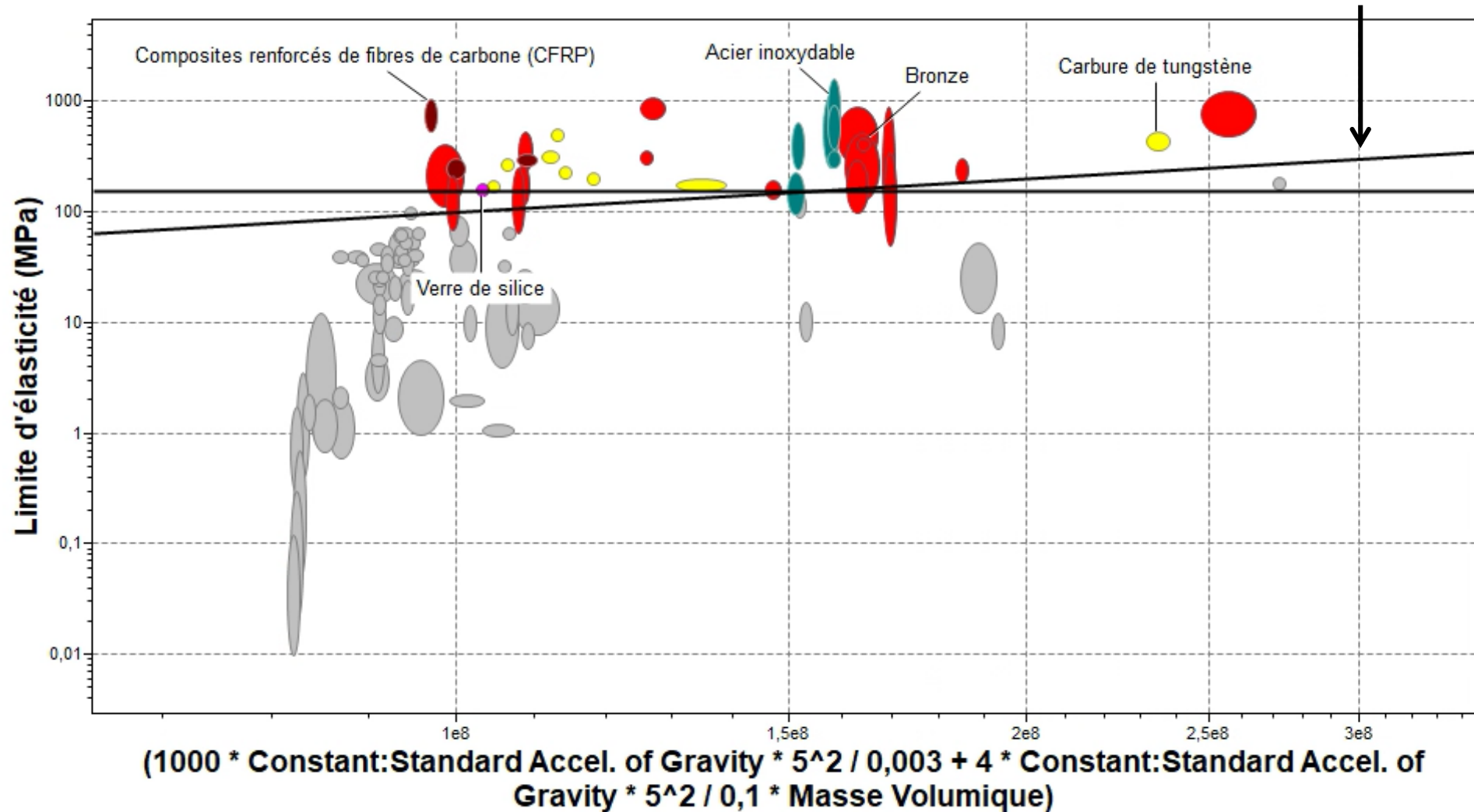
- Contrainte de pression :

$$\sigma_e > \frac{D w L^2}{4 I} = \frac{4 D L^2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \rho_{eau} g + \pi D e g \rho \right)}{\pi D^3 e}$$

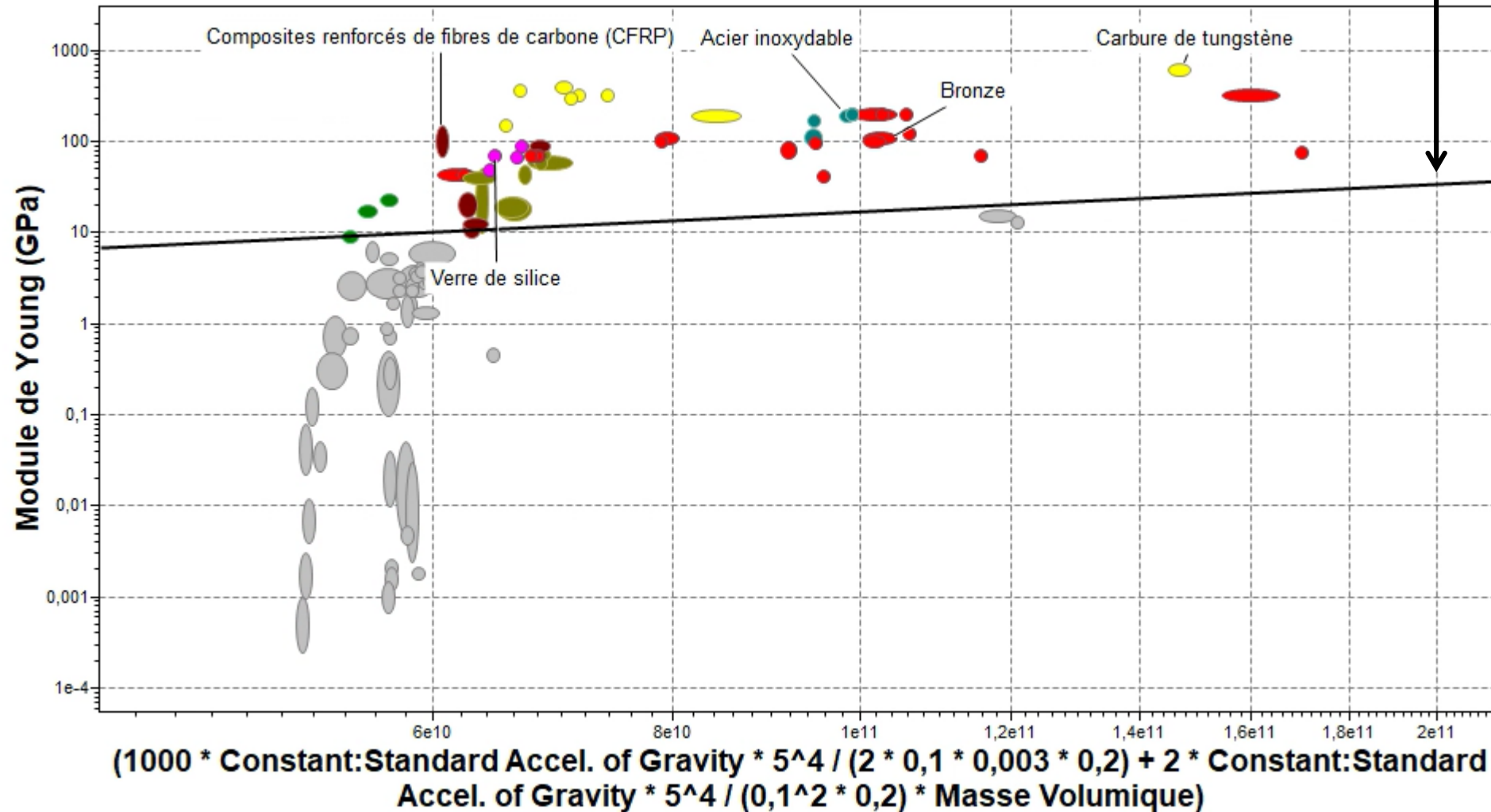
$$\sigma_e > \frac{\rho_{eau} g L^2}{e} + \frac{4 g L^2}{D} \rho$$

On peut maintenant reporter les valeurs dans le logiciel GRANTA :

$$\sigma_e > \frac{\rho_{eau} g L^2}{e} + \frac{4 g L^2}{D} \rho$$



$$E > \frac{\rho_{eau} g L^4}{2 D e \Delta y^*} + \frac{2 g L^4}{D^2 \Delta y^*} \rho$$



Autres facteurs de choix :

Eco-conception

Economique (Prix)

Disponibilité

Durabilité environnementale

Exigence sociale, Santé

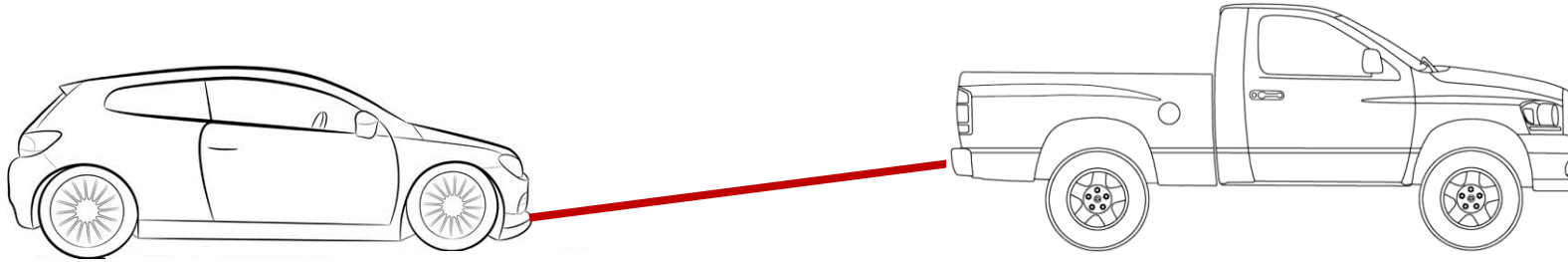
Esthétique

CONCLUSION :

Le choix d'un matériau est un compromis multifactoriel où les contraintes mécaniques doivent être prises en compte de manière systématique. Les logiciels de choix de matériau, en permettant un accès facile à une **base de donnée** permettent d'évaluer de manière **exhaustive** les matériaux pour une conception.

Il arrive parfois que des raisons sanitaires ou économiques soient primordiales et poussent à changer la conception faute de matériau disponible.

EXERCICE 1 : BARRE DE TRACTION D'UN VÉHICULE



Une barre de diamètre d et de longueur l est soumise à une force de traction F . Le cahier des charges impose les valeurs de la longueur de la barre $l = 3\text{m}$ et de la force $F = 40\text{ kN}$.

1. Choisir le matériau permettant de minimiser la masse m de la barre. On impose que celle-ci ne se déforme jamais plastiquement, avec un coefficient de sécurité s de 2.
2. On cherche maintenant à réaliser à une barre de moindre coût. En utilisant de nouveau une démarche rigoureuse de choix de matériaux, déterminer le matériau permettant de fabriquer la barre au prix P le plus bas.

EXERCICE 1 : BARRE DE TRACTION D'UN VÉHICULE



Une barre de diamètre d et de longueur l est soumise à une force de traction F . Le cahier des charges impose les valeurs de la longueur de la barre $l = 3\text{m}$ et de la force $F = 40\text{ kN}$.

1. Choisir le matériau permettant de minimiser la masse m de la barre. On impose que celle-ci ne se déforme jamais plastiquement, avec un coefficient de sécurité s de 2.

Étape 1 : On formalise les conditions

Masse de la barre : $m = \rho l \frac{\pi d^2}{4}$ et condition de non rupture : $\frac{\sigma_e}{s} < \frac{4F}{\pi d^2}$;

Étape 2 : On exprime la fonction à optimiser en fonction des propriétés matériaux (on enlève la variable de conception)

Masse de la barre : $m = \frac{\rho}{\sigma_e} s l F$

EXERCICE 1 : BARRE DE TRACTION D'UN VÉHICULE



Une barre de diamètre d et de longueur l est soumise à une force de traction F . Le cahier des charges impose les valeurs de la longueur de la barre $l = 3\text{m}$ et de la force $F = 40\text{ kN}$.

1. Choisir le matériau permettant de minimiser la masse m de la barre. On impose que celle-ci ne se déforme jamais plastiquement, avec un coefficient de sécurité s de 2.

Étape 3 : On passe au logarithme.

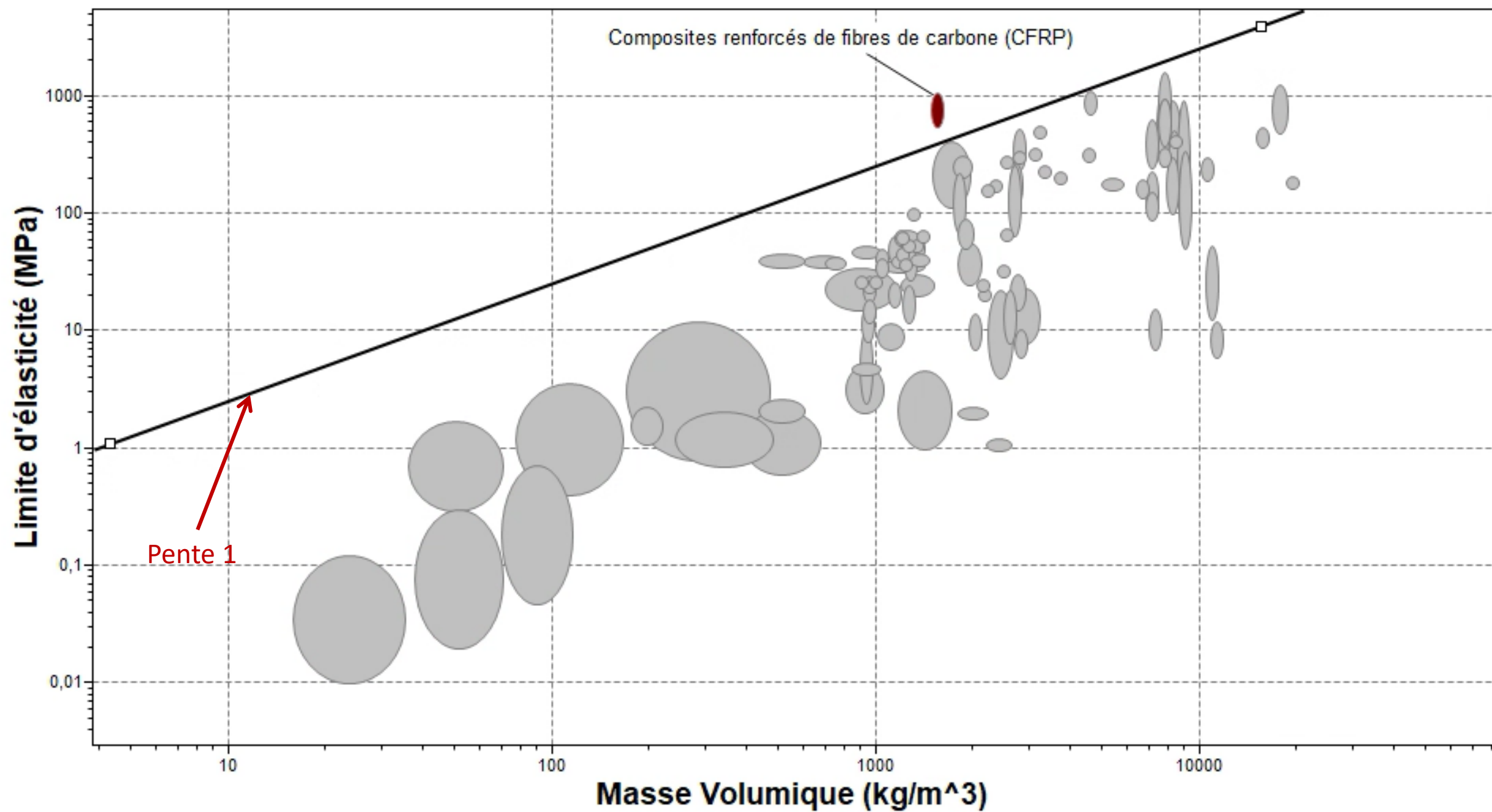
Masse de la barre : $\log(m) = \log(slF) + \log(\rho) - \log(\sigma_e)$

On réexprimer une propriété en fonction de l'autre : $\log(\sigma_e) = +1\log(\rho) + \log(slF) - \log(m)$

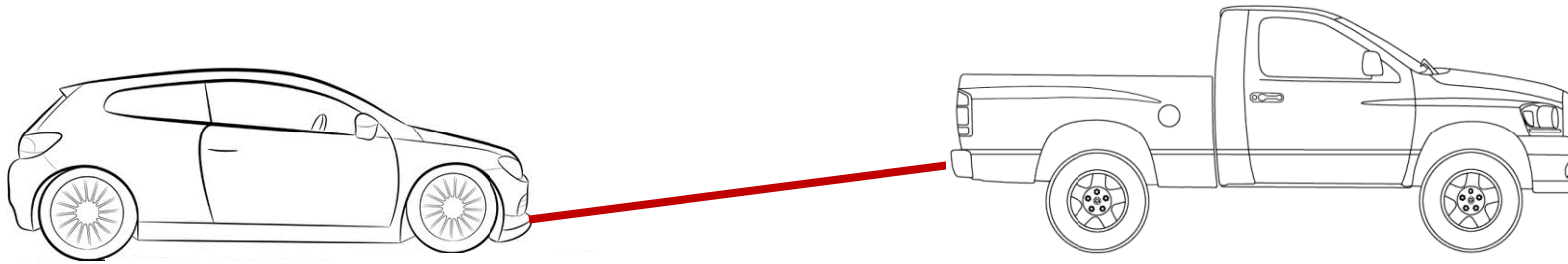
Étape 4 : Utilisation des abaques.

On trace le diagramme log-log limite élastique - densité

On considère une pente $+1$ et la droite la plus haute (on maximise la limite élastique et minimise la densité).



EXERCICE 1 : BARRE DE TRACTION D'UN VÉHICULE



Une barre de diamètre d et de longueur l est soumise à une force de traction F . Le cahier des charges impose les valeurs de la longueur de la barre $l = 3\text{m}$ et de la force $F = 40\text{ kN}$.

1. Choisir le matériau permettant de minimiser la masse m de la barre. On impose que celle-ci ne se déforme jamais plastiquement, avec un coefficient de sécurité s de 2.

Étape 5 : Conclusion de l'étude dimensionnelle

Le meilleur matériau est donc un composite renforcé de fibre de carbone.

On trouve la diamètre de la barre à partir de la condition de non rupture : $\frac{\sigma_e}{s} < \frac{4F}{\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{4sF}{\pi\sigma_e}}$

Description

Le matériau dans un produit



Légende de l'illustration

1. Détail du matériau. © Chris Lefteri 2. Cadre de vélo en CFRP ne pesant que 1,08 kg. © TREK

Composition (résumé) ⓘ

Epoxy + renfort de fibres de carbone continues de type HS (0, +45, 90), disposition quasi isotrope.

Le Matériau

Les composites renforcés par des fibres de carbone (CFRP) offrent une plus grande rigidité et une meilleure tenue mécanique que n'importe quel autre type de composites mais ils sont nettement plus chers que les GFRP (voir cette fiche). Les fibres continues dans une matrice polyester ou époxy donnent les performances les plus élevées. Les fibres supportent les charges mécaniques, alors que le matériau de la matrice transmet la charge aux fibres et offre la ductilité et la résistance aux chocs ainsi que la protection des fibres contre les dégâts causés par la manipulation et l'environnement. C'est le matériau de la matrice qui limite la température de service et les conditions de mise en œuvre.

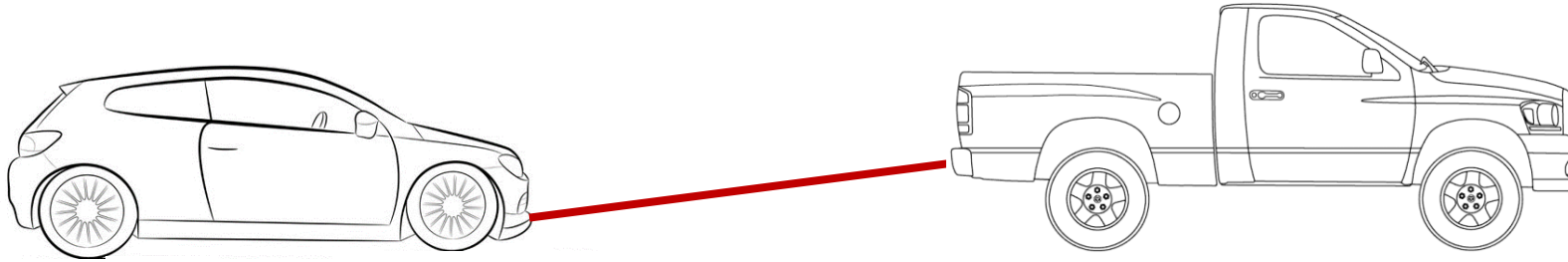
Propriétés générales

Masse Volumique	ⓘ	1,5e3	-	1,6e3	kg/m ³
Prix	ⓘ	* 32,5	-	36,1	EUR/kg
Date de première utilisation	ⓘ	1963			

Propriétés mécaniques

Module de Young	ⓘ	69	-	150	GPa
Module de cisaillement	ⓘ	28	-	60	GPa
Module de compressibilité	ⓘ	43	-	80	GPa
Coefficient de Poisson	ⓘ	* 0,305	-	0,307	
Limite d'élasticité	ⓘ	550	-	1,05e3	MPa
Résistance en traction	ⓘ	550	-	1,05e3	MPa

EXERCICE 1 : BARRE DE TRACTION D'UN VÉHICULE



Une barre de diamètre d et de longueur l est soumise à une force de traction F . Le cahier des charges impose les valeurs de la longueur de la barre $l = 3\text{m}$ et de la force $F = 40\text{ kN}$.

1. Choisir le matériau permettant de minimiser la masse m de la barre. On impose que celle-ci ne se déforme jamais plastiquement, avec un coefficient de sécurité s de 2.

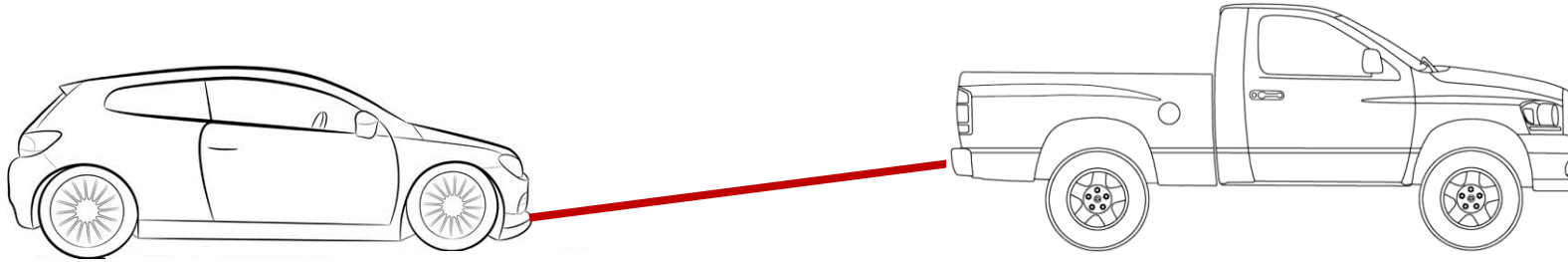
Étape 5 : Conclusion de l'étude dimensionnelle

Le meilleur matériau est donc un composite renforcé de fibre de carbone.

On trouve la diamètre de la barre à partir de la condition de non rupture : $\frac{\sigma_e}{s} < \frac{4F}{\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{4sF}{\pi\sigma_e}} = 1\text{ cm}$

Et la masse $m = \rho l \frac{\pi d^2}{4} = 0,35\text{ kg}$

EXERCICE 1 : BARRE DE TRACTION D'UN VÉHICULE



Une barre de diamètre d et de longueur l est soumise à une force de traction F . Le cahier des charges impose les valeurs de la longueur de la barre $l = 3\text{m}$ et de la force $F = 40\text{ kN}$.

- On cherche maintenant à réaliser à une barre de moindre coût. En utilisant de nouveau une démarche rigoureuse de choix de matériaux, déterminer le matériau permettant de fabriquer la barre au prix P le plus bas.

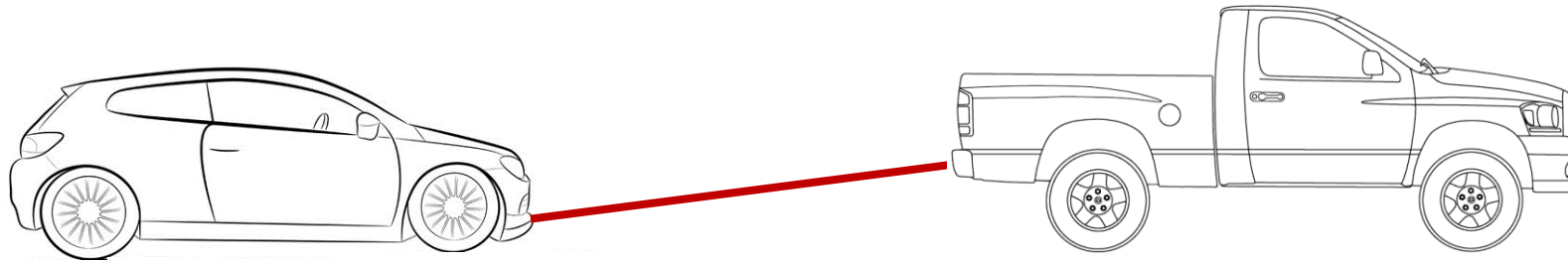
Étape 1 : On formalise les conditions

Masse de la barre : $P = C\rho l \frac{\pi d^2}{4}$ où C est le prix massique et condition de non rupture : $\frac{\sigma_e}{s} < \frac{4F}{\pi d^2}$;

Étape 2 : On exprime la fonction à optimiser en fonction des propriétés matériaux (on enlève la variable de conception)

Prix de la barre : $P = \frac{C\rho}{\sigma_e} s l F$; Ici, on a 3 paramètres matériaux à sélectionner.

EXERCICE 1 : BARRE DE TRACTION D'UN VÉHICULE



Une barre de diamètre d et de longueur l est soumise à une force de traction F . Le cahier des charges impose les valeurs de la longueur de la barre $l = 3\text{m}$ et de la force $F = 40\text{ kN}$.

2. On cherche maintenant à réaliser à une barre de moindre coût. En utilisant de nouveau une démarche rigoureuse de choix de matériaux, déterminer le matériau permettant de fabriquer la barre au prix P le plus bas.

Étape 3 : On passe au logarithme.

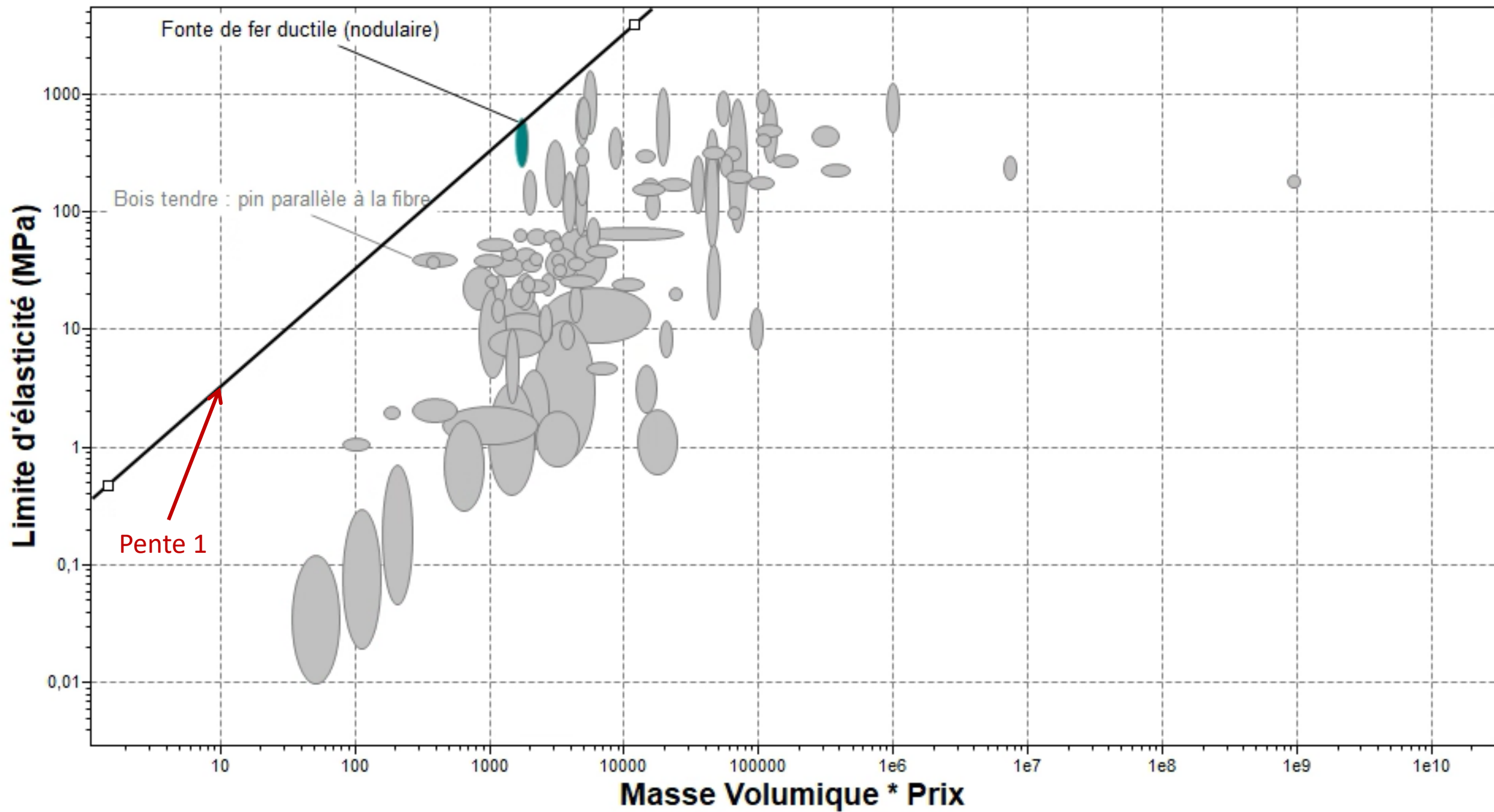
Masse de la barre : $\log(P) = \log(slF) + \log(C\rho) - \log(\sigma_e)$

On réexprimer une propriété en fonction de l'autre : $\log(\sigma_e) = +1\log(C\rho) + \log(slF) - \log(P)$

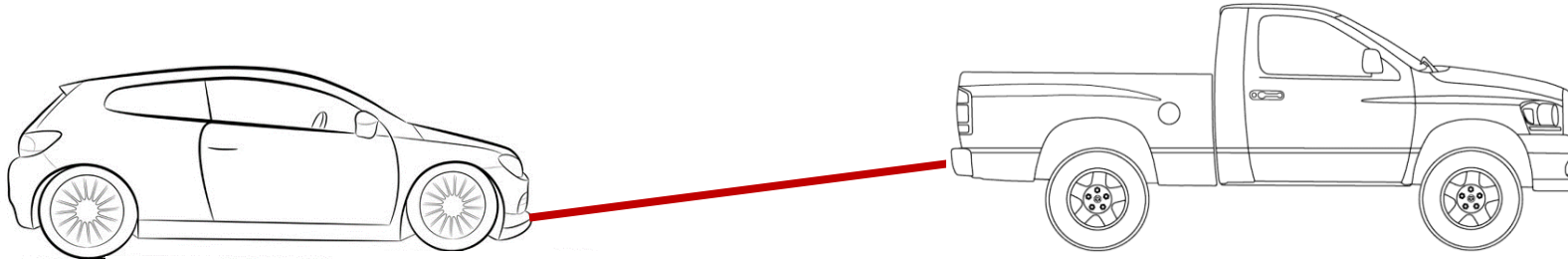
Étape 4 : Utilisation des abaques.

On trace le diagramme log-log limite élastique – (densité x Prix massique)

On considère une pente $+1$ et la droite la plus haute (on maximise la limite élastique et minimise le prix volumique)



EXERCICE 1 : BARRE DE TRACTION D'UN VÉHICULE



Une barre de diamètre d et de longueur l est soumise à une force de traction F . Le cahier des charges impose les valeurs de la longueur de la barre $l = 3\text{m}$ et de la force $F = 40\text{ kN}$.

2. On cherche maintenant à réaliser à une barre de moindre coût. En utilisant de nouveau une démarche rigoureuse de choix de matériaux, déterminer le matériau permettant de fabriquer la barre au prix P le plus bas.

Étape 5 : Conclusion de l'étude dimensionnelle

Le meilleur matériau est donc la fonte de fer ductile.

On trouve la diamètre de la barre à partir de la condition de non rupture : $\frac{\sigma_e}{s} < \frac{4F}{\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{4sF}{\pi\sigma_e}}$

Composition (résumé) ⓘ

Fe/3,2-4,1%C/1,8-2,8%Si/<0,8%Mn/<0,1%P/<0,03%S

Le Matériau

Les fondations de la société industrielle moderne sont, pour ainsi dire, coulées dans la fonte : c'est le matériau qui a rendu possible la révolution industrielle. Aujourd'hui, il détient une seconde distinction : celle d'être le meilleur marché de tous les métaux d'ingénierie. Les fontes de fer contiennent au minimum 2 % de carbone – la plupart en contiennent 3 à 4 % - et de 1 à 3 % de silicium. Le carbone rend le fer très fluide lorsqu'il est fondu, lui permettant d'être coulé dans des formes compliquées.

Il y a cinq classes de fonte de fer : la grise, la blanche, la ductile (ou nodulaire), la malléable et les alliages ; Les détails sont donnés dans la section Guide de Conception, ci-dessous. Les deux types de fontes qui sont les plus utilisées sont la grise et la ductile.

Cette fiche s'applique à la fonte ductile.

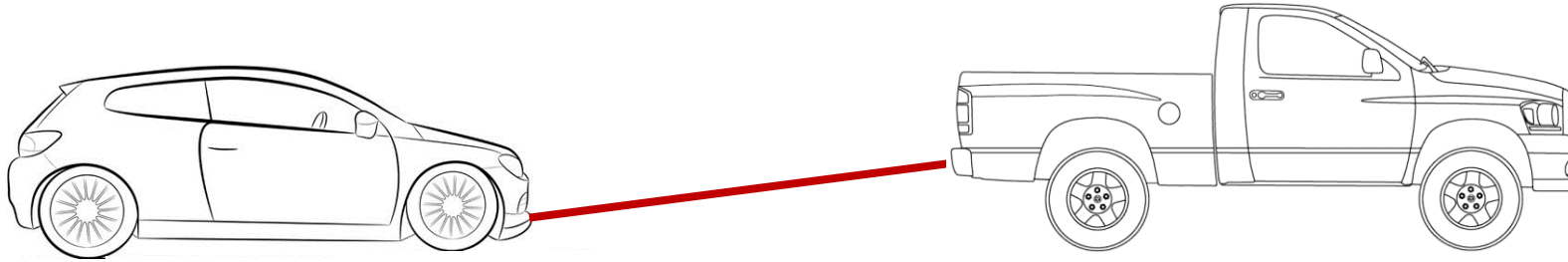
Propriétés générales

Masse Volumique	ⓘ	7,05e3	-	7,15e3	kg/m³
Prix	ⓘ	0,242			EUR/kg
Date de première utilisation	ⓘ	1948			

Propriétés mécaniques

Module de Young	ⓘ	170	-	180	GPa
Module de cisaillement	ⓘ	64	-	71	GPa
Module de compressibilité	ⓘ	120	-	140	GPa
Coefficient de Poisson	ⓘ	0,27	-	0,28	
Limite d'élasticité	ⓘ	246	-	630	MPa
Résistance en traction	ⓘ	400	-	900	MPa
Résistance à la compression	ⓘ	* 273	-	639	MPa
Allongement	ⓘ	2	-	26	% strain
Mesure de dureté Vickers	ⓘ	135	-	290	HV
Limite de fatigue	ⓘ	195	-	317	MPa
Ténacité	ⓘ	23,3	-	51,6	MPa.m ^{0.5}
Coefficient d'amortissement (tan delta)	ⓘ	* 6e-4	-	0,0018	

EXERCICE 1 : BARRE DE TRACTION D'UN VÉHICULE



Une barre de diamètre d et de longueur l est soumise à une force de traction F . Le cahier des charges impose les valeurs de la longueur de la barre $l = 3\text{m}$ et de la force $F = 40\text{ kN}$.

2. On cherche maintenant à réaliser à une barre de moindre coût. En utilisant de nouveau une démarche rigoureuse de choix de matériaux, déterminer le matériau permettant de fabriquer la barre au prix P le plus bas.

Étape 5 : Conclusion de l'étude dimensionnelle

Le meilleur matériau est donc la fonte de fer ductile.

On trouve la diamètre de la barre à partir de la condition de non rupture : $\frac{\sigma_e}{s} < \frac{4F}{\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{4sF}{\pi\sigma_e}} = 1,27\text{ cm}$

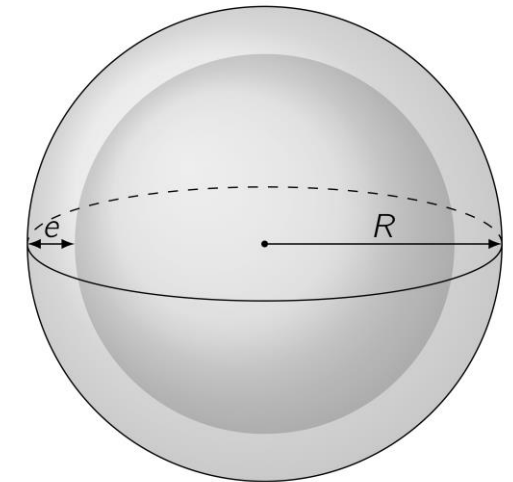
Et le prix $P = C\rho l \frac{\pi d^2}{4} = 6,5\text{ €}$ (On aurait payé 11,38€ pour la barre en composites renforcé en fibres de carbone)

EXERCICE 2 : RÉSERVOIR SOUS PRESSION ET LÉGER

Nous cherchons à concevoir un réservoir pour respirateur de sapeur-pompier. Les considérations de poids prennent le pas sur le coût du matériau. Le réservoir est modélisé par une coque mince, sphérique de rayon R , d'épaisseur e et de pression intérieure p .

Préliminaire :

- Calculer le volume de la paroi du réservoir.
- Déterminer les contraintes de traction dans la paroi en fonction de la pression interne (on néglige la pression externe).

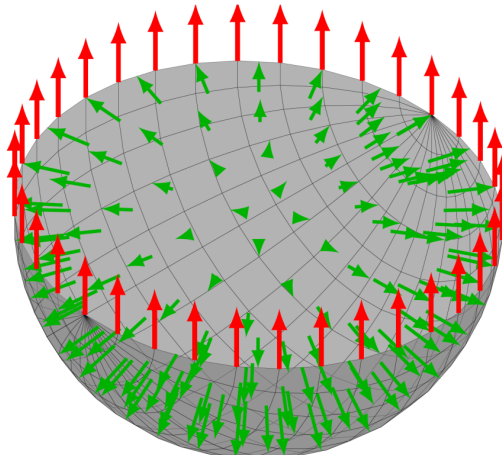
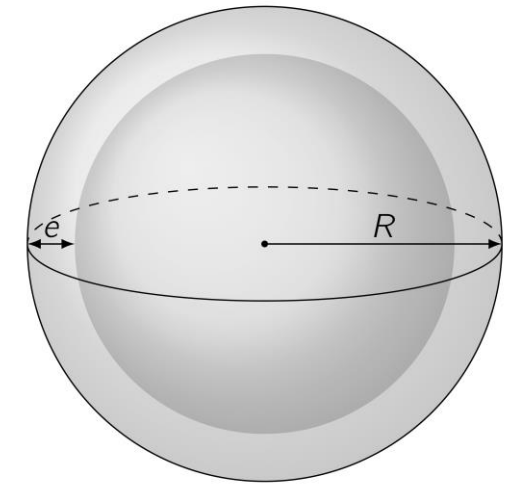


EXERCICE 2 : RÉSERVOIR SOUS PRESSION ET LÉGER

Nous cherchons à concevoir un réservoir pour respirateur de sapeur-pompier. Les considérations de poids prennent le pas sur le coût du matériau. Le réservoir est modélisé par une coque mince, sphérique de rayon R , d'épaisseur e et de pression intérieure p .

Préliminaire :

- Calculer le volume de la paroi du réservoir. $V = 4\pi R^2 e$
- Déterminer les contraintes de traction dans la paroi en fonction de la pression interne (on néglige la pression externe).



Coupons la sphère selon un plan équatorial et écrivons l'équilibre statique entre la résultante de la pression¹ :

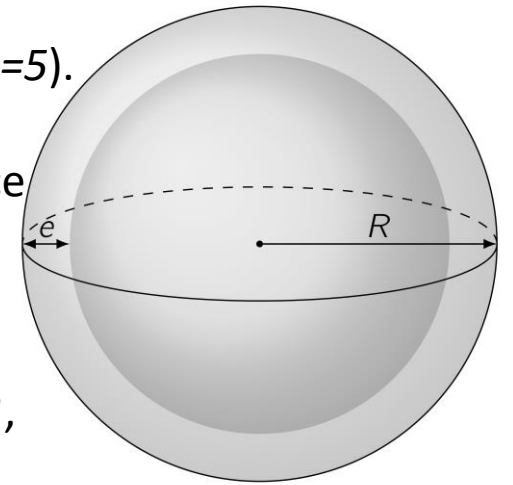
$$2\pi R \sigma = p\pi R^2 \iff \boxed{\sigma = \frac{pR}{2e}} \quad (1)$$

EXERCICE 2 : RÉSERVOIR SOUS PRESSION ET LÉGER

Nous cherchons à concevoir un réservoir pour respirateur de sapeur-pompier. Les considérations de poids prennent le pas sur le coût du matériau. Le réservoir est modélisé par une coque mince, sphérique de rayon $R=30$ cm, d'épaisseur e et de pression intérieure $p = 10^7$ Pa (100 bars).

Aucune déformation irréversible de l'enceinte ne doit se produire (coefficient de sécurité $s=5$).

1. Par une démarche rigoureuse de sélection de matériaux, établir l'indice de performance pour la réalisation d'un réservoir sous pression résistant, le plus léger possible. En déduire une liste classée des 5 meilleurs matériaux et des épaisseurs correspondantes.
2. Pour maximiser le volume utile du réservoir, pour un encombrement total donné par R , on impose de plus une condition de type parois minces : $e < R/20$.
Quelle condition sur la résistance σ_e du matériau cette fonction contrainte impose-t-elle ?
Utiliser ce filtre sur la liste de matériaux établie à la première question.
3. On souhaite désormais réaliser une enceinte résistante aux chocs. En notant $a = 1$ mm la taille minimale des défauts de surface, déterminer une liste classée des 5 meilleurs matériaux. Comparer à la liste obtenue pour un réservoir léger et résistant.

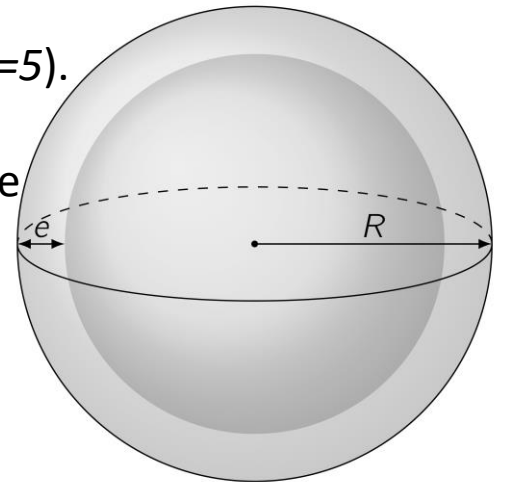


EXERCICE 2 : RÉSERVOIR SOUS PRESSION ET LÉGER

Nous cherchons à concevoir un réservoir pour respirateur de sapeur-pompier. Les considérations de poids prennent le pas sur le coût du matériau. Le réservoir est modélisé par une coque mince, sphérique de rayon $R=30$ cm, d'épaisseur e et de pression intérieure $P = 10^7$ Pa (100 bars).

Aucune déformation irréversible de l'enceinte ne doit se produire (coefficient de sécurité $s=5$).

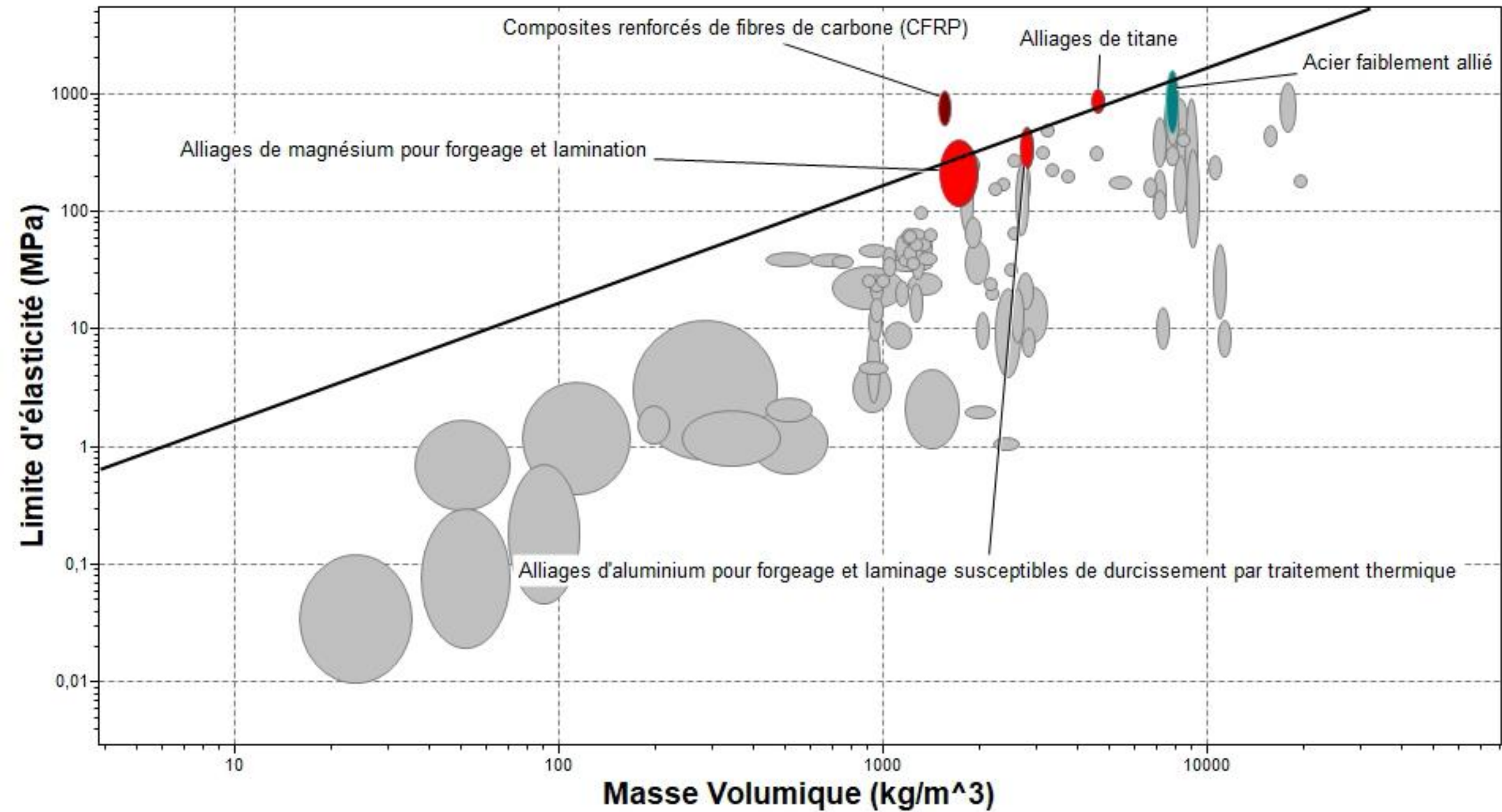
1. Par une démarche rigoureuse de sélection de matériaux, établir l'indice de performance pour la réalisation d'un réservoir sous pression résistant, le plus léger possible. En déduire une liste classée des 5 meilleurs matériaux et des épaisseurs correspondantes.



$$\frac{\sigma_e}{s} > \frac{pR}{2e} \quad \text{et} \quad m = 4\pi R^2 e \rho \quad \text{La fonction à minimiser est} \quad m = \frac{2\pi s P R^3 \rho}{\sigma_e}$$

On passe au log, $\log(\sigma_e) = \log(2\pi s P R^3) + 1 \times \log(\rho) - \log(m)$

- ➡ On trace le diagramme log-log σ_e , R . On trace une droite de pente 1 et on prend la droite la plus en haut à gauche pour minimiser la masse.



EXERCICE 2 : RÉSERVOIR SOUS PRESSION ET LÉGER

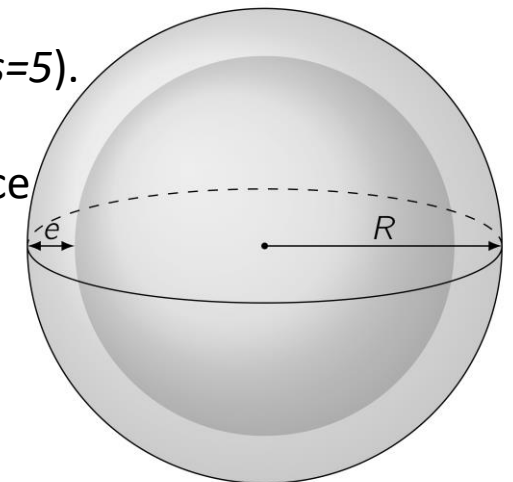
Nous cherchons à concevoir un réservoir pour respirateur de sapeur-pompier. Les considérations de poids prennent le pas sur le coût du matériau. Le réservoir est modélisé par une coque mince, sphérique de rayon $R=30$ cm, d'épaisseur e et de pression intérieure $P = 10^7$ Pa (100 bars).

Aucune déformation irréversible de l'enceinte ne doit se produire (coefficient de sécurité $s=5$).

1. Par une démarche rigoureuse de sélection de matériaux, établir l'indice de performance pour la réalisation d'un réservoir sous pression résistant, le plus léger possible. En déduire une liste classée des 5 meilleurs matériaux et des épaisseurs correspondantes.

$$e = \frac{spR}{2\sigma_e}$$

Matériau	Épaisseur (mm)
Composites fibre de carbone	7,14
Alliages de magnésium	18,3
Alliages d'aluminium	14,4
Alliages de titane	6,88
Acier faiblement allié	4,68

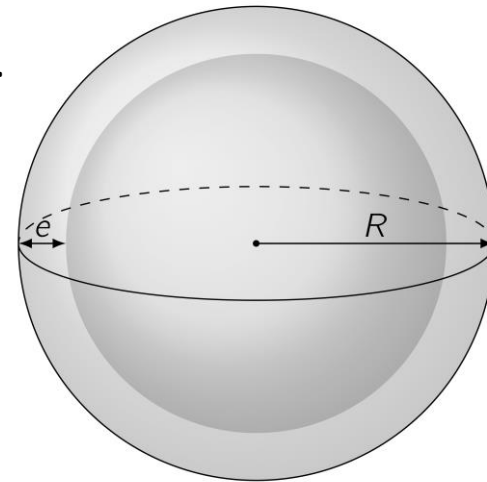


EXERCICE 2 : RÉSERVOIR SOUS PRESSION ET LÉGER

Nous cherchons à concevoir un réservoir pour respirateur de sapeur-pompier. Les considérations de poids prennent le pas sur le coût du matériau. Le réservoir est modélisé par une coque mince, sphérique de rayon $R=30$ cm, d'épaisseur e et de pression intérieure $p = 10^7$ Pa (100 bars).

Aucune déformation irréversible de l'enceinte ne doit se produire (coefficient de sécurité $s=5$).

2. Pour maximiser le volume utile du réservoir, pour un encombrement total donné par R , on impose de plus une condition de type parois minces : $e < R/20$.
Quelle condition sur la résistance σ_e du matériau cette fonction contrainte impose-t-elle ?
Utiliser ce filtre sur la liste de matériaux établie à la première question.



$$\frac{\sigma_e}{s} > \frac{pR}{2e} \quad \text{et} \quad e < \frac{R}{20} \rightarrow \boxed{\frac{\sigma_e}{s} > \frac{pR}{2e} > \frac{p}{10}}$$

Cette condition nous permet d'éliminer les alliages de magnésium.

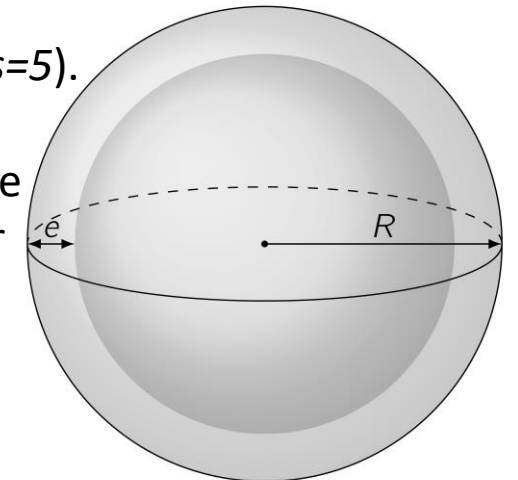
EXERCICE 2 : RÉSERVOIR SOUS PRESSION ET LÉGER

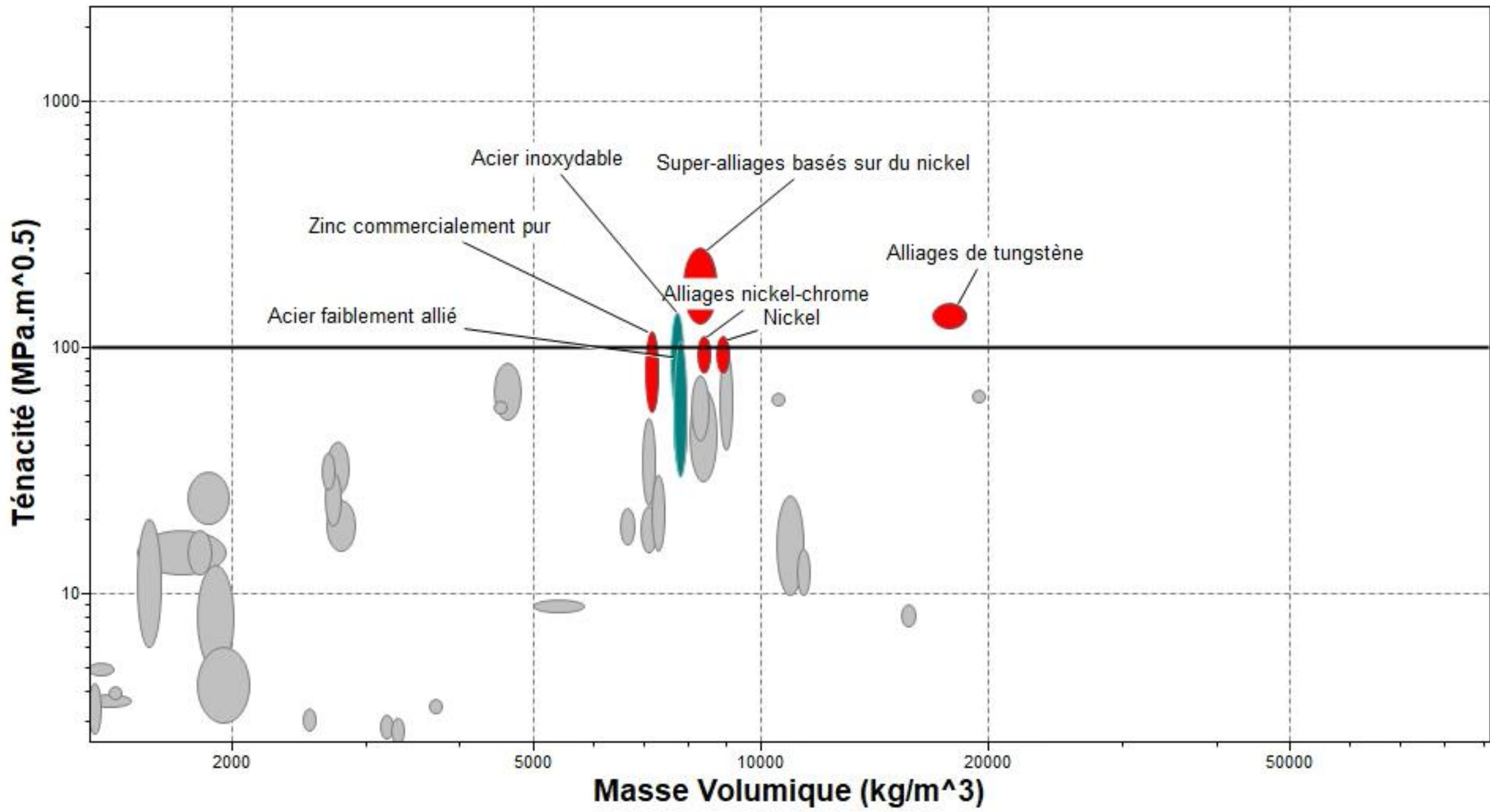
Nous cherchons à concevoir un réservoir pour respirateur de sapeur-pompier. Les considérations de poids prennent le pas sur le coût du matériau. Le réservoir est modélisé par une coque mince, sphérique de rayon $R=30$ cm, d'épaisseur e et de pression intérieure $p = 10^7$ Pa (100 bars).

Aucune déformation irréversible de l'enceinte ne doit se produire (coefficient de sécurité $s=5$).

3. On souhaite désormais réaliser une enceinte résistante aux chocs. Déterminer une liste classée des 5 meilleurs matériaux. Comparer à la liste obtenue pour un réservoir léger et résistant.

Indication : La résistance à la cassure fragile est la ténacité, en $\text{Pa}\cdot\text{m}^{1/2}$





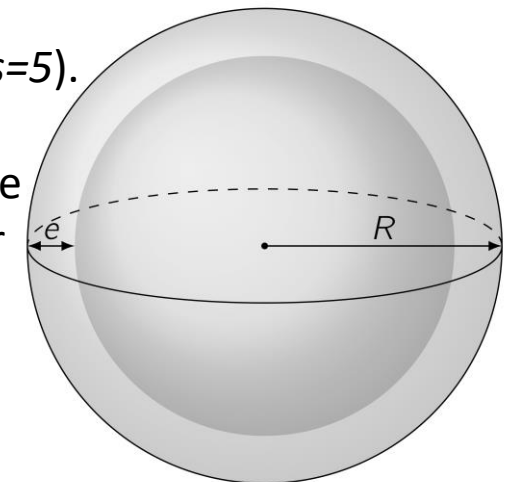
EXERCICE 2 : RÉSERVOIR SOUS PRESSION ET LÉGER

Nous cherchons à concevoir un réservoir pour respirateur de sapeur-pompier. Les considérations de poids prennent le pas sur le coût du matériau. Le réservoir est modélisé par une coque mince, sphérique de rayon $R=30$ cm, d'épaisseur e et de pression intérieure $p = 10^7$ Pa (100 bars).

Aucune déformation irréversible de l'enceinte ne doit se produire (coefficient de sécurité $s=5$).

3. On souhaite désormais réaliser une enceinte résistante aux chocs. Déterminer une liste classée des 5 meilleurs matériaux. Comparer à la liste obtenue pour un réservoir léger et résistant.

Indication : La résistance à la cassure fragile est la ténacité, en $\text{Pa}\cdot\text{m}^{1/2}$



Conclusion : le meilleur matériau pour avoir un réservoir léger et résistants aux chocs sont les aciers faiblement alliés

EXERCICE 3 : CÂBLE ÉLECTRIQUE À FAIBLE COÛT

On souhaite réaliser au plus bas coût un câble électrique aérien. Afin de limiter les pertes électriques, on impose que la résistance électrique d'un kilomètre de câble soit inférieure à une valeur critique R_0 . La résistance électrique d'un fil de section S , de longueur L et de résistivité ρ_e est donnée par : $R = \rho_e L/S$.

1. Formaliser le prix du câble.
2. La section du câble est libre. Déterminer les paramètres matériaux à optimiser et écrire la loi logarithmique.
3. Tracer les abaques matériau avec CES GRANTA.
4. Etablir une liste classée des 5 meilleurs matériaux pour la fonction « limiter les pertes électriques à bas coût ».

EXERCICE 4 : CÂBLE D'ASCENSEUR

On souhaite identifier quel est le meilleur métal pour fabriquer un câble d'ascenseur. Un tel câble ne doit pas se déformer plastiquement, et on prend pour cela un coefficient de sécurité s . On cherche dans cette étude à maximiser le coefficient de sécurité. De plus, pour des raisons de dimensionnement de la cage d'ascenseur, on souhaite que le câble se déforme en fonctionnement d'un allongement inférieur à une valeur limite Δl . On connaît la longueur du câble l et la masse m de la cabine de l'ascenseur.

1. Par une démarche rigoureuse, déterminer les 5 meilleurs métaux répondant à ce cahier des charges et permettant de maximiser le coefficient de sécurité.

Pour les questions 2 et 3, on considère un câble de longueur $l = 20\text{m}$, une cabine de masse $m = 500\text{ kg}$ et un allongement imposé $\Delta l = 1\text{ cm}$.

2. Quel est le coefficient de sécurité obtenu avec le meilleur matériau ? (Donner les valeurs des paramètres matériaux considérées pour le calcul)

3. Calculer la section minimale de câble avec le meilleur matériau.

EXERCICE 5 : VÉRIN HYDRAULIQUE D'UN AVION

Les déflecteurs et inverseurs de poussée des moteurs d'avion sont contrôlés par des vérins hydrauliques. Les forces requises pour inverser la poussée peuvent être importantes, les vérins (généralement au nombre de 4 par moteur) sont donc lourds. La tige de piston, identifiée sur la figure ci-contre, est une des parties les plus lourdes des vérins.

Cette pièce est soumise à des charges axiales uniquement (force notée F) et est généralement conçue comme un tube (cylindre creux à paroi fine, de rayon R et de parois d'épaisseur t) pour en limiter le poids. La longueur L et le rayon R de cette tige sont imposés. t est laissé libre. La section de la tige doit être suffisante pour éviter la rupture en compression du matériau. On notera σ_c la résistance en compression du matériau. On souhaite par ailleurs :

- Éviter le flambage des tubes : on impose donc de plus que la rigidité spécifique du matériau (E/ρ) doit être supérieure à $0,001 \text{ GPa.kg}^{-1} \cdot \text{m}^3$,
- Utiliser ces tubes à des températures allant jusqu'à 400°C .

Actuellement, ces tiges sont faites en acier.

1. Déterminez par une démarche rigoureuse quels matériaux permettraient d'obtenir des tiges de piston plus légères que celles faites en acier.

2. Donner le rapport des masses entre deux tiges de piston, répondant au cahier des charges, dont une est faite en alliage de Titane et l'autre est faite en Tungstène.

PROBLÈME 1 : CONCEPTION D'UN TÉLESCOPE

Le miroir du télescope du mont Pastoukhov, situé dans le Caucase russe (altitude 2070 m), mis en service en 1976, est en verre. Son diamètre est de 6 m, son épaisseur de 1 m et il pèse 70 tonnes. Le coût total du télescope est d'environ 280 M\$. Le miroir lui-même ne représente que 5% de ce prix, le reste correspondant au coût du système de positionnement. La précision de ce dernier doit en effet être de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière ($\sim 1 \mu\text{m}$). On note que le prix total du télescope est environ proportionnel à la masse du miroir au carré.

En fait, le verre n'est utilisé dans ce télescope pour que pour ses propriétés mécaniques. Précisément, sa grande rigidité limite les déformations, source d'aberrations optiques. Les 70 tonnes de verre ne servent que de support à une couche de 100 nm d'épaisseur d'argent déposée à sa surface (30 g !). Or l'origine de la déformation du miroir est simplement l'affaissement sous son propre poids. On cherche ainsi à minimiser la masse m du miroir par une démarche rigoureuse de choix de matériaux.

On considère le miroir comme un disque de diamètre $2r$ et d'épaisseur e . La déflexion en son centre est δ , inférieure à la longueur d'onde de la lumière ($\delta < 1 \mu\text{m}$). On réalise ceci à l'aide d'une quinzaine de vérins hydrauliques qui compensent partiellement les déformations suivant la position du miroir. Ce système autorise une déformation maximale au centre de $\delta_{\text{max}} = 10 \mu\text{m}$ en l'absence d'action des vérins.

Pour un matériau dont le coefficient de Poisson est $\nu = 1/3$, la déformation est donnée par : $\delta_{max} = \frac{3mgr^2}{4\pi Ee^3}$

L'objectif est donc de minimiser la masse du miroir. Le matériau devra en outre présenter une faible dilatation thermique. Le diamètre du miroir est fixé par les exigences optiques (6m). Par contre son épaisseur est librement ajustable.

1. **Préliminaire** : Formaliser le calcul de la masse du télescope (miroir cylindrique).
2. Déterminer les paramètres matériaux à optimiser et écrire la loi logarithmique.
3. Tracer les abaques matériau avec CES GRANTA.
4. Parmi les 5 meilleurs matériaux déterminer celui avec le coefficient de dilatation thermique minimal.
5. Déterminer l'épaisseur du miroir avec ce matériau.

Les astronomes européens souhaitaient disposer d'un télescope de 16 m de diamètre pour un coût "raisonnable". En adoptant la démarche précédente, cette réalisation était impensable. La solution adoptée, financée et installée à Cerro Paranal au Chili (altitude 2635 m) par l'Union Européenne, mise en service en 2001, consiste à utiliser non pas un seul mais 4 miroirs de télescope (VLT = Very Large Telescope).

On peut montrer que ces 4 miroirs de diamètre $2r = 8,2$ m qui visent la même étoile sont équivalents du point de vue de la résolution angulaire à un miroir de 16 m de diamètre. Ces miroirs et leur support sont construits en Europe. Les miroirs en verre Zérodur (verre à faible coefficient de dilatation) ont été coulés par Schott à Mayence en Allemagne. Ils ont été refroidis de 800 à 25°C en 3 mois. Ils ont ensuite été transportés en France pour être polis par Reosc en banlieue parisienne puis expédiés au Chili. Les supports ont été construits en France en forme de treillis mécanosoudés par laser par Giat industrie.

6. Si l'on considère que la fonction objectif déterminée ci-dessus est toujours valable, combien de fois plus cher sera le VLT par rapport au télescope du mont Pastoukhov ?