



---

# Cours

---

## CHAPITRE 7

### *Matériaux*



## CHAPITRE 7

### Matériaux



Généralités _____	1
Masse volumique – densité _____	2
Dilatation _____	3
Essai de traction _____	4

Annexes :

**A1** Propriétés physiques (*masse volumique, Coefficient de dilatation linéaire, Coefficient de conductivité thermique, Masse molaire*)

**A2** Propriétés physiques (*Viscosité dynamique et cinématique, Capacité thermique massique*)

**A3** Propriétés physiques (*Pouvoir calorifique inférieur*)

**A4** Propriétés mécaniques (*Résistance élastique, Résistance au glissement, module d'Young, coefficient de poisson*)

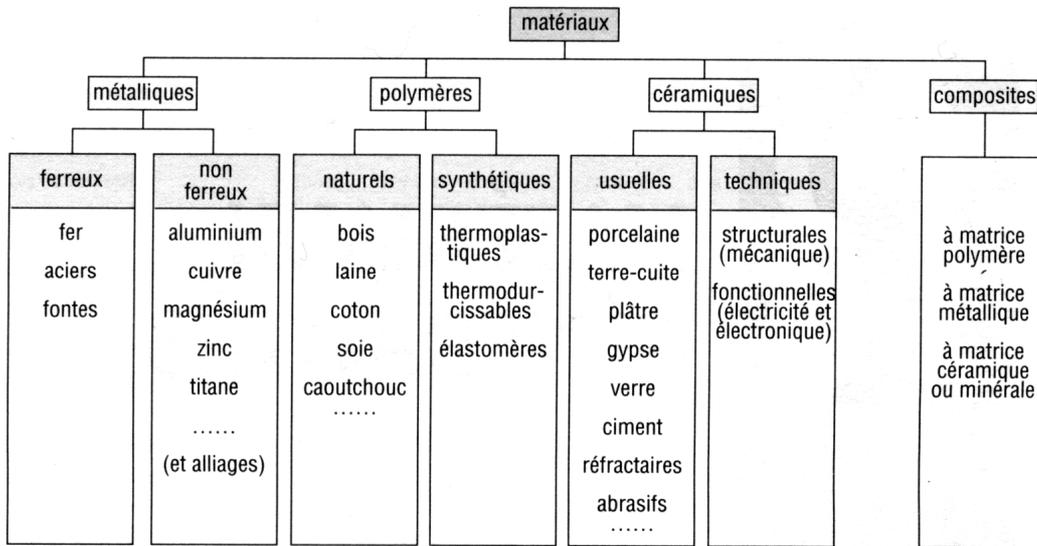


# MATERIAUX

## Généralités

### 1 – PREAMBULE

Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel (mécanique, électronique, aéronautique, navale, ...). Les systèmes rencontrés, aussi bien dans le secteur industriel que dans celui des biens de grande consommation, sont constitués de pièces réalisés en **métal** (acier, alliages légers ou de cuivre) ou en **plastique**. Par ailleurs, d'autres matériaux peuvent être utilisés, tels que les **céramiques**, les **élastomères** ou encore les **composites**.



*Le choix d'un matériau pour une pièce fait intervenir des critères à la fois techniques mais aussi économiques (prix actuel, variation du prix dans le temps en fonction de la disponibilité, ...); le choix d'un matériau est donc une tâche complexe.*

### 2 – PRINCIPAUX MATERIAUX INDUSTRIELS

#### \* Les métaux

Ils présentent des caractéristiques mécaniques très élevées (comme la rigidité ou la dureté), y compris à des hautes températures.



Cadène pour voilier

Symboles chimiques et métallurgiques, densité des métaux usuels							
corps	symbole chimique	symbole métallurgique	densité	corps	symbole chimique	symbole métallurgique	densité
aluminium	Al	A	2,7	manganèse	Mn	M	7,2
béryllium	Be	Be	1,85	molybdène	Mo	D	10,2
bore	B	B	2,35	nickel	Ni	N	8,9
cadmium	Cd	Cd	8	phosphore	P	P	1,88
carbone graphite	C	-	2,24	platine	Pt	-	21,5
carbone diamant	C	-	3,5	plomb	Pb	Pb	11,34
chrome	Cr	C	7,1	silicium	Si	S	2,4
cobalt	Co	K	8,9	soufre	S	F	2,1
cuivre	Cu	U	9	titane	Ti	T	4,5
étain	Sn	E	6 à 7,5	tungstène	W	W	19,3
fer	Fe	Fe	7,8	vanadium	V	V	5,9
lithium	Li	L	0,534	zinc	Zn	Z	7,15
magnésium	Mg	G	1,75	zirconium	Zr	Zr	6,5

#### \* Les plastiques

⇒ Les **THERMOPLASTIQUES** qui, sous l'effet de la chaleur, se ramollissent et se solidifient de façon réversible. (plexiglas (PMMA), PVC, ...)

⇒ Les **THERMODURCISSABLES** qui sont mis en œuvre sous réaction chimique et donc ne peuvent pas être remodelés (polyester (UP), polyuréthane (PUR), ...)



Corps de pompe en PPA

### \* Les céramiques

Elles sont utilisées dans la fibre optique, les outils de coupe (en productique), comme abrasifs, isolants, écran thermique, prothèses osseuses.

Les traitements céramiques sur pièces mécaniques (pales de turbo ou compresseur, queue de soupape) soumises à friction permettent de réduire l'échauffement et l'usure, la fiabilité est améliorée.

### \* Les composites

Ils sont composés d'un matériau de base appelé MATRICE (polymère, céramique ou métal) et d'un renfort (fibre, agrégats, ...). Les deux corps, de structure différente, ne se mélangent pas comme c'est le cas des alliages métalliques.

Exemples :

- ⇒ *béton armé (béton + armature métallique),*
- ⇒ *pneu (élastomère + toile + fils d'acier),*
- ⇒ *équipement sportifs (ski, raquette, ...).*

Composites à matrices polymères : le renfort peut être de la **fibre de verre** (économique), de la **fibre de carbone** (applications pointues car coûteuse) ou de la **fibre organique** (comme le kevlar, compromis entre les deux premiers).



## 3 – PROPRIETES DES MATERIAUX

Elles sont très nombreuses ; l'ingénieur ou le technicien se doit de les connaître, au moins les principales.

- ⇒ **Physiques** : masse volumique, pouvoir oxydant, etc.
- ⇒ **Thermiques** (et thermodynamiques) : coefficient de dilatation, conductivité thermique, point d'ébullition, etc.
- ⇒ **Optiques** : luminosité, photosensibilité, etc.
- ⇒ **Mécaniques** : limite élastique, module d'élasticité, coefficient de poisson, allongement à la rupture, dureté, ductilité, etc.
- ⇒ **Electriques et magnétiques** : résistance, perméabilité magnétique, point de curie, etc.
- ⇒ Etc.

## 4 – DEFINITIONS (A CONNAITRE)

- ⇒ **Homogénéité** : un matériau est homogène si ses propriétés sont identiques en tout point.
- ⇒ **Isotropie** : un matériau est isotrope si ses propriétés sont identiques dans toutes les directions.
- ⇒ **Elasticité** : un matériau a un comportement élastique si ses déformations sont réversibles (capacité à retrouver sa forme d'origine lorsque cessent les efforts ayant généré un état de déformation).
- ⇒ **Elasticité linéaire** : un matériau a un comportement élastique linéaire si ses déformations sont proportionnelles aux sollicitations qu'il subit (assez vrai pour de petites déformations).

**1 – MASSE VOLUMIQUE – HOMOGENEITE**

La matière, qu'elle soit solide liquide ou gazeuse occupe un certain volume quand on en prend une certaine quantité. On constate par ailleurs qu'à quantité égale, les masses ne sont pas les mêmes.

⇒ Par exemple,  $1 \text{ m}^3$  de plomb n'a pas la même masse que  $1 \text{ m}^3$  d'eau ou  $1 \text{ m}^3$  de chêne (bois).

⇒ De même,  $1 \text{ kg}$  de plomb n'occupe pas le même volume que  $1 \text{ kg}$  d'eau ou  $1 \text{ kg}$  de chêne (bois).

**\* Formule**

Pour caractériser la matière au regard de cette différence, on introduit une propriété appelée « masse volumique » :

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Masse ( $\text{kg}$ )

Volume ( $\text{m}^3$ )

Masse volumique ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

*Cette relation est valable pour une substance homogène. D'ailleurs, par définition, un milieu matériel est déclaré **homogène** si sa masse volumique est la même en tout point.*

**\* Unités**

L'unité légale est le  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  mais on rencontre souvent le  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , le  $\text{kg} \cdot \text{l}^{-1}$  ou la  $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**\* Dépendance à la température**

⇒ Pour les **solides et liquides**, la masse volumique dépend de la température car, en s'échauffant par exemple, on observe une augmentation du volume (voir coefficient de dilatation) alors que la masse reste la même. La masse volumique a tendance à diminuer lorsque la température du solide ou du liquide augmente.

Cela dit, l'effet reste très accessoire. A titre d'exemple, une variation de température de  $100 \text{ K}$  appliquée à un volume de  $1 \text{ m}^3$  de bronze (alliage de cuivre) génère une variation de volume  $\approx 5 \cdot 10^{-13} \%$ .

⇒ Pour les **gaz**, c'est un peu plus compliqué car une même masse peut être contenue dans un volume différent.

L'expression de la masse volumique d'un gaz s'obtient en combinant la formule générale  $\rho = M/V$  et l'équation d'état des gaz parfaits. On obtient alors :

$$\rho = \frac{M \cdot p}{R \cdot T}$$

Masse molaire (*mol*)  
 Pression (*Pa*)  
 Masse volumique ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
 Température (*K*)  
 Constante des gaz parfaits ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

Constante des gaz parfaits :  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

## 2 – DENSITE

### \* Définition

Par définition, la densité est égale au rapport de la masse volumique de la substance rapportée à celle d'une autre prise comme référence.



$$d = \frac{\rho_{\text{substance}}}{\rho_{\text{référence}}}$$

⇒ Pour les **solides et liquides**, la substance de référence est l'eau avec, dans ce cas,  $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

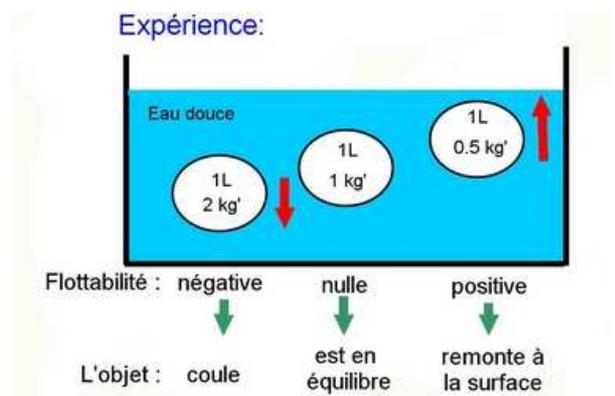
⇒ Pour les **gaz**, la substance de référence est l'air à la température de  $0^\circ\text{C}$  et sous une pression de  $760 \text{ mmHg}$  soit,  $\rho_{\text{air}} = 1,293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

### \* Unité

La densité étant le rapport de deux grandeurs identiques, elle n'a pas d'unité.

### \* Indicateur de flottabilité

On montre que les corps dont la densité  $d_{\text{corps}}$  est inférieure à celle d'un liquide  $d_{\text{liq}}$  flotte (si on les enfonce, il remonte à la surface libre).



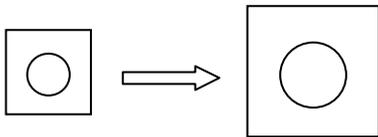


### 1 – DESCRIPTION QUALITATIVE DU PHENOMENE

La plupart des matériaux se dilatent lorsque leur température s'élève. Les rails de chemins de fer, les ponts et les mécanismes d'horloge comportent tous des moyens de compenser cette dilatation thermique. La figure ci-contre montre ce que peut devenir une voie de chemin de fer par temps chaud.



Lorsqu'un objet homogène se dilate, la distance entre *n'importe quelle* paire de points de l'objet augmente.



Il en va de même pour un bloc de métal percé d'un trou : le trou s'est agrandi dans les mêmes proportions que les autres dimensions du bloc (il n'est pas devenu plus petit).

### 2 – COEFFICIENT DE DILATATION LINEAIRE

On peut étudier la dilatation d'un solide en fonction de la variation d'une dimension linéaire quelconque. Considérons une tige mince de longueur initiale  $L_0$ . On peut montrer que la variation de longueur  $\Delta L$  est directement proportionnelle à  $L_0$  et à la variation de température  $\Delta T$ , ce qu'on peut exprimer sous la forme :  $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$

Où  $L_0$  est la longueur initiale et  $\alpha$ , mesuré en  $(^\circ\text{C})^{-1}$  ou  $\text{K}^{-1}$ , est appelé **coefficient de dilatation linéaire** (ou linéique).

⇒ La longueur totale pour toute température est obtenue avec :  $L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$

### 3 – COEFFICIENT DE DILATATION VOLUMIQUE

La dilatation thermique des solides et des fluides s'exprime en fonction de la variation de volume  $\Delta V$ , qui est proportionnelle à la variation de température  $\Delta T$  :  $\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T$

Où  $V_0$  est le volume initial et  $\gamma$ , mesuré en  $(^\circ\text{C})^{-1}$  ou  $\text{K}^{-1}$ , est appelé **coefficient de dilatation volumique**.

On montre que pour les **solides isotropes**, on a :  $\gamma = 3 \cdot \alpha$

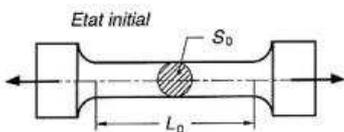


## 1 – CONDUITE DE L'ESSAI DE TRACTION

Conduite de l'essai : Il s'agit de prendre un échantillon d'un matériau donné (solide) et de tirer dessus lentement jusqu'à sa rupture. L'essai de traction est donc un essai destructif (contrairement à d'autres).

Durant l'essai, on mesure à chaque instant l'allongement  $\Delta l$  de l'échantillon (en mm) et la force  $F$  appliquée (en N). On est donc capable de tracer la courbe de la force en fonction de l'allongement :  $F(\Delta l)$ .

Dans la pratique on préfère tracer en fait la contrainte  $\sigma$  (en MPa) en fonction de la déformation  $\varepsilon$  (sans unité) :  $\sigma(\varepsilon)$ .



Les dimensions de l'éprouvette sont normalisées : section initiale  $S_0$  et longueur initiale  $L_0$ .

On utilise une machine spéciale pour réaliser l'essai.



$\Rightarrow$  La **contrainte**  $\sigma$  est le rapport de la force exercée  $F$  par la surface  $S_0$  sur laquelle elle s'applique :  $\sigma = \frac{F}{S_0}$

Unités pratiques :  $F$  en N ;  $S$  en  $mm^2$  ;  $\sigma$  en MPa ( $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N} \cdot mm^{-2}$ )

$\Rightarrow$  La **déformation**  $\varepsilon$  est le rapport de l'allongement  $\Delta l$  par la longueur initiale de l'éprouvette  $L_0$  :  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0}$

Unités pratiques :  $\Delta l$  en mm ;  $L_0$  en mm ;  $\varepsilon$  sans unité

## 2 – RESULTATS DE L'ESSAI DE TRACTION

Sur la courbe page suivante, on observe deux domaines : le **domaine élastique** et le **domaine plastique**.

\* Le **domaine élastique**, caractérisé par une proportionnalité entre la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\varepsilon$ . Si la pièce est sollicitée dans ce domaine et qu'on arrête l'effort, elle reprendra ses dimensions initiales comme si rien ne s'était passé. La linéarité du domaine élastique s'exprime à l'aide d'une équation de droite :  $\sigma(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon + b$ . Comme la droite passe par l'origine (car pas de déformation si pas d'effort), alors  $b = 0$  et on a :  $\sigma(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon$ . Dans la pratique, le coefficient directeur de la droite,  $a$ , est en fait noté  $E$  et s'appelle « **module d'élasticité** » ou encore « **module d'Young** ». Plus  $E$  est grand, plus le matériau est « raide », plus il s'oppose à ce qu'on le déforme :

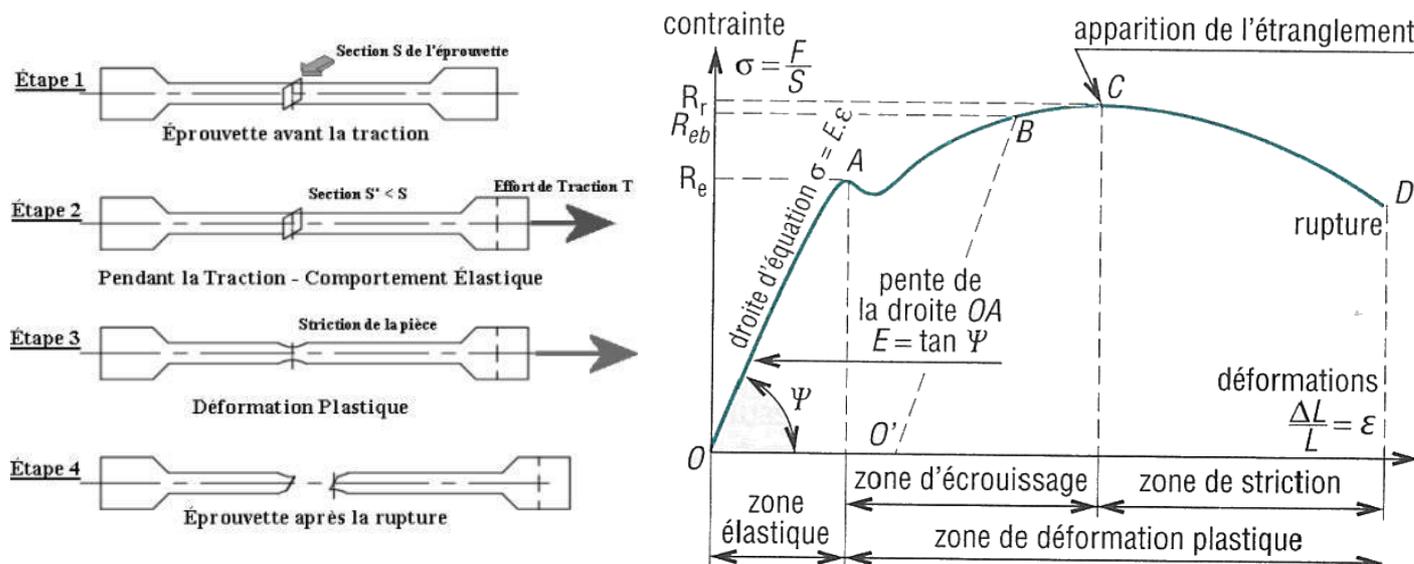
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

MPa ———— ↑ ———— MPa

Cette formule, importante, s'appelle la **loi de Hooke** et constitue un élément de base en **RDM**.

La fin du domaine élastique se caractérise par la limite  $R_e$  appelée « **Résistance élastique** » ; chaque matériau possède sa propre limite  $R_e$  (voir tableau). On distingue aussi la limite  $R_r$  ; il s'agit de la « **Résistance à la rupture** », notée aussi  $R_m$  pour « **Résistance mécanique** ». On a logiquement toujours  $R_m > R_e$ .

\* Le **domaine plastique**, caractérisé par une non linéarité entre la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\varepsilon$  ; ici, la pièce commence à casser ; si on arrête l'effort, on observera une déformation permanente ; la pièce est fragilisée. Selon son étendu, on parle de matériaux **ductiles** ou **fragiles**.

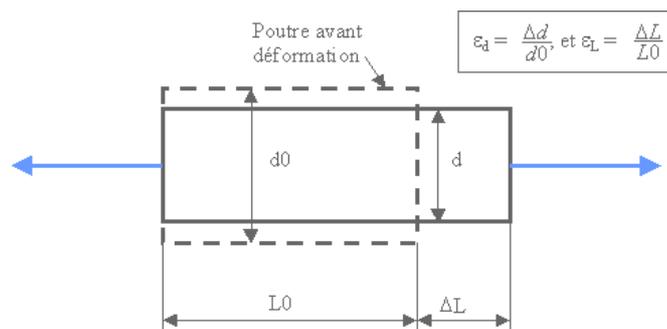


### Coefficient de Poisson

Sous l'effort de traction, l'éprouvette s'allonge de  $\Delta L$  mais on observe aussi un rétrécissement transversal  $\Delta d$  plus ou moins marqué selon le matériau testé.

On note alors  $\nu$  (nu) le coefficient de Poisson tel que :

$$\nu = \frac{\Delta d / d_0}{\Delta L / L_0}$$



Les résultats de l'essai de traction sont fondamentaux en RDM pour dimensionner les pièces : la condition de résistance est  $\sigma \leq R_{pe}$  où  $R_{pe}$  est la « **Résistance Pratique à l'Extension** » ; ce n'est rien de plus que la limite élastique  $R_e$  mais affectée d'un coefficient de sécurité  $S$  :  $R_{pe} = R_e / S$ .  
 ⇒ Voir RDM pour plus d'informations.



## Propriétés physiques – Valeurs

# A1

masses volumique, masse molaire

coefficients de dilatation linéaire, coefficient de conductivité thermique

### 1 – Masse volumique $\rho$

Sauf indications contraires, les masses volumiques sont données pour des corps à la température de 20°C, sous la pression atmosphérique normale.

Métaux et alliages	masse volumique
	kg/m <sup>3</sup>
acier	7 850
acier rapide HSS	8 400 - 9 000
fonte	6 800 - 7 400
aluminium	2 700
argent	10 500
bronze	8 400 - 9 200
carbone (diamant)	3 508
carbone (graphite)	2 250
constantan	8 910
cuivre	8 920
Duralumin	2 900
fer	7 860
iridium	22 640
laiton	7 300 - 8 400
lithium	530
magnésium	1 750
mercure	13 545,88
molybdène	10 200
nickel	8 900
or	19 300
osmium	22 610
palladium	12 000
platine	21 450
plomb	11 350
potassium	850
tantale	16 600
titane	4 500
tungstène	19 300
uranium	18 700
vanadium	6 100
zinc	7 150

Matières plastiques	masse volumique
	kg/m <sup>3</sup>
Polypropylène	850 - 920
Polypropylène basse densité	890 - 930
Polypropylène haute densité	940 - 980
ABS	1 040 - 1 060
Polystyrène	1 040 - 1 060
Nylon 6,6	1 120 - 1 160
Polyacrylate de méthyle	1 160 - 1 200
PVC + plastifiant	1 190 - 1 350
Polyéthylène/téréphtalate	1 380 - 1 410
PVC	1 380 - 1 410
Bakélite	1 350 - 1 400

Roches, minéraux corps usuels	masse volumique
	kg/m <sup>3</sup>
ardoise	2 700 - 2 800
amiante	2 500
argile	1 700
béton	2 300 (armé 2 400)
calcaire	2 600 - 2 700
craie	1 250
granite	2 600 - 2 700
Grès	2 600
kaolin	2 260
marbre	2 650 - 2 750
quartz	2 650
pierre ponce	910
porcelaine	2 500
sable	1 600
terre végétale	1 250
verre à vitres	2 530

Bois	masse volumique
	kg/m <sup>3</sup>
acajou	700
buis	910 - 1 320
cèdre	490
chêne	610 - 980
chêne (cœur)	1 170
ébène	1 150
frêne	840
hêtre	800
liège	240
peuplier	390
pin	740
platane	650
sapin	450
teck	860

Gaz à 0°C	masse volumique	
	kg/m <sup>3</sup>	
acétylène		1,170
air		1,293
air à 20°C		1,204
ammoniac		0,77
argon		1,7832
diazote		1,250 51
isobutane		2,670
butane (normal)		2,700
dioxyde de carbone		1,976 9
vapeur d'eau à 100°C		0,5977
hélium		0,178 5
dihydrogène		0,0899
krypton		3,74
néon		0,90
monoxyde de carbone		1,250
ozone		2,14
propane		2,01
radon		9,73

Liquides	masse volumique	
	kg/m <sup>3</sup>	
acétone		790
acide acétique		1 049
azote à -195°C		810
brome à 0°C		3 087
eau		1 000
eau de mer		1 030
essence		750
éthanol		789
éther		710
gasoil		850
glycérine		1 260
hélium à -269°C		150
huile d'olives		920
hydrogène à -252°C		70
lait		1 030
oxygène à -184°C		1 140

## 2 – Coefficient de dilatation linéaire $\alpha$

Matériau	Coefficient de dilatation thermique linéaire [K <sup>-1</sup> ]
acier	11.10 <sup>-6</sup>
aluminium	23.10 <sup>-6</sup> à 25.10 <sup>-6</sup>
argent	19.10 <sup>-6</sup>
béton	10.10 <sup>-6</sup>
bois (chêne, épicéa, érable)	35.10 <sup>-6</sup> à 55.10 <sup>-6</sup>
bronze	14.5.10 <sup>-6</sup> à 17.5.10 <sup>-6</sup>
carbure de silicium (SiC)	2.8.10 <sup>-6</sup>
cuivre	16.6.10 <sup>-6</sup>
diamant (C)	1.10 <sup>-6</sup>
durnico (X2NiCoMo18-9-5)	9.5.10 <sup>-6</sup>
fonte grise	9.10 <sup>-6</sup>
granit	5.10 <sup>-6</sup> à 9.10 <sup>-6</sup>
invar	2.10 <sup>-6</sup>
laiton	18.10 <sup>-6</sup> à 19.10 <sup>-6</sup>
magnésium	25.10 <sup>-6</sup>
manganèse	23.10 <sup>-6</sup>
marbre	6.10 <sup>-6</sup> à 26.10 <sup>-6</sup>
molybdène	4.8.10 <sup>-6</sup>
nickel	13.10 <sup>-6</sup>
nylon	30.10 <sup>-6</sup> à 70.10 <sup>-6</sup>
or	14.2.10 <sup>-6</sup>
polyéthylène (PE)	280.10 <sup>-6</sup>
platine	9.10 <sup>-6</sup>
plexiglas	68.10 <sup>-6</sup>
plomb	29.10 <sup>-6</sup>
polypropylène (PP)	150.10 <sup>-6</sup>
polystyrène (PS)	60.10 <sup>-6</sup> à 80.10 <sup>-6</sup>
PVC	78.10 <sup>-6</sup>
saphir	5.3.10 <sup>-6</sup>
silicium	3.10 <sup>-6</sup>
titane	8.6.10 <sup>-6</sup>
tungstène	4.5.10 <sup>-6</sup>
Verre pyrex	4.10 <sup>-6</sup> à 9.10 <sup>-6</sup>
Zinc	35.10 <sup>-6</sup>

## 3 – Coefficient de conductivité thermique $\lambda$

Matériau	Coefficient de conductivité thermique [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Air	0,025
Polystyrène	0,033
Mousse de polyuréthane	0,025
Verre	1,05
Granite - Pierre	2,20
Brique (terre cuite)	0,84
Béton	0,92
Acier inoxydable	13,4
Plomb	34,3
Aluminium	226
Cuivre	398
Carton	0,07
Paille - Liège - Laine de verre	0,04
Bois de chêne	0,16
Bois de pin (//, $\perp$ fibres)	0,36 - 0,15
eau (20°C)	0,6
eau (60°C)	0,65
eau (100°C)	0,67
Benzène (22°C)	0,16
Mercure (0°C)	8,1

## 4 – Masse molaire $M$

Gaz	Masse molaire [kg.m <sup>-3</sup> ]
Air sec (composé)	28,960
Azote	28,000
Oxygène	32,000
Hydrogène	2,016
Dioxyde de carbone	44,010
Argon	39,950
Néon	20,100
Xénon	131,300
Krypton	83,800
Hélium	4,003

**Rappel :** la **masse molaire** est la masse d'une mole d'une substance (un corps simple, un composé chimique).

$$\text{Masse molaire (kg.mol}^{-1}\text{)} \longrightarrow M = \frac{m}{n} \longleftarrow \begin{array}{l} \text{Masse (kg)} \\ \text{Q}^{\text{té}} \text{ de matière (mol)} \end{array}$$



# MATERIAUX

## Propriétés physiques – Valeurs

viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique

# A2

### 1 – Viscosité dynamique $\eta$ et cinématique $\nu$

La **viscosité dynamique** d'un fluide s'exprime en  $Pa \cdot s$  ou en Poiseuille (PI) :  $1 PI = 1 Pa \cdot s$

Dans de nombreuses formules apparaît le rapport de la viscosité dynamique  $\eta$  et de la masse volumique  $\rho$ . Ce rapport est appelé **viscosité cinématique**. Son unité est le  $m^2 \cdot s$ .

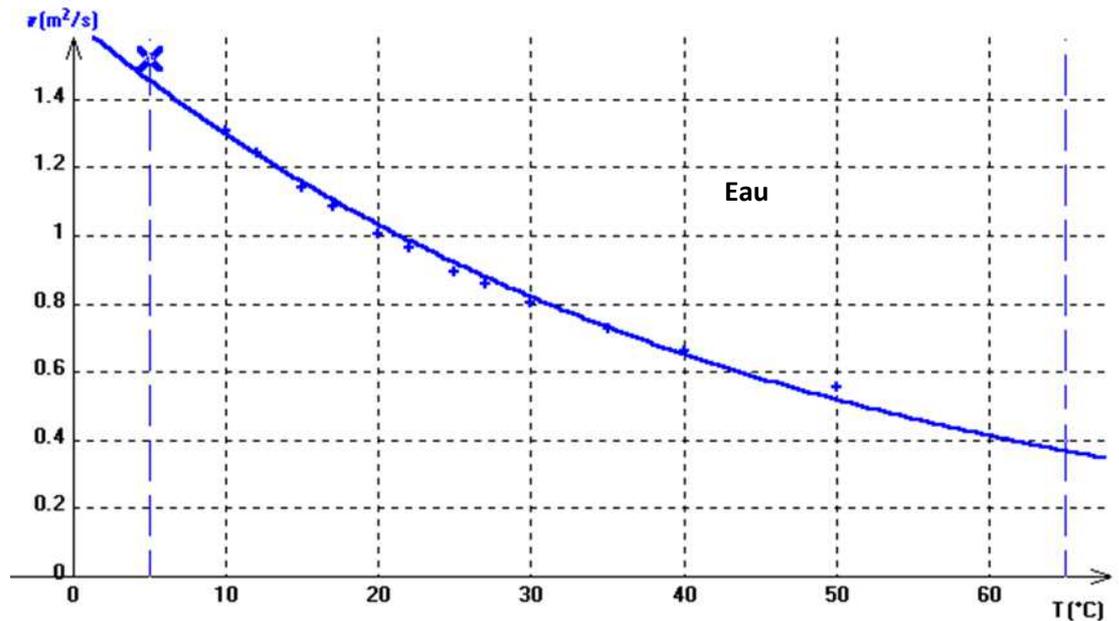
$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

*La viscosité cinématique dépend de la température du fluide.*

#### Eau

Temp °C	Viscosité cinématique ( $\times 10^{-6}$ )
°C	$m^2/s$
5	1,520
10	1,308
11	1,275
12	1,241
13	1,208
14	1,174
15	1,141
16	1,115
17	1,088
18	1,061
19	1,034
20	1,005
21	0,985
22	0,963
23	0,941
24	0,919
25	0,896
26	0,878
27	0,856
28	0,841
29	0,823
30	0,804
35	0,727
40	0,661
50	0,556
65	0,442

	Viscosité dynamique $\mu$ ou $\eta$ (Pa.S)	Viscosité cinématique $m^2/s$ ( $\times 10^{-6}$ )
Eau (20°C)	$10^{-3}$	1.006
Air (20°C)	$18.2 \cdot 10^{-6}$	15.1
Glycérine (20°C)	1.49	1180
Benzène (20°)	$0.625 \cdot 10^{-3}$	0.741
Ethanol (20°C)	$1.20 \cdot 10^{-3}$	1.51
Mercure (20°C)	$1.55 \cdot 10^{-3}$	0.116
CO <sub>2</sub> (20°C, 1 atm.)	$14.7 \cdot 10^{-6}$	8.03
H <sub>2</sub> (20°C, 1 atm.)	$8.83 \cdot 10^{-6}$	105



### 2 – Capacité thermique massique $C_p$

Gaz	Capacité thermique massique [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
Air sec (composé)	1004
Argon	520
Diazote	1025
Dioxyde de carbone	650
Hélium	3160
Vapeur d'eau	2010

Liquides	Capacité thermique massique [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
Eau de mer	3930
Eau douce	4180
Ethylène glycol	2210
Glycérine	2420
Kérozène	2000
Pétrole	2130
Toluène	1500
Xylène	1710

Solides	Capacité thermique massique [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
Asphalte	1021
Brique	840
Béton	880
Granite	790
Verre	720
Bois	1200-2700



# MATERIAUX

## Propriétés physiques – Valeurs

Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur produite par sa combustion, à pression constante et dans les conditions dites « normales » de température et de pression (c'est à dire à 0°C et sous une pression de 1013 mbar).

Le pouvoir calorifique peut s'exprimer en  $MJ \cdot kg^{-1}$  pour les solides et les liquides et en  $MJ \cdot m^{-3}$  pour les gaz.

### 1 – Valeurs usuelles

Carburant liquide	PCI [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ]
Essence (automobile)	43,8
Essence (aviation)	44,0
GPL	46,1
Fioul ou gazole	42,5
Kérozène	43,3
GNV	48,0
Dihydrogène	120,0
Iso-octane	44,4
Iso-heptane	44,6

Carburant solide	PCI [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ]
Charbon	28,8
Bois (30% d'humidité)	10,8

Carburant gazeux	PCI [ $MJ \cdot m^{-3}$ ]
gaz naturel	28,8 à 39,6
Butane - Propane	46,8

### 2 – Comparatif des PCI des énergies

Type combustible	Taux d'humidité	Masse volumique	Pouvoir calorifique kWh/kg	Pouvoir calorifique PCI kWh	Rapport PCS/PCI	Pouvoir calorifique PCS kWh	Pouvoir calorifique kcal/kg	Poids spécifique Kg/m3	Pour 1L de Fioul kg/L
Anthracite	10%	-	6.90-7.70	9010 kWh/T	1.052	9479 kWh/T	6.020	700-800	1.36
Fioul domestique	-	0.845 kg/L	11.86	11870 kWh	1.075	12760 kWh/T	10.20	840	0.98
Fioul lourd valeur moyenne	-	-	11.22	-	-	-	9.649	980	0.98
Fioul lourd TBTS (S < 1%)	-	0.985 kg/L	11.28	11280 kWh/T	1.055	11900 kWh/T	-	-	-
Fioul lourd BTS (S < 2 %)	-	1.000 kg/L	11.16	11160 kWh/T	1.055	11774 kWh/T	-	-	-
Fioul lourd HTS (S < 4%)	-	1.020 kg/L	10.99	10990 kWh/T	1.055	11594 kWh/T	-	-	-
Gaz propane	11.00	1.980 Kg/m3	12,78 kWh/kg.PCI 13,8 kWh/kg.PCS	46,0 MJ ou 12,78 kWh par kg 85,3 MJ ou 23,70 kWh par m3 à 15°C et 1013 mbar	1.087	49,8 MJ ou 13,8 kWh par kg 93,3 MJ ou 25,9 kWh par m3 à 15°C et 1013 mbar	-	-	1.20
Gaz butane	11.00	2.600 kg/m3	12,66 kWh/kg PCI 13,7 kWh/kg PCS	45,6 MJ (1) ou 12,66 kWh par kg 109,6 MJ ou 30,45 kWh par m3 à 15°C et 1013 mbar	1.087	49,4 MJ (1) ou 13,7 kWh par kg 120,5 MJ ou 33,5 kWh par m3 à 15° C et 1013 mbar	-	-	-
Gaz naturel *	-	-	10.83	-	-	-	9.314	-	1.24 m3/L
Gaz naturel B (Nord France)	-	0.634 kg/nm3	-	10.00 kWh/nm3	1.111	11.11 kWh/nm3	-	-	-
Gaz naturel H (reste du territoire)	-	0.634 Kg/nm3	-	11.40 kWh/nm3	1.111	12.67 kWh/nm3	-	-	-
Russie	-	0.750 kg/nm3	-	10.00 kWh/nm3	1.111	11.11 kWh/nm3	-	-	-
Mer du Nord	-	0.820 kg/nm3	-	10.30 kWh/nm3	1.111	11.44 kWh/nm3	-	-	-
Groningue (Pays Bas)	-	0.830 kg/nm3	-	9.30 kWh/nm3	1.111	10.33 kWh/nm3	-	-	-
Gaz Algérien (Montoir)	-	0.810 kg/nm3	-	11.00 kWh/nm3	1.111	12.22 kWh/nm3	-	-	-
Gaz Algérien (Fos)	-	0.780 kg/nm3	-	10.60 kWh/nm3	1.111	11.78 kWh/nm3	-	-	-

### 3 – PCI des six principales énergies

Pouvoir calorifique	Unité de référence	PCI	
		kCAL	kWh
Bois	kilogrammes	3,30	3,800
Charbon tous types	kilogrammes	de 6,65 à 7,80	de 7,600 à 9,070
Électricité	kWh	0,86	1,000
Fioul domestique	litres	8,60	10,000
Gaz naturel (moyenne)	m3	7,56	8,800
Gaz propane	kilogrammes	11,00	12,800

### 4 – PCI des différents combustibles bois

Type combustible	Taux d'humidité	Pouvoir calorifique kWh/kg	Pouvoir calorifique kCAL/kg	Poids spécifique Kg/m3	Pour 1 litre de Fioul kg/L
Plaquettes forestières / Coupe fraîche	55 %	2.00	1.720	310	4.98
Plaquettes forestières / Stockage	40 %	2.89	2.511	240	3.44
Écorces Sapin	50 %	2.14	1.840	280	4.65
Plaquettes Menuiserie	20 %	4.22	3.629	175	2.36
Sciures Bois	20 %	4.20	3.612	160-170	2.38
Granulés Bois/Briquettes Bois	6 %	4.90	4.214	660	2.03
Bûches hêtre	20 %	4.08	3.509	400-450	2.44
Bûches hêtre	45 %	2.61	3.509	650	3.81

### 5 – PCI des différents combustibles issus de l'agriculture

Type combustible	Taux d'humidité	Pouvoir calorifique kWh/kg	Pouvoir calorifique kCAL/kg	Poids spécifique Kg/m3	Pour 1 litre de Fioul kg/L
Paille « grise » ou tiges Colza	15%	4.17	3.586	100 - 135	2.43
Paille « jaune »	15%	4.00	3.440	80-125	2.49
Granulés Paille	8%	4.44	3.818	600	2.24
Miscanthus /Herbe d'éléphant / Roseau de Chine	10%	4.40	3.784	130 - 150	2.26
Céréales : Orge / Blé / Seigle	15%	4.17	3.586	670 - 750	3.81
Avoine	15%	4.50	3.870	500	2.22
Maïs	15%	4.30	3.700	830	2.31
Tournesol (graines)	9%	5.56	4.781	600	1.79
Colza pur (graines 42 % huile)	8 - 9%	6.83	5.874	700	1.46
Tourteau de Colza (14 % gras)	10%	4.97	4.286	650	1.99
Tourteau de Lin (11 % gras)	10%	4.90	4.227	650	2.03



# MATERIAUX

Quelques valeurs de  $E$ ,  $G$ ,  $\nu$ ,  $R_e$ ,  $R_g$ ,  $\rho$

# A4

Matériau		$E$ ( $N \cdot mm^{-2}$ )	$G$ ( $N \cdot mm^{-2}$ )	$\nu$	$R_e$ ( $N \cdot mm^{-2}$ )	$R_g$ ( $N \cdot mm^{-2}$ )	$\rho$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )
ACIERS	S235	190000	74800	0,27	235	115	7860
	C30	200000	78000	0,28	370	180	7860
	C45	200000	78000	0,28	400	300	7860
	C65	210000	80800	0,30	500	400	7860
	C80	220000	84600	0,30	550	500	7860
	C80 Tr/Rev.	220000	84600	0,30	800	750	7860
	14 NiCr 11	210000	80200	0,31	830	800	7800
	35 NiCrMo 6 Tr/Rev.	210000	80200	0,31	930	900	7800
	35 NiCrMo 16	210000	80200	0,31	1250	1200	7800
	45 NiCrMo 6	210000	80200	0,31	1370	1300	7800
FONTES	FGL 200	95000	39200	0,21	200	160	7400
	MN 650-3	180000	72000	0,25	430	400	6800
	FGS 800-2	170000	67500	0,26	480	420	6800
ALUMINIUMS	AU 4G	70000	26300	0,33	240	120	2700
	AZ 5 GU	70000	26300	0,33	440	220	2700
	AU 5 GT	70000	26300	0,33	200	100	2700
CUIVRES	Cu Pb 1	13000	4900	0,33	300	150	8920
	Cu Zn 39 Pb 2	13000	4800	0,35	200	100	8800
	Cu Al 10 Ni 5 Fe 4	13000	4800	0,33	320	160	8900
Magnésium		45500	16500	0,35	200	120	1750
Caoutchouc		-	4 à 8	0,50	-	-	950
Béton		20000 à 50000	9650	0,20	150 à 600 (en compression)	-	2200 2500 (armé)
Verre		69000	18200	0,25	3600	-	2500

Les valeurs données ici sont indicatives.